# REDEMAT

**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**UFOP – CETEC – UEMG**

**Dissertação de Mestrado**

# "Soldagem a Laser dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 316: Análise Microestrutural em Função dos Parâmetros Operacionais"


**Autor: Bruno Nazário Coelho**
**Orientador: Prof. Dr. Adilson Rodrigues da Costa**
**Coorientador: Prof. Dr. Milton Sergio Fernandes de Lima**


**Setembro de 2012**

# REDEMAT

**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**UFOP – CETEC – UEMG**

Bruno Nazário Coelho
(Engenheiro de Controle e Automação)

# "Soldagem a Laser dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 316: Análise Microestrutural em Função dos Parâmetros Operacionais"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Engenharia de Superfícies

Orientador: Prof. Dr. Adilson Rodrigues da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Milton Sergio Fernandes de Lima

Ouro Preto, Setembro de 2012

C672s Coelho, Bruno Nazário.
Soldagem a laser dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 [manuscrito] : análise microestrutural em função dos parâmetros operacionais / Bruno Nazário Coelho – 2012.
xiv, 73f.: il. color.; grafs.; tabs.

Orientadores: Prof. Dr. Adilson Rodrigues da Costa.
Prof. Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Engenharia de Superfícies.

1. Soldagem - Teses. 2. Lasers - Teses. 3. Lasers de Fibra - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 621.791:681.7.069.3

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

*"De todas as paixões humanas, a paixão religiosa é a mais poderosa e a mais vivaz. Produz-se seja pela afirmação seja pela negação, com igual fanatismo, uns afirmando com obstinação o Deus que fizeram à sua imagem, outros negando Deus com temeridade, como se tivessem podido compreender e devastar por um único pensamento todo o infinito que está ligado a seu grande nome."*

**Eliphas Levi**

À minha família, aos meus amigos.

# Agradecimentos

Ao Prof. Adilson por todo o apoio, idéias e conhecimento compartilhado durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Milton Lima pela oportunidade de trabalhar com um tema tão interessante, por toda a sua contribuição e por me receber em seu instituto para realizar os experimentos.

Ao Prof. Flávio Cassino pelas inúmeras sugestões para a organização e melhorias deste trabalho.

À toda a galera do Laboratório LESTA, Júlio, Claudiano, Hugo, Carol, Marcela, Rérisson e Zirlene, pelas contribuiçòes e pela amizade.

Aos técnicos dos laboratórios Sr. Oswaldo, Paulo Sérgio e Graciliano.

À equipe da secretaria da REDEMAT e em especial à Ana.

À Equipe do Laboratório DedALO/IEAv e à Sheila Carvalho pela ajuda durante a fase experimental.

Aos eternos amigos Bruno, Hugo, Mozzer, Maurício, Kássio, Juliana e Fernanda.

À Sarah por todo o apoio, carinho e ajuda nas correções da redação final deste trabalho.

Aos grandes amigos de Ouro Preto e às repúblicas Tarja Preta, Maktub e Indignação!

À minha querida Família, meus pais João e Gessi, e irmãos Igor, Vitor, Mateus e Vinícius, que sem eles nada disso teria sido possível.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

# Resumo

Este trabalho trata da avaliação da influência de parâmetros operacionais utilizados no processo de soldagem a laser de aços inoxidáveis, mais especificamente, aços AISI 304 e AISI 316. Foram realizados experimentos de soldagem com parâmetros ajustados para diversas situações. Os resultados foram então avaliados, caracterizando a influência dos parâmetros para cada caso levando em consideração a densidade de potência disponibilizada. Essa avaliação foi feita através da caracterização metalográfica baseada em ensaios de microdureza e ensaios de corrosão eletrolítica das soldas realizadas. Buscou-se evidenciar correlações entre os parâmetros operacionais selecionados para os experimentos e os resultados obtidos nos cordões de solda, medindo-se grandezas como largura e profundidade dos cordões. Concluiu-se que a escolha adequada dos parâmetros operacionais é fundamental para a garantia da qualidade dos cordões de solda. Considerando a qualidade da solda como sendo uma relação entre a largura e a profundidade, o melhor resultado para o AISI 316 foi cordão soldado com parâmetros de potência igual a 600W e velocidade igual a 150mm/s. Para o AISI 304, a melhor configuração foi com a potência igual a 400W e velocidade igual a 100mm/s. Além disso, validou-se um método rápido de avaliação da susceptibilidade dos cordões de solda à corrosão.

**Palavras-chave:** Soldagem a laser, aço AISI 316, aço AISI 304, laser a fibra, parâmetros operacionais de soldagem a laser, corrosão.

# Abstract

This work addresses the evaluation and the influence of operational parameters used in stainless steels laser welding process, in this case, AISI 304 and AISI 316, and the micro structural quality of the joints. The experiments were performed with a variety of welding parameters aiming to find the best correlations between them and the micro structural properties. The results were then evaluated by characterizing the influence of the parameters for each individual case, considering the power density. This evaluation was held by metallographic characterization, micro hardness tests and accelerated electrolytic corrosion tests performed on the weld lines. Correlations between the selected operating parameters during welding and the metallographic results were analyzed. Considering the weld quality as a ratio between the width and depth, the best result for AISI 316 was the weld with parameters equal to 600W of power and speed equal to 150mm/s. For AISI 304, the best configuration was the one with power equal to 400W and speed equal to 100mm/s. It was observed that the proper adjustment of operating parameters provided excellent results: weld lines reach the proper depth and their corrosion susceptibility is better than that of the base metal.

**Keywords:** Laser welding, fiber laser, AISI 316 stainless steel, AISI 304 stainless steel, laser welding operational parameters, corrosion.

# Sumário

**Lista de Figuras** p. ix

**Lista de Tabelas** p. xii

**Siglas e Abreviações** p. xiii

**1 Capítulo 1**
**Introdução** p. 1

**2 Capítulo 2**
**Objetivo** p. 4

2.1 Objetivos Específicos . . . . . p. 4

**3 Capítulo 3**
**Revisão Bibliográfica** p. 5

3.1 Tecnologia Laser . . . . . p. 5

3.1.1 Soldagem a Laser . . . . . p. 7

3.1.2 Aspectos Positivos e Negativos da Soldagem a Laser . . . . . p. 9

3.1.3 Aspectos Econômicos da Soldagem a Laser . . . . . p. 10

3.1.4 Influência dos Parâmetros Operacionais . . . . . p. 11

3.2 Aços Inoxidáveis . . . . . p. 17

3.2.1 Aço Inoxidável Austenítico AISI 304 . . . . . p. 19

3.2.2 Aço Inoxidável Austenítico AISI 316 . . . . . p. 19

3.2.3 Composição Química dos Aços AISI 304 e AISI 316 . . . . . p. 19

3.2.4 Efeitos da Composição . . . . . p. 20

3.2.5 Corrosão em Aços Inoxidáveis Austeníticos . . . . . p. 21

3.2.6 Soldagem de Aços Inoxidáveis . . . . . p. 22

**4 Capítulo 4**
**Materiais e Métodos** p. 24

4.1 Material Utilizado . . . . . p. 24

4.2 Estação de Trabalho do Laser a Fibra . . . . . p. 25

4.3 Procedimento Experimental . . . . . p. 26

4.3.1 Preparação das Chapas . . . . . p. 26

4.3.2 Programação da Mesa XY . . . . . p. 27

4.3.3 Calibração da Distância Focal . . . . . p. 27

4.3.4 Configuração dos Parâmetros Operacionais . . . . . p. 29

4.3.5 Experimentos de Soldagem do AISI 316 . . . . . p. 30

4.3.6 Experimentos de Soldagem do AISI 304 . . . . . p. 33

4.3.7 Embutimento . . . . . p. 34

4.3.8 Lixamento e Polimento . . . . . p. 35

4.3.9 Ataque Químico . . . . . p. 36

4.3.10 Corrosão Eletrolítica . . . . . p. 36

4.3.11 Análise da Susceptibilidade à Corrosão por Tratamento de Imagem p. 41

**5 Capítulo 5**
**Resultados e Discussão** p. 45

5.1 Análise por Microscopia Óptica (MO) . . . . . p. 45

5.1.1 Análise da Seção Transversal do AISI 316 . . . . . p. 45

5.1.2 Análise da Seção Transversal do AISI 304 . . . . . p. 49

5.2 Microdureza Vickers . . . . . p. 52

5.2.1 AISI 316 . . . . . p. 53

5.2.2 AISI 304 . . . . . p. 54

5.3 Medidas da Largura e da Profundidade do Cordão de Solda . . . . . p. 55

5.4 Correlações entre Profundidade e Velocidade da Soldagem . . . . . p. 56

5.5 Correlações entre Profundidade e Potência . . . . . p. 57

5.6 Defeitos Observados . . . . . p. 59

5.7 Análise da Susceptibilidade à Corrosão por Tratamento de Imagem . . . p. 60

5.7.1 Análise do AISI 304 . . . . . p. 60

5.7.2 Análise do AISI 316 . . . . . p. 63

**6 Capítulo 6**
**Conclusões** p. 68

**7 Capítulo 7**
**Sugestões para Trabalhos Futuros** p. 70

**Referências Bibliográficas** p. 71

# Lista de Figuras


3.1 Efeitos da variação na velocidade do escoamento do gás durante a soldagem p. 13

3.2 Efeitos da variação do espaçamento entre as chapas durante a soldagem . p. 13

3.3 Influência da variação na potência empregada durante a soldagem . . . . p. 14

3.4 Influência da variação na velocidade durante a soldagem . . . . . p. 15

3.5 Curvas de desempenho para a soldagem de aço C-Mn utilizando um laser Nd:YAG e um laser de Yb-Fibra em níveis de energia equivalentes . . . . p. 16

4.1 Micrografia do metal base do aço inoxidável austenítico AISI 304 . . . . . p. 24

4.2 Micrografia do metal base do aço inoxidável austenítico AISI 316 . . . . . p. 25

4.3 Diagrama da estação de processamento de materiais com laser a fibra . . p. 26

4.4 Esboço da movimentação do laser para o ajuste focal . . . . . p. 28

4.5 Placa de alumínio anodizado utilizada para o ajuste focal do laser . . . . p. 28

4.6 Chapa com cordões de solda feitos com diferentes parâmetros, resultantes do primeiro experimento . . . . . p. 32

4.7 Amostras soldadas e embutidas em baquelite e resina, AISI 316 e AISI 304 respectivamente . . . . . p. 35

4.8 Esquema do posicionamento dos cordões de solda no interior dos embutimentos, AISI 316 e AISI 304 . . . . . p. 35

4.9 Partes do equipamento de polimento eletrolítico - LECTROPOL . . . . . p. 37

4.10 Componentes da unidade de operação - LECTROPOL . . . . . p. 38

4.11 Componentes da mesa de polimento - LECTROPOL . . . . . p. 38

4.12 Região circular atacada eletroliticamente, cordão de solda centralizado . . p. 40

4.13 Cordão de solda no AISI 316 submetido à corrosão eletrolítica - MEV . . p. 41

4.14 Cordão de solda no AISI 316 submetido à corrosão eletrolítica - MEV . . p. 42

4.15 Cordão de solda no AISI 304 submetido à corrosão eletrolítica - MEV . . p. 42

4.16 Reconhecimento e identificação de pites nas amostras após os ensaios de corrosão eletrolítica dos aços AISI 304 (esquerda) e AISI 316 (direita) . . p. 43

5.1 Micrografias do aço AISI 316, velocidade 150mm/s e potências 1) 1000W, 2) 800W, 3) 600W, 4) 400W, 5) 500W . . . . . p. 46

5.2 Micrografias do aço AISI 316, velocidade 100mm/s e potências 6) 500W, 7) 400W, 8) 300W . . . . . p. 47

5.3 Micrografias do aço AISI 316, velocidade 50mm/s e potências 9) 400W, 10) 300W, 11) 200W . . . . . p. 48

5.4 Micrografias do aço AISI 304, velocidade 150mm/s e potências 1) 500W, 2) 600W, 3) 700W, 12) 550W . . . . . p. 49

5.5 Micrografias do aço AISI 304, velocidade 100mm/s e potências 4) 400W, 5) 500W, 6) 600W, 11) 450W . . . . . p. 50

5.6 Micrografias do aço AISI 304, velocidade 50mm/s e potências 7) 300W, 8) 400W, 9) 500W, 10) 350W . . . . . p. 51

5.7 Perfil de microdureza Vickers . . . . . p. 52

5.8 Perfil de microdureza Vickers, cordão de solda no centro da imagem . . . p. 53

5.9 Endentações do ensaio de microdureza Vickers . . . . . p. 53

5.10 Curvas relacionando a profundidade e a largura dos cordões de solda com a velocidade da soldagem . . . . . p. 57

5.11 Curvas relacionando a profundidade e a largura dos cordões de solda com a potência do laser, para V=150mm/s . . . . . p. 58

5.12 Defeito ocorrido no cordão da solda - Porosidade . . . . . p. 59

5.13 Defeito ocorrido no cordão da solda - Sangria . . . . . p. 60

5.14 Defeito ocorrido no cordão da solda - Rechupe . . . . . p. 60

5.15 Tratamento de imagem da corrosão no metal base do AISI 304 . . . . . p. 61

5.16 Tratamento de imagem da corrosão no cordão de solda do AISI 304 . . . p. 62

5.17 Tamanho médio dos pites no AISI 304 - Metal base x Solda . . . . . p. 63

5.18 Densidade de pites no AISI 304 - Metal base x Solda . . . . . p. 63

5.19 Tratamento de imagem da corrosão no metal base do AISI 316 . . . . . p. 64

5.20 Tratamento de imagem da corrosão no cordão de solda do AISI 316 . . . p. 65

5.21 Tamanho médio dos pites no AISI 316 - Metal base x Solda . . . . . p. 66

5.22 Densidade de pites no AISI 316 - Metal base x Solda . . . . . p. 66

# Lista de Tabelas


3.1 Composição padrão dos aços AISI 316 e AISI 304 . . . . . p. 20

4.1 Aço AISI 316: potências e velocidades . . . . . p. 31

4.2 Aço AISI 316, chapas pequenas . . . . . p. 32

4.3 Aço AISI 316, chapas grandes . . . . . p. 33

4.4 Aço AISI 304: potências e velocidades . . . . . p. 33

4.5 Aço AISI 304, chapas pequenas . . . . . p. 34

4.6 Ensaios definindo os melhores parâmetros do polimento e ataque eletrolítico p. 39

5.1 Valores médios de microdureza e da análise estatística - AISI 316 . . . . p. 54

5.2 Valores médios de microdureza e da análise estatística - AISI 304 . . . . p. 54

5.3 Medidas da largura e da profundidade do cordão de solda no AISI 304 . . p. 55

5.4 Medidas da largura e da profundidade do cordão de solda no AISI 316 . . p. 56

5.5 Análise da corrosão eletrolítica no metal base do AISI 304 . . . . . p. 61

5.6 Análise da imagem de corrosão eletrolítica no cordão de solda do AISI 304 p. 62

5.7 Análise da imagem de corrosão eletrolítica no metal base do AISI 316 . . p. 64

5.8 Análise da imagem de corrosão eletrolítica no cordão de solda do AISI 316 p. 66

# Siglas e Abreviações

| | | |
|---|---|---|
| *AISI* | : | *American Iron and Steel Institute* |
| *CCC* | : | Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado |
| *CFC* | : | Estrutura Cristalina Cúbica de Face Centrada |
| *CNC* | : | Controle Numérico Computadorizado |
| *CTA* | : | Centro Técnico Aeroespacial |
| *DEMET* | : | Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais |
| *EBW* | : | Eletron Beam Welding |
| *EM* | : | Escola de Minas - Ouro Preto |
| *HAZ* | : | *Heat-Affected Zone* ou Zona Termicamente Afetada |
| *IEAv* | : | Instituto de Estudos Avançados |
| *LBW* | : | Laser Beam Welding |
| *LESTA* | : | Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins |
| *LTT* | : | Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos (EM-UFOP) |
| *MO* | : | Microscopia Óptica |
| *MEV* | : | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| *SCC* | : | *Stress Corrosion Cracking* ou Corrosão Sob Tensão |
| *UFOP* | : | Universidade Federal de Ouro Preto |
| *UHSS* | : | *Ultra-High Strength Steel* |
| *ZF* | : | Zona Fundida |
| *ZTA* | : | Zona Termicamente Afetada |

# Capítulo 1
# Introdução

Soldagem a laser é um assunto largamente estudado nos últimos anos, dada a sua atual importância na melhoria da qualidade dos processos produtivos. Muitas dessas pesquisas são promovidas pelas indústrias automotiva e aeroespacial, que têm grande interesse nesse desenvolvimento considerando as limitações dos métodos atuais.

A sigla Laser se refere a "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", em português "Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação". Além da soldagem, o laser tem sido utilizado em diversas aplicações industriais como corte, marcação, tratamentos de superfície, furação, entre outras em várias áreas do conhecimento. A utilização do laser para o processamento de materiais apresenta várias vantagens quando comparada com os métodos tradicionais utilizados. A alta produtividade e a facilidade de automação são fatores diferenciais em uma indústria, pois muitas vezes reduzem o custo do processo além de melhorar a qualidade do produto.

O responsável pelos fundamentos teóricos iniciais de um laser foi Einstein, mas o primeiro laser desenvolvido foi o de rubi em 1960. Os lasers mais utilizados atualmente para soldagem, $CO_2$ e Nd:YAG, foram demonstrados e desenvolvidos em 1964 por outros pesquisadores.

Inicialmente, as aplicações do laser foram baseadas em suas características únicas (coerência espacial e temporal, estabilidade, monocromaticidade e baixa divergência) e incluiam espectroscopia e metrologia. Com o desenvolvimento de lasers de potência mais elevada, sua utilização industrial para o processamento de materiais começou a ser mais estudada[1]. No processo de soldagem a laser, não há desgaste do eletrodo e nem possíveis contaminações do material do eletrodo ou do bocal.

Na indústria aeroespacial, são usadas diferentes ligas na fabricação de aeronaves e o método tradicional de união da fuselagem é a rebitagem, mas este processo já se encontra no limite da sua evolução tecnológica. Estudos realizados nos últimos dez anos por ins-

titutos de pesquisas, apontam vantagens evidentes na substituição parcial da rebitagem mecânica pela soldagem na construção de aeronaves, trens e navios. Atualmente as empresas fabricantes de aeronaves possuem programas de soldagem avançados. Levando em conta que nem todos os processos de soldagem são elegíveis para a fabricação de aeronaves pois existem critérios rígidos de qualidade metalúrgica, limitações na extensão da zona afetada pelo calor e do controle de defeitos e distorções que fazem com que os fabricantes de aeronaves invistam em novas tecnologias de soldagem para estruturas, nesse contexto entra a soldagem a laser ou "*Laser Beam Welding - LBW*"[2].

No meio industrial, os aços inoxidáveis têm uma grande importância devido às características de resistência a um grande número de agentes corrosivos. O AISI 304 e o AISI 316 são dois aços inoxidáveis austeníticos amplamente utilizados em diversas aplicações industriais.

O AISI 304 é muito utilizado na construção civil, em elevadores e no revestimento de edifícios. Já na industria, está presente em tubos, tanques, reatores, colunas de destilação e trocadores de calor, por exemplo. As industrias aeronáutica, ferroviária, naval, de papel e celulose, petroquímica, têxtil e hospitalar utilizam esse aço, bem como o AISI 316. Também são utilizados em tanques para transporte de produtos (alimentos e produtos químicos). O AISI 316, além dessas aplicações, é mais resistente à atmosferas litorâneas, e também à maioria das atmosferas industriais isentas de agentes especialmente agressivos[3]. Em muitas dessas aplicações, esses aços precisam passar por etapas de soldagem, que se não forem realizadas adequadamente, podem acarretar sérios riscos.

Os problemas identificados nas empresas que trabalham com soldagem de aços inoxidáveis nem sempre estão relacionados com os aspectos metalúrgicos do material base. Na grande maioria das vezes estes problemas estão ligados às técnicas e aos procedimentos utilizados durante o processo de soldagem[4].

Durante o processo de soldagem a laser, diversas variáveis devem ser consideradas, tais como a potência utilizada, a velocidade de passagem do laser, gases de proteção, distância entre as placas a serem soldadas, distância focal, entre outras que modificam consideralvelmente os resultados obtidos na soldagem. Uma outra variável importante a ser considerada é o material a ser soldado, pois para cada tipo de material existe uma configuração ideal do conjunto de parâmetros que otimizam os resultados do processo.

Portanto, estudos que identificam esses parâmetros ótimos para determinados tipos de materiais têm uma grande relevância para o desenvolvimento científico, pois promovem ganhos qualitativos e quantitativos no processo de soldagem a laser, o que é de grande

interesse para as indústrias que utilizam essa tecnologia.

# Capítulo 2
# Objetivo

Este trabalho teve como objetivo realizar, experimentalmente, a soldagem a laser de chapas dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316, utilizando-se diferentes parâmetros operacionais para avaliação e definição dos melhores ajustes para cada aço.

## 2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

1. Determinar a densidade de potência ideal a ser utilizada para soldar chapas de aços AISI 304 e AISI 316, com espessuras de 1,2 e 1,0 mm, respectivamente.
2. Analisar os resultados obtidos na fase experimental, estabelecendo correlações com os parâmetros utilizados.
3. Evidenciar os parâmetros operacionais ótimos a serem utilizados em soldas nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316.
4. Analisar a susceptibilidade à corrosão dos cordões de solda e regiões adjacentes.

# Capítulo 3
# Revisão Bibliográfica

Estudos realizados anteriormente na literatura, relativos ao tema abordado neste trabalho, estão descritos neste capítulo. Primeiramente sobre o desenvolvimento da tecnologia laser, em seguida, sobre aços inoxidáveis e, por último, soldagem a laser de aços inoxidáveis.

## 3.1 Tecnologia Laser

Os lasers podem ser diferenciados pelo seu modo de operação, que pode ser regime pulsado ou contínuo. A potência dos lasers industriais que operam no modo contínuo é de grande estabilidade[5].

Nenhuma outra descoberta científica do século XX resultou em tantas aplicações e em áreas tão diversas como o laser. E, de fato, é surpreendente como se deram o desenvolvimento e aplicações dos lasers nos últimos anos[6].

Atualmente existe um movimento significativo na direção de investigar as vantagens oferecidas pelas fontes de laser no estado-sólido em detrimento aos lasers de $CO_2$, quando os critérios de flexibilidade, entrega do feixe e custo de consumíveis são considerados[7].

O laser de Nd:YAG possui vantagem na soldagem de chapas finas comparado com o laser de $CO_2$, porque consegue-se uma melhor flexibilização de movimentos em sua aplicação devido ao uso de fibras ópticas, e também pelo seu custo mais baixo[8]. Em relação à flexibilidade da utilização de fibras ópticas, também é válido para o laser Yb-fibra.

O uso de energia concentrada gerada por lasers, $CO_2$ ou Nd:YAG (granada de ítrio e alumínio dopada com neodímio) continua a ganhar aceitação como um processo para um número de operações que requerem injeção de alta temperatura com velocidade e precisão[9].

Um feixe de alta qualidade pode ser focalizado em um pequeno diâmetro, o que quer dizer que resulta em um menor diâmetro na região atingida ou em uma distância maior de trabalho. O cabeçote do laser é a parte que fica próxima ao processo e é onde ocorre a colimação, isto é, deixar paralelo o feixe divergente do laser na saída da fibra antes de ser focalizado, muitas vezes também referido como *laser spot*. A relação entre o tamanho do *spot* e uma dada potência de saída determina a densidade máxima de potência disponível para a peça. A distância focal, medida entre a lente de focalização e a superfície da peça, deve ser grande o suficiente para garantir que respingos do processo de soldagem não danificarão a óptica. Quanto maior essa distância, maior também a profundidade do foco[10].

A Equação 3.1 relaciona os parâmetros de qualidade do feixe, comprimento de onda, diâmetros e a distância focal.

$$d_{min} = \frac{4M^2\lambda f}{\pi d_\sigma} \tag{3.1}$$

- $M^2$ = Qualidade do Feixe
- $d_\sigma$ = Diâmetro do Feixe
- $d_{min}$ = Diâmetro Mínimo do Feixe
- $f$ = Distância Focal
- $\lambda$ = Comprimento de onda

**Laser a Fibra**

Lasers a fibra são lasers de estado sólido no qual uma fibra óptica de vidro é dopada com terras raras. São usados diodos para estimular o material gerador, que emite fótons no comprimento de onda específico do elemento utilizado na dopagem. Geralmente utiliza-se Itérbio para os lasers de alta potência atualmente disponíveis para processamento de materiais, e este, emite um comprimento de onda aproximadamente igual ao Nd:YAG, ou seja, entre 1060 e 1085 micrômetros. A fibra dopada fica cercada por um material de baixo índice de refração que atua como guia para os fótons e garante uma boa transferência dessa energia. Redes de Bragg, inscritas na própria fibra, funcionam como espelho parcialmente refletores para formar o ressonador, criando um laser longo e fino que, devido à flexibilidade da fibra óptica (que é simplesmente enrolada), pode ser muito compacto. Embora seja

possível utilizar a fibra do laser como a fibra de entrega final do feixe, é aconselhado a utilização de um acoplamento entre a fibra de entrega do feixe e uma fibra específica para o processamento de materiais, com isso aumentando sua resistência e também como meio de proteção contra reflexões indesejadas a partir da superfície da peça, que podem voltar pela fibra óptica danificando o laser[11].

Lasers a fibra de Yb:vidro possuem uma eficiência elétrica em torno de 20%, tamanho compacto e requisitos de resfriamento reduzidos. O laser a fibra possui alta qualidade do feixe para um comprimento de onda de 1,07$\mu m$, tornando-o apropriado para soldagem e corte de metais. Em um laser a fibra de Yb:vidro, o meio ativo é contido na própria fibra, ou seja, um núcleo de sílica dopada com itérbio (Yb) e revestido por sílica não-dopada. Este tipo de laser pode atingir até 40 kW de potência, porém, devido ao seu aparecimento recente, existem poucas aplicações para processamento de materiais até o momento[12].

Hoje em dia, a potência de saída de um laser a fibra excede em muito o que está disponível comercialmente em lasers Nd:YAG e, além disso, o laser a fibra oferece um feixe de maior qualidade. A potência e qualidade do feixe do laser a fibra estão aumentando rapidamente e, em certos casos, já são superiores aos lasers de $CO_2$ [11].

### 3.1.1 Soldagem a Laser

Soldagem a laser (LBW) é um processo de união que produz a coalescência de um material com o calor obtido a partir da aplicação de um feixe de luz concentrado e coerente que colide com as superfícies a serem soldadas. Os lasers são ferramentas de soldagem potencialmente úteis para uma variedade de aplicações. Até os anos 70, devido à limitação de potência disponível, a soldagem a laser esteve restrita a materiais relativamente finos e com baixas velocidades. Por volta de 1965, uma variedade de sistemas de laser foi desenvolvida para fazer microsoldagens em placas de circuitos eletrônicos dentro de tubos de vácuo, além de outras aplicações especializadas, para as quais a tecnologia convencional foi incapaz de fornecer resultados confiáveis. As limitações das tecnologias tradicionais de soldagem têm promovido o interesse por soldagens com profundidade de penetração elevada utilizando lasers de alta potência com onda contínua, por exemplo, o laser de dióxido de carbono ($CO_2$) e o laser de Nd:YAG. Isso, nos últimos 20 anos[9].

O processo de soldagem a laser envolve a focalização de um feixe de alta potência sobre uma pequena área do material, fazendo com que este seja vaporizado criando uma cavidade chamada *keyhole*. Esta cavidade ajuda a transmitir o feixe para dentro do material por reflexões múltiplas, o que aumenta o acoplamento entre o feixe e o material (aumento

da absortividade). Para que o *keyhole* seja estável, a pressão de vapor deve se contrapor à tensão superficial e à pressão hidrostática do líquido nas paredes do canal. Conforme o feixe de laser se desloca para criar o cordão, o material é continuamente fundido pelo feixe, fluindo ao redor do *keyhole* e solidificando-se na parte posterior da poça de fusão. As características da soldagem por penetração estabelecem a velocidade de processo: velocidades muito altas provocam o desabamento do *keyhole*, enquanto velocidades muito baixas causam rebarbas e furos pelo escoamento do líquido[13].

Lasers industriais são capazes de fornecer grandes quantidades de calor com uma grande precisão e sem contato com as peças, o que os tornam ideais para aplicações como o corte, perfuração e soldagem[9].

Existem fundamentalmente dois tipos de processos de soldagem a laser: por condução e por *keyhole*. Nos processos por condução, a baixa potência do laser ou a sua alta velocidade leva à uma densidade de potência insuficiente para causar evaporação. O feixe laser transfere calor para uma poça líquida que é vigorosamente agitada pelas correntes de convecção e posteriormente ressolidificada. Comumente, a absorção do feixe laser não ultrapassa 15% nos processos por condução. No caso da solda por *keyhole*, a densidade de potência é suficientemente alta para provocar um canal de vapor dentro da peça. As paredes deste canal são compostas de líquido suspenso pela pressão do vapor[14].

A aplicabilidade da técnica de soldagem por condução ou por keyhole dependerá do tipo de material e geometria a ser soldada. A solda por condução gera poças mais largas e pouco profundas. Já a solda por keyhole é mais estreita e profunda, mas pode ocasionar defeitos quando as paredes líquidas desabam, engolfando vazios e gerando porosidades[14].

Durante o processo de solda, o vapor criado pelo feixe do laser gera uma pressão no *keyhole*, o que contribui para a estabilização e para manter o ponto de solda aberto para uma penetração mais profunda do laser. Por outro lado, o vapor acima da superfície da peça forma o plasma, pela interação entre o feixe do laser e o metal vaporizado, que absorve a energia do laser e reduz a penetração da solda[15]. O potencial de ionização (ignição) deste plasma depende do tipo de metal vaporizado, do gás de proteção e da densidade de potência do feixe de laser. Em geral, o plasma tem um efeito deletério para o acoplamento da luz com a peça, por formar um escudo semitransparente ao feixe[12].

Além da necessidade de se obter uma focalização adequada, uma boa qualidade do feixe é importante, pois proporciona uma maior densidade de potência no foco do feixe, ou uma distância maior com maior profundidade do foco, os quais influenciam o desempenho do processo de soldagem[11].

Atualmente estão disponíveis diversos equipamentos robóticos para serem integrados aos lasers, facilitando a entrega do feixe para a peça de trabalho. Além disso, quase qualquer estação de trabalho possui porta-amostras com eixos controlados por computador, integrados aos lasers para dirigir o feixe para a peça. O uso apropriado do laser como uma máquina/ferramenta requer um conhecimento básico de óptica. O conhecimento das propriedades ópticas, tais como distribuição espacial do feixe, a profundidade de focalização e o comprimento de onda são críticas para o processamento ótimo utilizando um laser[9].

### 3.1.2 Aspectos Positivos e Negativos da Soldagem a Laser

A soldagem a laser possui vantagens que, muitas vezes, influenciam diretamente na qualidade do produto final e compensam o elevado custo da tecnologia.

**Aspectos Positivos**

- Elevada flexibilidade no caso de manipulação de feixes por meio de fibras ópticas;
- A velocidade da soldagem a laser pode ser da ordem de vários metros por minuto, dependendo da potência disponível, tamanho do cordão, tipo de material e da espessura a ser soldada;
- É uma técnica apropriada para soldagem com penetração total em um único passe;
- Como o laser é muito focalizado, a zona de fusão é muito estreita;
- Não é necessária a utilização de metais de adição;
- É uma técnica que não possui contato entre o laser e o material, portanto não existe desgaste de eletrodos e bocais;
- Como o aporte térmico total é pequeno, mínimas tensões térmicas são introduzidas, resultando na diminuição de distorções;
- Usando-se divisores de feixe, este pode ser compartilhado por diferentes estações de trabalho, aumentado a flexibilidade de sua utilização;
- É possível unir diferentes espessuras de chapas;
- É possível unir ligas metálicas dissimilares, pois a fusão é muito concentrada durante a soldagem[12].

As vantagens citadas, na maioria dos casos, compensam as desvantagens do uso dessa tecnologia para a soldagem.

**Aspectos Negativos**

- O equipamento requer um investimento inicial que é relativamente alto, porém pode ser justificado pela alta produtividade ou por melhorias na qualidade da solda;
- A vaporização do material durante a soldagem pode gerar fumos potencialmente perigosos, portanto o processo de soldagem a laser necessita de um mecanismo de extração de gases apropriado;
- A utilização do laser necessita de certos cuidados, pois as altas intensidades dos lasers podem provocar danos aos olhos e queimaduras na pele. Portanto, um ambiente para soldagem protegido e isolado é necessário, como em qualquer solda por arco;
- A eficiência energética (diferença entre a potência consumida e a potência de luz gerada) do laser é baixa. Lasers de Nd:YAG (lâmpada) possuem eficiência de 1 a 3%, enquanto lasers de $CO_2$ possuem de 5 a 10%. Eficiências maiores podem ser obtidas usando outros tipos de laser, como por exemplo, laser a fibra, que possui eficiência em torno de 20 a 30%, ou laser de diodo direto, que possui eficiência em torno de 25 a 40%[12].

Pode-se acrescentar como desvantagens os perigos eminentes, como no caso dos olhos, pois qualquer feixe de laser capaz de soldar metais é também capaz de causar sérios danos aos olhos. A exposição direta ao feixe ou a qualquer feixe refletido deve ser evitada a todo o momento. Assim, a visualização da área de impacto do feixe de laser ou feixes refletidos também deve ser prevenida, e o principal método para isto é um completo isolamento do recinto. A exposição da pele ao feixe primário, obviamente, pode resultar em queimaduras graves e deve ser evitada através de treinamentos do operador. Mesmo na presença operações em que o operador está autorizado a ver o processo de soldagem, é desejável a utilização de barreiras parciais bloqueando o acesso ao feixe, além de óculos de proteção[9].

### 3.1.3 Aspectos Econômicos da Soldagem a Laser

O custo do investimento inicial de qualquer laser é alto, mas isso deve ser analisado juntamente com as vantagens de produtividade que a tecnologia oferece, isto é, calcular os

custos de funcionamento da tecnologia por solda realizada ou por componente. No caso do laser a fibra, por exemplo, deve-se levar em conta a utilização de um chiller (utilizado para refrigeração) menor, um menor consumo de energia do laser e do chiller, o espaço necessário reduzido e uma manutenção e exigências de serviço mínimas. Não obstante, ocorrem grandes variações nos preços cotados, e estima-se que no mercado competitivo, o custo por kW de um laser com tecnologia Yb:fibra é aproximadamente o mesmo de um laser de Nd:YAG. Por causa do ritmo acelerado de desenvolvimento tecnológico e o aumento da concorrência entre as novas tecnologias laser, espera-se uma redução ainda maior nos preços globais por kW de potência de saída [11].

Ajustes de alinhamento são muito mais críticos na soldagem a laser que na soldagem tradicional. O diâmetro típico do ponto focal em um feixe de laser varia de 100 a 1000$\mu m$, o que exige movimentos muito precisos. Além disso, o custo dos equipamentos de soldagem a laser é quase 10 vezes mais caro do que os sistemas de soldagem a arco. Por outro lado, a soldagem a laser pode proporcionar um rendimento relativo muito mais elevado comparado com a soldagem por arco convencional. Quando o custo do laser é comparado com equipamentos de soldagem por feixe de elétrons (EBW), a soldagem a laser se torna mais rentável entre os dois processos pois não tem necessidade das câmaras a vácuo, que são utilizadas na soldagem por feixe de elétrons[9].

### 3.1.4 Influência dos Parâmetros Operacionais

O fator-chave para procedimentos de desenvolvimento é a seleção ótima das variáveis do processo[9]. Uma investigação elaborada sobre a otimização dos parâmetros operacionais visando efeitos na qualidade resultante do processamento de corte em um aço inoxidável foi detalhada em trabalho do autor Wandera[16]. No trabalho citado, os parâmetros de processamento que foram escolhidos para serem otimizados para obtenção de uma boa qualidade no corte foram: a velocidade de corte, a posição do ponto focal e distância focal. Além de detalhar também os níveis dos parâmetros de processamento que foram otimizados no corte do aço inoxidável AISI 304, chapa de 10mm, utilizando o laser de fibra de itérbio. A potência do laser foi 4kW, utilizando nitrogênio como gás de proteção, soprado por um bocal coaxial cônica. Utilizou-se uma fibra de entrega do feixe de diâmetro 150$\mu m$ até o cabeçote[16].

Estudos anteriores indicam a importância da escolha adequada dos parâmetros operacionais. A microestrutura de uma solda em uma superfície inoxidável de aço ferramenta martensítico depende dos parâmetros de funcionamento do laser. A microestrutura pode

mudar de quase completamente martensítica para quase completamente austenítica, alterando as condições do tratamento a laser[17].

Na indústria automobilística, a principal preocupação reside na estampabilidade do blanque soldado. Uma vez que as propriedades mecânicas da solda, como ductilidade e tenacidade, são bastante diferentes do aço de base, são necessários ensaios que permitam inferir a qualidade da solda. Como existem dezenas de variáveis de processo que podem variar de uma solda para outra, a estampabilidade precisa ser medida continuamente durante a produção. Quando ocorre um problema, este está associado a defeitos de processo, como penetração insuficiente, porosidades ou trincas[18].

Soldagem para emenda é uma das aplicações mais importantes do laser pulsado. Ela pode ser descrita como uma série de soldas em sobreposição ponto a ponto para formar uma zona de fusão ou emenda. A formação e a qualidade das emendas é o resultado de uma combinação de vários parâmetros de processamento, tais como a velocidade de deslocamento, a potência do laser, a energia e duração do pulso[19].

Entre os problemas a serem enfrentados está a formação de plasma durante a soldagem, que afeta drasticamente a qualidade da solda, além de reduzir a profundidade atingida pelo feixe do laser. Foi desenvolvido um estudo apontando três alternativas para controlar a formação de plasma durante a solda[15].

São elas a utilização de:

- Um gás de proteção;
- Uma pequena fresta entre as chapas a serem soldadas;
- A utilização de laser pulsado.

Os parâmetros para cada uma dessas três alternativas devem ser calibrados de acordo com o tipo de material a ser soldado, pois cada um tem suas próprias características.

Heyden et al.[15] realizaram três experimentos com diferentes velocidades de escoamento de um gás de proteção, nesse caso o hélio, que mostrou resultados superiores ao nitrogênio. Na parte esquerda da Figura 3.1, o experimento foi realizado com uma vazão muito alta, e na direita, com uma vazão muito baixa. O resultado ótimo é mostrado na figura central.

Para diferentes espaçamentos entre as chapas, também foram feitos experimentos com várias situações possíveis[15]. A parte esquerda da Figura 3.1.4 mostra uma solda realizada

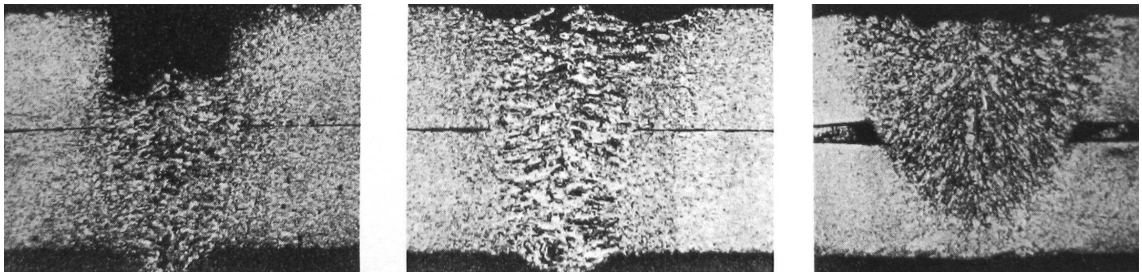

Figura 3.1: Efeitos da variação na velocidade do escoamento do gás durante a soldagem

sem nenhum espaçamento entre as chapas, em que na parte central está o espaçamento ótimo, e na direita um espaçamento muito grande, que gera os defeitos apresentados na imagem.

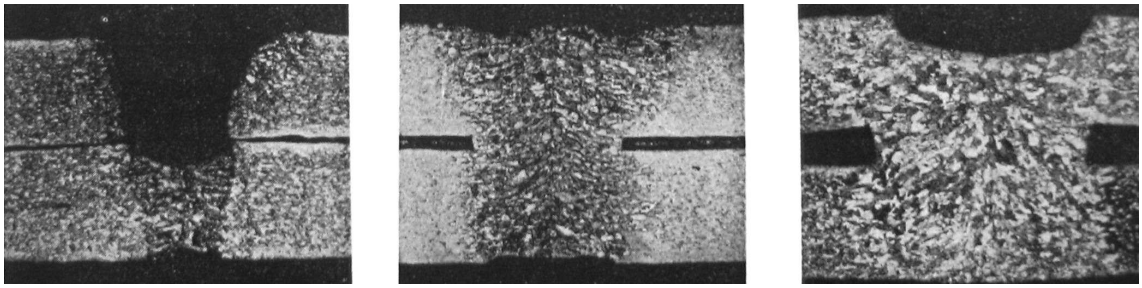

Figura 3.2: Efeitos da variação do espaçamento entre as chapas durante a soldagem

Observa-se que os cordões com alto escoamento de gás e com pouco espaçamento entre as chapas apresentam uma região ausente de material, o que gera um concentrador de tensão na região. Na situação inversa, o cordão de solda não atinge a penetração nas chapas.

Outro parâmetro a ser observado é o ângulo de inclinação, pois para os experimentos de soldagem, o laser não deve ser posicionado exatamente a 90 graus da superfície da peça a ser soldada.

Quando o feixe de luz do laser atinge a amostra, parte da luz é refletida pela superfície e essa reflexão pode ser guiada de volta para o laser através do sistema óptico. Então parte dessa luz refletida pode chegar ao ressonador e afetar a geração do feixe de luz, causando perdas na potência e deterioração do laser[20].

### Potência do Laser

O principal parâmetro, sem dúvida, é a potência utilizada, que influencia diretamente o resultado obtido nas soldagens. Com um valor muito baixo, o feixe não atinge uma penetração adequada, e com um valor muito alto, prejudica muito a qualidade da solda e

suas regiões próximas.

A profundidade da penetração com a soldagem a laser está diretamente relacionada com a densidade de potência do feixe do laser, e é uma função da potência incidente e do diâmetro do feixe. Para um feixe de diâmetro constante, a penetração aumenta à medida que a potência do feixe é aumentada. Esse aumento é relatado em diversos trabalhos, sendo que a penetração aumenta linearmente com a potência do laser incidente[21] [22]. É geralmente observado que, para a soldagem a laser de uma espessura específica, exige-se um limite mínimo de potência[9].

A secção transversal apresentada por Verhaeghe[11] na Figura 3.3 foi realizada para uma junta de topo em uma chapa de 6,35mm de espessura em uma liga de alumínio da série 7000, usando um laser Nd:YAG com potência de 3.5kW. Uma densidade de potência baixa foi suficiente para conseguir uma penetração completa, utilizando uma velocidade lenta de soldagem de 0,3m/min. Duplicar a potência para 7kW, no caso de um laser Yb:fibra, permite velocidades de soldagem de entre 2,8 e, 4.8m/min, ou seja, um aumento de 10 a 16 vezes. As soldas resultantes do Yb-fibra têm uma relação de aspecto muito mais elevado, típico para soldagem a laser.

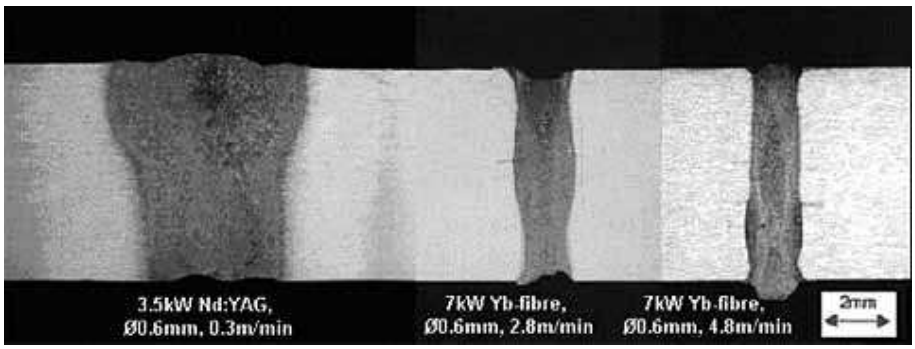


Figura 3.3: Influência da variação na potência empregada durante a soldagem

### Velocidade da Soldagem

Em relação à velocidade de movimentação do feixe do laser, também existe uma correlação da profundidade de penetração em relação à velocidade de soldagem[21] [23].

A velocidade da soldagem foi avaliada, também por Verhaeghe[11], na soldagem de placas com 1,2mm de espessura de aços de resistência ultra-alta (UHSS), utilizando um laser Nd:YAG com 4kW de potência, a uma velocidade de soldagem de 2,5m/min. A Figura 3.4 compara essa soldagem com outra utilizando um laser Yb-fibra com 4kW de potência, em uma velocidade de soldagem de 4 e 17m/min. Observou-se uma melhor

proporção na solda, com uma largura da solda (incluindo a HAZ) inferior a 1mm.

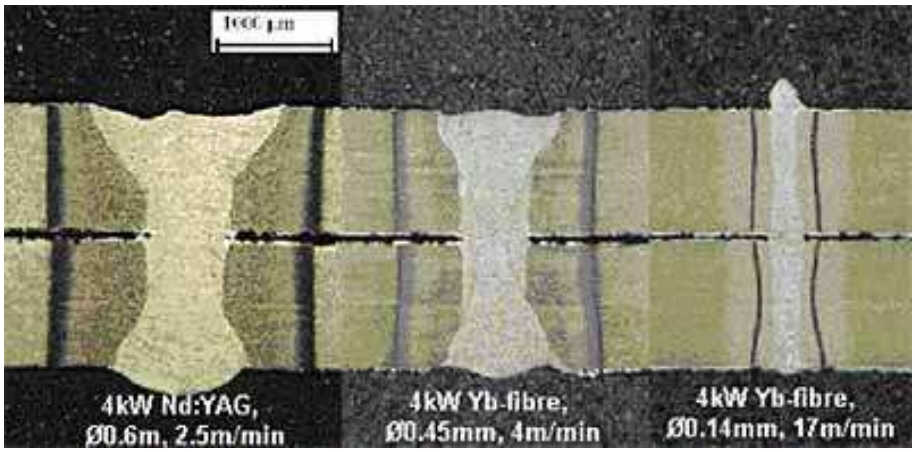


Figura 3.4: Influência da variação na velocidade durante a soldagem

As curvas apresentadas na Figura 3.5, obtidas a partir de uma série de soldas com penetração completa realizadas em aço C-Mn, mostram o desempenho da soldagem em relação à profundidade obtida, isto é, da penetração por velocidade de soldagem. Não existem grandes diferenças nas condições de processamento entre o laser Yb-fibra e o laser Nd:YAG para potências de saída equivales. As curvas da Figura 3.5 foram obtidas utilizando 3kW e 4kW de potência do laser Yb-fibra e do laser e Nd:YAG, com os valores do Nd:YAG obtidos a partir de trabalhos anteriores[24]. Embora as curvas não coincidam exatamente, um melhor desempenho tanto para o Yb:fibra quanto para o laser Nd:YAG não pôde ser concluido pois, como o laser de Yb-fibra parece ter uma pequena vantagem de desempenho sobre Nd:YAG, quando se avalia os valores 4kW, ocorre o oposto quando se considera os valores de potência de 3kW. Pequenas diferenças na composição do material ou mesmo a maneira como os ensaios foram realizados, por exemplo, provavelmente contribuiram mais para as diferenças mostradas do que a própia alteração da fonte de laser[25].

### Gases de Proteção

Para preservar as propriedades das ligas durante a soldagem a laser, é importante utilizar um gás de proteção para evitar a fragilização da região soldada e a perda na ductilidade. O gás de proteção é utilizado para prevenir o material contra contaminações atmosféricas, além de melhorar o acoplamento do laser para o material[26].

Para determinar o efeito da aplicação de proteção com gases hélio e argônio em ligas de titânio, Caiazzo[27] utilizou diferentes tipos de bocais e um laser de $CO_2$ com potência constante (1500W). Como resultado deste estudo, para cada velocidade de soldagem

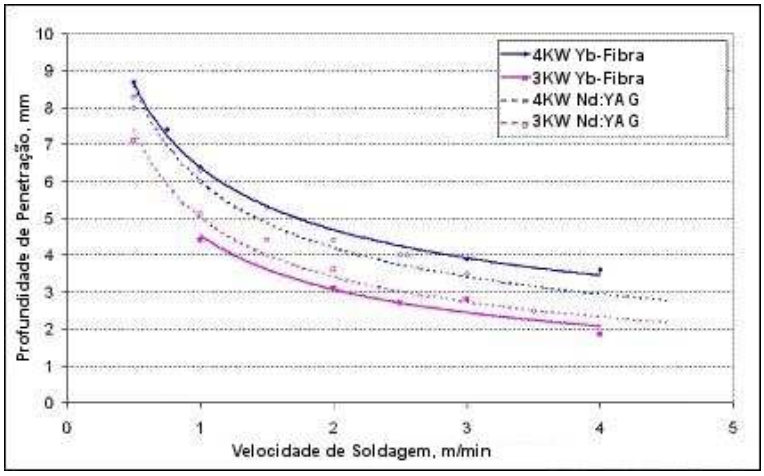


Figura 3.5: Curvas de desempenho para a soldagem de aço C-Mn utilizando um laser Nd:YAG e um laser de Yb-Fibra em níveis de energia equivalentes

examinada, foi obtida uma maior profundidade de penetração com gás hélio do que com argônio, devido à menor energia de ionização do argônio que reduz a transferência de energia para o material.

Melhores propriedades mecânicas podem ser adquiridas através da irradiação por laser na presença de gases ativos quimicamente, pois isto leva à formação de camadas superficiais compostas, como óxidos ou nitretos. As principais vantagens do método são a boa aderência da camada formada e a velocidade da reação. Dentre as desvantagens, irregularidades superficiais, formação de trinca e alta rugosidade das camadas obtidas[28].

### Outros Parâmetros

A densidade de potência de radiação na superfície do material pode ser controlada pela alteração da distância focal, desfocando o feixe laser e fazendo com que a área atingida diretamente pelo feixe seja maior. A densidade de potência do local aquecido diminui com a desfocalização e, consequentemente, o tamanho da zona fundida é alterado[29].

A formação do *keyhole* promove uma abertura para a penetração do feixe laser no metal e, com isso, a posição focal ótima se encontra ligeiramente abaixo da superfície. Tanto a forma dos pontos de solda quanto a profundidade dependem da posição do foco no material. Uma observação importante é que o ponto ótimo da posição focal depende do material a ser soldado[30].

O efeito do vácuo na penetração da solda e na formação de porosidade tem sido investigado por Katayama[31], em aços inox AISI 304 e na liga de alumínio A5083. Seus resultados mostraram que a soldagem a vácuo é eficaz na prevenção da porosidade, pois

não foram encontrados poros abaixo de 0,4kPa. Além disso, a profundidade de penetração aumentou e a zona de fusão tornou-se mais fina e com uma diminuição da pressão.

## 3.2 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro contendo pelo menos 10,5% Cr. Poucos aços inoxidáveis contém mais do que 30% de Cr ou menos do que 50% de Fe. As características inoxidáveis são originadas através da formação de uma película invisível e aderente de óxido de cromo na superfície do material. Outros elementos podem ser adicionados conferindo características particulares à liga, como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio. O carbono é normalmente presente em quantidades que variam de menos de 0,03% para mais de 1,0% em alguns martensíticos[32].

Os aços inoxidáveis são comumente divididos em cinco grupos: aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis duplex (austenítico-ferrítico) e aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

### Aços Inoxidáveis Martensíticos

Aços inoxidáveis martensíticos são ligas de cromo e carbono que possuem uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) distorcida no estado endurecido. São ferromagnéticos, endurecíveis por tratamentos térmicos, e são geralmente resistentes à corrosão somente em ambientes relativamente suaves. O teor de cromo é, geralmente, na faixa de 10,5 a 18%, e o teor de carbono pode ser superior a 1,2%. A quantidade de cromo e carbono são balanceadas para garantir uma estrutura martensítica após o endurecimento. Carbonetos em excesso podem estar presentes para aumentar a resistência ao desgaste e para manter as arestas cortantes, como no caso das lâminas de uma faca. Elementos como nióbio, silício, tungstênio e vanádio podem ser adicionados para modificar a resposta da têmpera após o endurecimento. Pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência à corrosão em alguns meios. Enxofre ou selênio é adicionado em alguns graus para melhorar a usinabilidade[32].

### Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de cromo com estrutura cristalina CCC. O teor de cromo é normalmente na gama de 10,5 a 30%. Alguns tipos podem conter molibdênio,

silício, alumínio, titânio e nióbio, que conferem características particulares aos aços. Enxofre ou selênio podem ser adicionados, como no caso dos aços inoxidáveis austeníticos, para melhorar a usinabilidade. Os aços inoxidáveis ferríticos são ferromagnéticos e podem ter boa ductilidade e conformabilidade, mas em altas temperaturas têm poucos pontos fortes em comparação com os austeníticos. Sua tenacidade é um pouco limitada em baixas temperaturas[32].

### Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos têm uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). Esta estrutura é alcançada através do uso de elementos de austenitização, tais como níquel, manganês e nitrogênio. Estes aços são não-magnéticos, e podem ser endurecidos apenas por trabalho a frio. Eles geralmente possuem excelentes propriedades criogênicas e boas propriedades em altas temperaturas. O teor de cromo geralmente varia de 16 a 26%; de níquel, até cerca de 35%, e de manganês, até 15%. Os aços série 2xx contém nitrogênio, 4 a 15,5% de Mn, e até 7% de Ni. Os tipos 3xx contém maiores quantidades de níquel e até 2% de Mn. Cobre, molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio podem ser adicionados para conferir certas características tais como a resistência a pites ou resistência à oxidação. Enxofre ou selênio pode ser adicionado para melhorar a usinabilidade[32].

### Aços Inoxidáveis Duplex

Aços inoxidáveis duplex têm uma estrutura mista de ferrita CCC e austenita CFC. A quantidade exata de cada fase é uma função da composição e do tratamento térmico. A maioria das ligas são concebidas contendo quantidades iguais de cada fase no estado recozido. Os principais elementos de liga são cromo e níquel, mas nitrogênio, cobre, molibdênio, silício e tungsténio podem ser adicionados para controlar o equilíbrio estrutural e para conferir certas características de resistência à corrosão. A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex é como a dos aços inoxidáveis austeníticos, em ligas com teores semelhantes. No entanto, aços inoxidáveis duplex possuem maior resistência à tração e uma maior resistência a corrosão sobre tensão do que os austeníticos. A tenacidade dos aços inoxidáveis duplex é entre a dos austeníticos e dos aços inoxidáveis ferríticos[32].

**Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação**

Os aços inoxidáveis endurecídos por precipitação são ligas de cromo-níquel contendo precipitados como o cobre, titânio ou alumínio. Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação podem ser austeníticos ou martensíticos. Aqueles que são austeníticos, são freqüentemente transformáveis em martensiticos através de condicionamento a tratamentos térmicos, por vezes, com tratamentos abaixo de zero. Na maioria dos casos, estes aços inoxidáveis atingem alta resistência devido ao endurecimento por precipitação da estrutura martensítica[32].

### 3.2.1 Aço Inoxidável Austenítico AISI 304

O AISI 304 é o aço austenítico mais utilizado em aplicações populares, possuindo uma boa resistência à corrosão, soldabilidade e capacidade de conformação. Diversas aplicações desse aço podem ser citadas, na fabricação de objetos simples como talheres, panelas, pias e fogões e em aplicações mais complexas como o uso industrial. Muitas aplicações na indústria automobilística e aeronáutica podem ser apresentadas. Aplicações na construção civil, como elevadores e corrimão de escadas, nas indústrias alimentícias, química, farmacêutica e de cosméticos. É nítida a importância desse aço no dia a dia da atualidade.

### 3.2.2 Aço Inoxidável Austenítico AISI 316

O AISI 316 pode ser utilizado praticamente nas memas aplicações do aço AISI 304. A maior diferença são situações nas quais há altas temperaturas e teores elevados de cloretos. Nesse caso, o AISI 316 é mais aconselhado, pois a presença de molibidênio aumenta a resistência à corrosão causada por compostos clorados e pela poluição. Também por esse motivo o AISI 316 é mais aconselhado em atmosferas litorâneas.

### 3.2.3 Composição Química dos Aços AISI 304 e AISI 316

A composição padrão dos aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 304 está apresentada na Tabela 3.1. Na coluna composição, está especificado o valor padrão de Carbono, Manganês, Silício, Cromo, Níquel, Fósforo, Enxofre e Molibidênio, respectivamente[32].

Tabela 3.1: Composição padrão dos aços AISI 316 e AISI 304

| | Composição % | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Aço** | **C** | **Mn** | **Si** | **Cr** | **Ni** | **P** | **S** | **Mo** |
| **AISI 304** | 0.08 | 2.00 | 1.00 | 18.0 - 20.0 | 8.0 - 10.5 | 0.045 | 0.03 | - |
| **AISI 316** | 0.08 | 2.00 | 1.00 | 16.0 - 18.0 | 10.0 - 14.0 | 0.045 | 0.03 | 2.0 - 3.0 |

### 3.2.4 Efeitos da Composição

#### Cromo

O cromo é o elemento essencial para a formação do filme passivo. Outros elementos podem influenciar a eficácia do cromo na formação ou a manutenção desse filme, mas ele é o único elemento que pode, por si só, criar as propriedades do aço inoxidável. O filme começa a ser observado em cerca de 10,5% de Cr, mas é bastante fraco nesta composição e proporciona apenas uma leve atmosfera de proteção. Aumentando o teor de cromo para 17 a 20%, típico dos aços inoxidáveis austeníticos, ou para 26 a 29%, no caso dos aços inoxidáveis ferríticos, a estabilidade da película passiva aumenta consideravelmente. Todavia, uma maior quantidade de cromo pode afetar as propriedades mecânicas e a soldabilidade, principalmente em aplicações que envolvem certas exposições térmicas. Portanto, muitas vezes é mais eficaz melhorar a resistência à corrosão através da alteração das porcentagens de outros elementos[33].

#### Níquel

Níquel, em quantidades suficientes, estabiliza a estrutura austenítica, o que melhora muito as propriedades mecânicas. O níquel é particularmente útil em resistir à corrosão em ácidos minerais. Um aumento na quantidade de níquel para cerca de 8 a 10%, diminui a resistência à corrosão sob tensão (SCC), mas novos aumentos começam a restaurar essa resistência. Com cerca de 30% de Ni, a resistência à corrosão sob tensão é alcançada para a maioria dos ambientes industriais[33].

#### Manganês

Manganês em quantidades moderadas e em associação com adições de níquel realiza muitas das funções atribuídas ao níquel. No entanto, a substituição total de níquel por manganês não é utilizado. Aços com elevado teor de manganês têm algumas propriedades

mecânicas incomuns e úteis, tais como a resistência à gripagem. O manganês interage com o enxofre nos aços inoxidáveis para formar sulfetos de manganês. A morfologia e a composição desses sulfetos tem efeitos significativos na resistência à corrosão, especialmente na resistência à corrosão por pites[33].

#### Molibidênio

Molibdênio em combinação com cromo é muito eficaz em termos da estabilização do filme passivo na presença de cloretos. O molibdênio é especialmente efetivo no aumento da resistência à corrosão por pites[33].

#### Carbono

O carbono é útil na medida em que ele permite a têmpera por tratamento térmico, que é a base para aços martensíticos, e é também o que fornece a resistência nas aplicações dos aços inoxidáveis em altas temperaturas. Em todas as outras aplicações, o carbono é prejudicial para a resistência à corrosão devido à sua reação com cromo[33].

### 3.2.5 Corrosão em Aços Inoxidáveis Austeníticos

Embora um metal ou liga metálica seja resistente à corrosão em um ambiente particular, sua parte soldada nem sempre continua com essa resistência. No entanto, existem muitos casos em que a solda exibe uma resistência à corrosão superior à do metal de base[33].

Dificuldades no processamento tendem a limitar o aumento no teor de cromo, portanto, uma melhor resistência à corrosão geralmente é obtida pela adição de molibdênio, que é o caso do AISI 316. A austenita que compõe a fase desses aços é não-magnética, apresenta alta solubilidade de elementos de liga e boa conformabilidade. Estas propriedades desejáveis, combinadas com a facilidade de fabricação, fizeram os austeníticos, especialmente do tipo AISI 304, o aço inoxidável mais comum. Os efeitos prejudiciais do carbono e do nitrogênio na ferrita podem ser superados pela mudança da estrutura cristalina para austenita, uma estrutura cúbica de face centrada. Esta mudança é realizada por adição de estabilizadores da fase austenita, o mais comum é o níquel, mas também pode ser utilizado manganês e nitrogênio. Com a adição de nitrogênio é possível produzir aços inoxidáveis austeníticos com até 6% de Mo, melhorando a resistência à corrosão em ambientes com cloretos. Outras classes especiais incluem os aços com alto teor de

cromo para aplicações em altas temperaturas e os aços com elevado teor de níquel para ambientes de ácidos inorgânicos. Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser susceptíveis à corrosão intergranular devido à soldagem ou por uma exposição térmica a longo prazo. Estas exposições térmicas causam a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão e degradação do cromo adjacente a estes carbonetos. Os austeníticos do tipo AISI 304 e AISI 316, são especialmente susceptíveis à corrosão sob tensão em cloretos. Todos os aços inoxidáveis austeníticos apresentam algum grau de susceptibilidade à corrosão, mas vários com alto teor de níquel e molibdênio são satisfatórios no que diz respeito ao ataque corrosivo na maioria das aplicações de engenharia[33].

### 3.2.6 Soldagem de Aços Inoxidáveis

Uma das decisões mais importantes nos projetos de engenharia é a seleção do tipo apropriado de aço inoxidável para a aplicação desejada. No entanto, quando o projeto inclui a necessidade de soldagem, deve-se considerar a soldabilidade e o desempenho das soldas para seleção da liga adequada[9].

Os aços inoxidáveis austeníticos geralmente são considerados os aços inoxidáveis mais soldáveis. Por causa das suas propriedades físicas, o seu comportamento na soldagem pode ser consideravelmente diferente do que os dos aços ferríticos, martensíticos e aços inoxidáveis duplex[9].

A maior parte das pesquisas em soldagem a laser foi realizada em ligas ferrosas e muitos dos estudos paramétricos iniciais foram realizados em aços inoxidáveis[34] [35] [21]. Os aços inoxidáveis foram investigados[34] [36] devido à sua importância nas indústrias de alimentação de plantas e químicas.

A resistência à corrosão geralmente pode ser mantida após a soldagem através dos seguintes cuidados:

- Balanceamento da composição da liga para inibir certas reações de precipitação;
- Blindagem das superfícies do metal fundido dos gases reativos no ambiente de soldagem;
- Remoção de óxidos enriquecidos de cromo e esgotamento do metal base a partir de superfícies termicamente protegidas;
- Escolha dos parâmetros de soldagem adequados[37].

Durante o processo de soldagem, podem ocorrer alterações importantes que afetam de forma significativa o comportamento da corrosão na solda. A técnica empregada, obviamente, desempenha um papel importante[38].

Considerações metalúrgicas são muitas vezes responsáveis para a seleção do processo de soldagem a laser (LBW). A característica de baixa energia específica de entrada para este processo resulta em uma maior taxa de resfriamento. Altas taxas de resfriamento também ajudam a evitar problemas durante a soldagem de aços inoxidáveis[9].

**Problemas de Soldagem**

A utilização de gases de proteção também tem pontos negativos, pois o gás sendo utilizado na solda a laser para proteger a fusão do material de oxidação pode causar defeitos de soldagem, tais como porosidade e trincas. O principal motivo da porosidade na solda é o surgimento de bolhas de gás no material fundido que não puderam escapar antes que a solidificação aconteça[27].

Pequenas adições de oxigênio e nitrogênio são benéficas e afetam as características das fases líquidas. No entanto, concentrações elevadas destes elementos podem promover a porosidade[9].

Porosidade é o defeito mais comum nas soldagens feitas por diferentes métodos de fusão. O processo de formação de poros deve ser subdividido em três fases:

- Formação de um núcleo estável;
- Crescimento de uma bolha de gás;
- Escapamento das bolhas de gás da poça de fusão[39].

Os problemas de corrosão normalmente associados com a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos estão relacionados com efeitos de precipitação e de segregação química. Estes problemas podem ser eliminados ou minimizados através do controle da metalurgia do metal base e do controle dos parâmetros de soldagem[37].

Em relação às trincas de solidificação, foram apontados quatro fatores principais com forte influência sobre a formação destas: composição do aço, velocidade de soldagem, espessura da chapa e forma da solda. E em relação à composição, um efeito negativo surge quando existem impurezas de elementos como o enxofre e o fósforo. E efeitos positivos aparecem com destaque maior para o manganês[40].

# Capítulo 4
# Materiais e Métodos

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental realizado e a metodologia utilizada, englobando desde a seleção dos materiais até o seu processamento.

## 4.1 Material Utilizado

Para os ensaios realizados, utilizou-se chapas recozidas dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316. A chapa do aço AISI 316 tem espessura de aproximadamente 1mm e a chapa do aço AISI 304 aproximadamente 1,2mm. As Figuras 4.1 e 4.2 foram feitas a partir do material base no qual foram realizados os ensaios de soldagem. As imagens foram adquiridas com ampliação de 400x.

Essas chapas foram posteriormente cortadas para melhor adequação aos ensaios a serem realizados.

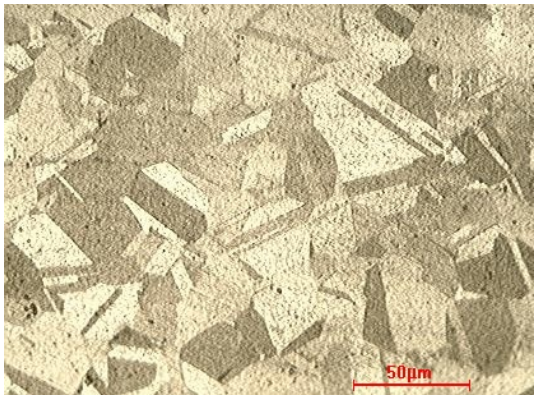


Figura 4.1: Micrografia do metal base do aço inoxidável austenítico AISI 304

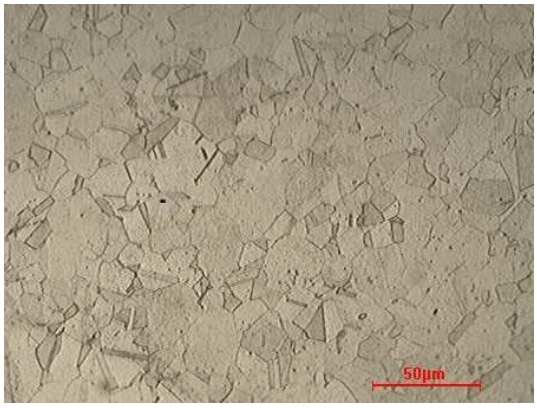


Figura 4.2: Micrografia do metal base do aço inoxidável austenítico AISI 316

## 4.2 Estação de Trabalho do Laser a Fibra

A estação de trabalho opera com o laser a fibra utilizado neste trabalho e está instalada no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO), do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA). O laser é produzido numa fibra óptica de vidro dopada com Itérbio, com comprimento de onda de 1080nm. Trata-se de um laser de 2kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000)[41] dotado de uma fibra de saída com 50$\mu$m de diâmetro e 5m de extensão. A amplificação acontece entre duas paredes de Bragg e o bombeio é realizado por meio de um conjunto de diodos. A emissão ocorre em um comprimento de onda de aproximadamente 1080nm com polarização aleatória do feixe [42]. Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra com 100$\mu$m de diâmetro e 10m de comprimento que foi utilizada nos processos de soldagem. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe. O comprimento focal da lente de focalização é 160mm. Um esquema simplificado desta estação de processamento é mostrado na Figura 4.3.

Para os ensaios de soldagem utilizou-se uma mesa CNC de processo, controlada por computador e acionada por motores de passo, com velocidade controlada entre 1mm/s até 160mm/s e cursos dos eixos X de 430mm e Y de 508mm, ambos com resolução de 5$\mu$m. Um eixo Z-vertical com curso de 215mm e resolução de 1$\mu$m foi incorporado à mesa para o controle da distância focal. O sistema de gases de processo comporta quatro tipos diferentes de gases: nitrogênio, oxigênio, argônio e hélio. No presente trabalho, os gases utilizados foram nitrogênio e argônio, o primeiro para proteger a óptica e o segundo para reduzir a oxidação durante o tratamento da peça.

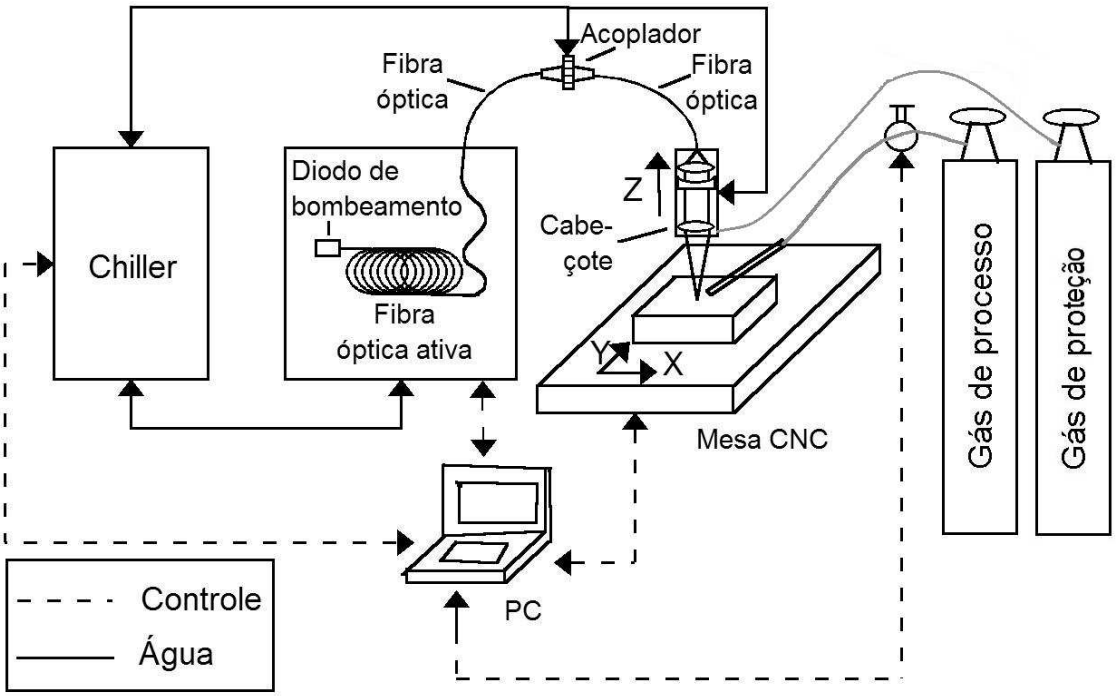


Figura 4.3: Diagrama da estação de processamento de materiais com laser a fibra

## 4.3 Procedimento Experimental

### 4.3.1 Preparação das Chapas

A chapa do aço AISI 316, de 1,0mm de espessura, foi cortada em quatro chapas de 40mm x 100mm e quatro de 100mm x 160mm. Já a chapa do aço AISI 304, de 1,2mm de espessura, foi cortada em três chapas de 30mm x 140mm e uma de 30mm x 80mm. Todas as chapas tiveram suas bordas passadas no esmeril, para remoção de possíveis partes cortantes.

Essas chapas foram lixadas com lixa número 600, lavadas com água e detergente, em seguida, com etanol, e secas com sopro de nitrogênio. Esse procedimento foi feito simplesmente para retirar os defeitos mais grosseiros e para padronização das superfícies para os experimentos de soldagem.

Os procedimentos usados para preparar os aços inoxidáveis para análise macroscópica e microscópica são semelhantes aos utilizados para aços comuns, entretanto, alguns tipos exigem uma atenção mais cuidadosa para evitar problemas nas análises posteriores.[43]

### 4.3.2 Programação da Mesa XY

O porta amostras é montado em uma mesa CNC com dois eixos (XY) acoplados em dois servo motores controlados por computador. A programação da mesa é feita através do software livre EMC2 [44], instalado em um computador com sistema operacional Linux.

Além de controlar a movimentação da mesa XY, o software também faz o controle Liga/Desliga do laser e dos gases utilizados no processo. O programa é escrito em uma linguagem interna com códigos padronizados. Alguns dos comandos utilizados foram:

- m3 - Liga o Laser
- m5 - Desliga o Laser
- m8 - Liga o fluxo de Argônio
- m9 - Desliga o fluxo de Argônio
- g01 x0 y0 z0 f3000 - Movimentar o porta amostras para a posição X=0, Y=0 e Z=0 com velocidade de 3000mm/min (50mm/s)

As soldas foram feitas com o feixe do laser parado, o que movimenta é o porta-amostras fixado na mesa CNC.

### 4.3.3 Calibração da Distância Focal

A calibração já foi padronizada no laboratório utilizando-se placas de alumínio anodizado preto, nas quais foram feitas marcações com o laser para o ajuste da distância focal.

Essa calibração consistiu em: dada a posição do sistema X=0, Y=0 e Z=0, levar o porta amostra para a posição X=0, Y=10 e elevar o laser para Z=10. Em seguida, ligar o feixe do laser com uma potência de aproximadamente 12W e movimentá-lo para baixo, até Z=-10, e ao mesmo tempo ir deslocando o eixo Y até Y=-10. A Figura 4.4 representa essa movimentação. Basicamente o laser movimenta descendo na diagonal, de modo que durante esse percurso ele passe pelo foco fazendo uma marca na chapa de alumínio anodizado. Essa marca, de aproximadamente 5mm, mostra onde está o foco, pois quando o laser passa por ele, descendo pelo eixo, a marca fica mais intensa e fina. Para saber o quanto o laser está distante do foco, é feita uma conta simples utilizando-se

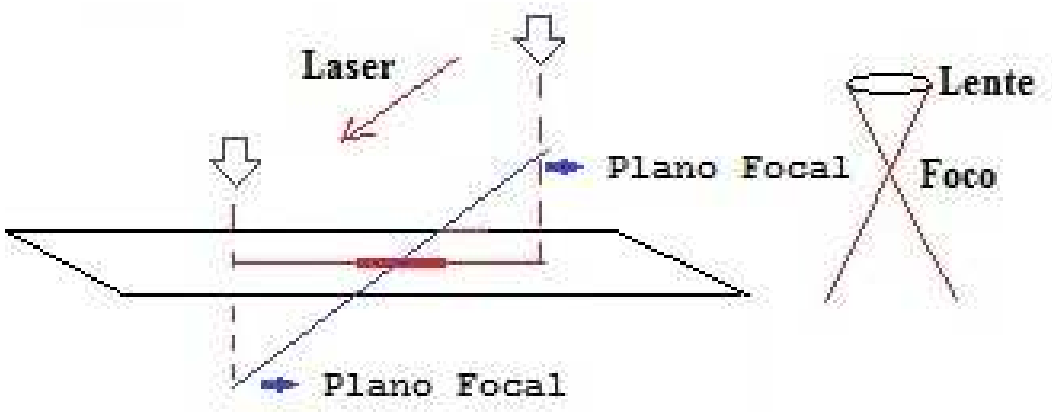


Figura 4.4: Esboço da movimentação do laser para o ajuste focal

3 marcas horizontais, que são feitas uma abaixo da outra, distantes 1mm, marcando o ponto inicial X=0, Y=0 e Z=0.

Os resultados dessas marcações feitas utilizando-se o laser com 12W de potência foram:

1. O foco ficou deslocado cerca de 4mm para cima
2. Não foi possível medir a marcação (a potência do laser foi reduzida em 10%, na tentativa de melhorar a qualidade da marcação)
3. O foco ficou deslocado somente 1mm para cima
4. Distância focal correta

A placa com essas marcações, utilizada durante a calibração, está mostrada na Figura 4.5.

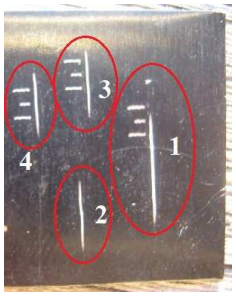


Figura 4.5: Placa de alumínio anodizado utilizada para o ajuste focal do laser

Após essa calibração foi descontada a espessura da chapa de alumínio anodizado de 0,5mm. O programa seguinte foi utilizado para a calibração da distância focal.

- g01 x0 y0 z0 f3000 //go to X=0, Y=0 e Z=0 com velocidade 3000 mm/min = 50mm/s
- m5 //garantir que o laser esteja desligado
- m8 //liga o argônio
- g01 x0 y10 z10 f3000 //movimenta o laser nessa velocidade, 3000 mm/min
- m3 //liga o laser
- g01 x0 y-10 z-10 f2400 //movimenta o laser nessa velocidade, 2400 mm/min
- m5 //desliga o laser
- m9 //desliga o argônio
- //Após isso, fazer as 3 marcas horizontais para confirmar o ponto X=0, Y=0 e Z=0

Existe também um outro motor de passo, controlado manualmente, que é utilizado para ajustar o ângulo de inclinação do feixe. Nestes ensaios, o ângulo foi ajustado para cinco graus perpendicularmente à direção de soldagem. Quando a soldagem é feita em materiais com alta refletividade, como no caso presente, aconselha-se inclinar a amostra em cinco graus, para evitar reflexões na cavidade óptica que podem causar danos à cavidade do laser[45].

### 4.3.4 Configuração dos Parâmetros Operacionais

Hoje em dia, é dada uma grande atenção aos aspectos relativos à redução dos custos operacionais, em todas as áreas. Isso leva ao investimento em pesquisas para otimização dos processos, com objetivo de se atingir o melhor resultado para aquele determinado processo.

Como a qualidade de uma solda é determinada por inúmeros parâmetros operacionais, que influenciam das maneiras mais variadas os resultados do processo, é muito importante que se saiba exatamente como trabalhar com cada um desses parâmetros. Alguns desses parâmetros são: a potência do laser, a velocidade da soldagem, a vazão de gases, o tipo de gás, o diâmetro do ponto focal, o ângulo da soldagem, entre vários outros, cada um determinando um aspecto da solda efetuada.

Para determinar a influência de cada parâmetro no resultado final da solda, devem ser realizados vários experimentos com diferentes configurações e, analisando os resultados obtidos, quantificar suas influências.

Como são muitos parâmetros, não é possível determinar um efeito específico de algum parâmetro em um grupo de soldas variando, ao mesmo tempo, todos os parâmetros citados acima. Por isso, é necessário fazer a escolha de um ou outro parâmetro para caracterizar as suas influências em cada grupo de experimentos.

Para os ensaios deste trabalho, os parâmetros variáveis foram a potência do laser e a velocidade da soldagem. Os outros parâmetros, como a vazão de argônio e a distância focal, foram fixados. Essa escolha foi feita com base em experimentos anteriores e experiência do grupo.

O sopro de argônio é direcionado por um bico de saída do gás (3mm de diâmetro), direto para a linha de solda. Nestes ensaios, a vazão de argônio foi selecionada para 5l/min, soprando por um bico de 3mm de diâmetro. Também foi necessário utilizar um sopro laminar de nitrogênio paralelo ao plano das lentes, para proteção destas. Todos os parâmetros de ajuste do laser são controlados por um computador, inclusive, é onde a potência é escolhida. Nesse computador também é mostrado qualquer tipo de erro existente e, nesse caso, a opção de ligar o laser é desativada automaticamente por medida de segurança. A potência do laser pode variar até o máximo de 2kW.

A velocidade do processo de soldagem deve ser programada no software EMC2 e pode variar de acordo com os limites de velocidade da mesa CNC.

### 4.3.5 Experimentos de Soldagem do AISI 316

Para o primeiro experimento de soldagem foi utilizada uma das quatro chapas de 40mm x 100mm, no qual foram feitos onze cordões de solda em várias potências e em três diferentes velocidades. Os onze cordões de solda foram feitos na direção paralela ao lado de 40mm da chapa, e foram espaçadas por aproximadamente 5mm.

Essas soldas foram realizadas “em cheio” na chapa, o que quer dizer que o feixe do laser simplesmente atravessou uma chapa, e não que foram duas chapas ligadas por meio de uma solda. Isso pode ser feito, pois normalmente não há material de enchimento em soldagem a laser. E o efeito de ligar duas chapas de mesmo material, ou simplesmente atravessar uma chapa com o laser, é semelhante, pois a região soldada é totalmente fundida e solidificada.

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros selecionados para cada cordão de solda, numerados de um a onze. Nesta tabela, estão indicados os principais valores utilizados nas configurações experimentais. Da esquerda para a direita estão o número de identificação do cordão, a potência e a velocidade adotada. Os valores de Intensidade ou Densidade de Potência (DP) são calculados levando-se em conta a relação entre a potência disponibilizada (P) e a área do feixe laser (s) no contato com a superfície (Equação 4.1). A coluna da direita na tabela contém o valor do Aporte Térmico (AT) daquela configuração utilizada, calculado através da Equação 4.2.

Tabela 4.1: Aço AISI 316: potências e velocidades

| **Solda** | **Pot.** $(W)$ | **Vel.** $(mm/s)$ | **DP** $(kW/mm^2)$ | **Aporte Térmico** $(J/mm)$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1000 | 150 | 127,4 | 6,7 |
| 2 | 800 | 150 | 101,9 | 5,3 |
| 3 | 600 | 150 | 76,4 | 4,0 |
| 4 | 400 | 150 | 51,0 | 2,7 |
| 5 • | 500 | 150 | 63,7 | 3,3 |
| 6 | 500 | 100 | 63,7 | 5,0 |
| 7 • | 400 | 100 | 51,0 | 4,0 |
| 8 | 300 | 100 | 38,2 | 3,0 |
| 9 | 400 | 50 | 51,0 | 8,0 |
| 10 • | 300 | 50 | 38,2 | 6,0 |
| 11 | 200 | 50 | 25,5 | 4,0 |

Os cordões número 5, 7 e 10 foram os que apresentaram melhor resultado visual para as velocidades de 150mm/s, 100mm/s e 50mm/s, respectivamente.

$$DP = \frac{P(W)}{s(mm^2)} = \frac{W}{mm^2} \tag{4.1}$$

$$AT = \frac{P(W)}{V(mm/s)} = \frac{J/s}{mm/s} = \frac{J}{mm} \tag{4.2}$$

A densidade de potência de radiação na superfície do material pode ser controlada pela alteração da distância focal, desfocando o feixe do laser e fazendo variar a área atingida pelo feixe. A densidade de potência no local aquecido diminui com a desfocalização e, consequentemente, o tamanho da zona fundida é alterado[29]. O diâmetro do feixe laser utilizado em todos os experimentos deste trabalho foi $d_{min} = 0,1mm = 100\mu m$, calculado pelo grupo em experimentos anteriores.

A Figura 4.6 mostra a chapa resultante desse primeiro experimento de soldagem, após ser cortada de acordo com a velocidade da soldagem. As soldas foram feitas da esquerda para a direita, com a numeração de 1 a 11.

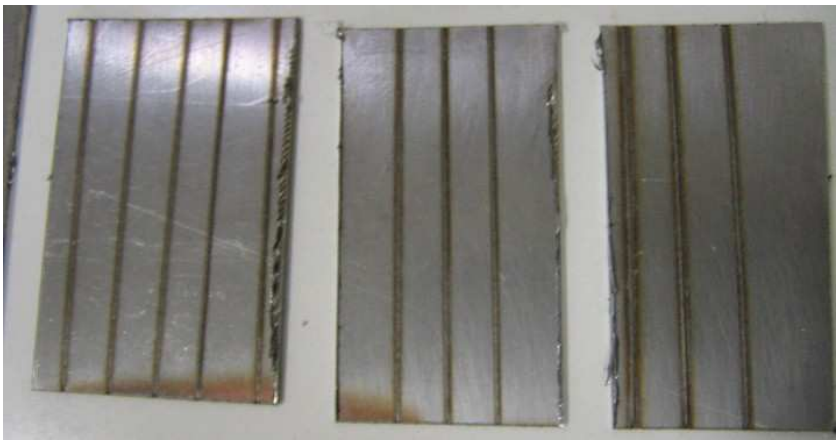

Figura 4.6: Chapa com cordões de solda feitos com diferentes parâmetros, resultantes do primeiro experimento

O segundo experimento de soldagem foi realizado em três chapas de 40mm x 100mm, cada uma contendo apenas um cordão de solda de 100mm de comprimento, no centro da chapa. Este ensaio foi executado para gerar amostras para posteriores análises de microdureza e microscopia, ensaios de susceptibilidade à corrosão e outros estudos de metalografia.

Os parâmetros selecionados para esse experimento foram as melhores condições de potência em cada uma das três velocidades, encontradas no primeiro experimento. A Tabela 4.2 mostra esses valores de potência e velocidade.

Tabela 4.2: Aço AISI 316, chapas pequenas

| **Solda** | **Pot.** ($W$) | **Vel.** ($mm/s$) | **DP** ($kW/mm^2$) | **Aporte Térmico** ($J/mm$) |
|---|---|---|---|---|
| P5 | 500 | 150 | 63,7 | 3,3 |
| P7 | 400 | 100 | 51,0 | 4,0 |
| P10 | 300 | 50 | 31,2 | 6,0 |

Neste experimento, também foram realizadas soldas nas outras três chapas de 100mm x 160mm, com um cordão de solda central de 100mm em cada chapa.

Os parâmetros também foram os mesmos das placas pequenas, e estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Aço AISI 316, chapas grandes

| **Solda** | **Pot.** ($W$) | **Vel.** ($mm/s$) | **DP** ($kW/mm^2$) | **Aporte Térmico** ($J/mm$) |
|---|---|---|---|---|
| G5 | 500 | 150 | 63,7 | 3,3 |
| G7 | 400 | 100 | 51,0 | 4,0 |
| G10 | 300 | 50 | 31,2 | 6,0 |

### 4.3.6 Experimentos de Soldagem do AISI 304

Neste experimento de soldagem foi utilizada a chapa do aço AISI 304 de 30mm x 80mm, no qual foram realizadas doze soldagens "em cheio", em várias potências nas três velocidades convencionadas. Os doze cordões de solda foram feitos na direção paralela ao lado de 30mm da chapa e foram espaçadas por aproximadamente 5mm.

A Tabela 4.4 contém os parâmetros utilizados para cada cordão de solda, numerados de um a doze.

Tabela 4.4: Aço AISI 304: potências e velocidades

| **Solda** | **Pot.** ($W$) | **Vel.** ($mm/s$) | **DP** ($kW/mm^2$) | **Aporte Térmico** ($J/mm$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 500 | 150 | 63,7 | 3,3 |
| 2• | 600 | 150 | 76,4 | 4,0 |
| 3 | 700 | 150 | 89,2 | 4,7 |
| 4 | 400 | 100 | 51,0 | 4,0 |
| 5• | 500 | 100 | 63,7 | 5,0 |
| 6 | 600 | 100 | 76,4 | 6,0 |
| 7 | 300 | 50 | 38,2 | 6,0 |
| 8• | 400 | 50 | 51,0 | 8,0 |
| 9 | 500 | 50 | 63,7 | 10,0 |
| 10 | 350 | 50 | 44,6 | 7,0 |
| 11 | 450 | 100 | 57,3 | 4,5 |
| 12 | 550 | 150 | 70,1 | 3,7 |

Os cordões número 2, 5 e 8 deste experimento foram os que apresentaram melhor resultado visual para as velocidades de 150mm/s, 100mm/s e 50mm/s, respectivamente.

No último experimento realizado, o objetivo também foi gerar amostras para as análises metalográficas. Foram utilizadas as três chapas de 30mm x 140mm, sendo que, em cada chapa, foi feito um cordão de solda central de 140mm de comprimento.

Os parâmetros utilizados nesse experimento foram as melhores condições de potência em cada uma das três velocidades encontradas no terceiro experimento. Os valores de potência e velocidade estão mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Aço AISI 304, chapas pequenas

| **Solda** | **Pot.** ($W$) | **Vel.** ($mm/s$) | **DP** ($kW/mm^2$) | **Aporte Térmico** ($J/mm$) |
|---|---|---|---|---|
| A2 | 600 | 150 | 76,4 | 4,0 |
| A5 | 500 | 100 | 63,7 | 5,0 |
| A8 | 400 | 50 | 51,0 | 8,0 |

Durante os experimentos é necessário o uso de um óculos especial para proteção contra a radiação retroespalhada do feixe laser dentro da sala.

### 4.3.7 Embutimento

Os corpos de prova do primeiro e do terceiro ensaios, aços AISI 316 e AISI 304 respectivamente, foram cortados em várias partes segundo a velocidade de soldagem. Os cortes foram feitos em uma máquina de corte com precisão da IMPTECH (PC 10), com um disco diamantado, em baixa rotação e refrigerado com água e óleo, para evitar modificações microestruturais ocasionadas pelo corte.

Operações como corte devem ser executadas cuidadosamente para minimizar a deformação, pois os aços inoxidáveis austeníticos são facilmente sujeitos ao endurecimento[43].

Em seguida, foi feito o embutimento da chapa do aço AISI 316, no laboratório de ensaios metalográficos do IEAv. Para esse embutimento foi utilizada uma máquina de embutimento modelo PRE-30 (distribuidora AROTEC) e baquelite, que foi aquecido por dez minutos para sinterização, com pressão controlada manualmente por uma alavanca, mantendo-se entre 100 e 150kgf/cm$^2$. Após o aquecimento com pressão controlada, o embutimento foi resfriado também por dez minutos com circulação contínua de água.

O embutimento dos corpos de prova do aço AISI 304 foi feito com resina, no laboratório de análises metalográficas do DEMET-EM-UFOP.

A Figura 4.7 é uma foto das amostras embutidas, AISI 316 em baquelite na esquerda e na direita o AISI 304 com resina.

A Figura 4.8 mostra o posicionamento dos cordões de solda no interior do embuti-

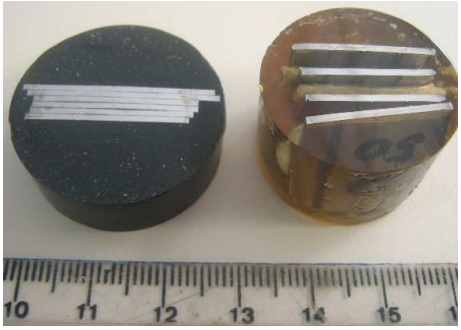

Figura 4.7: Amostras soldadas e embutidas em baquelite e resina, AISI 316 e AISI 304 respectivamente

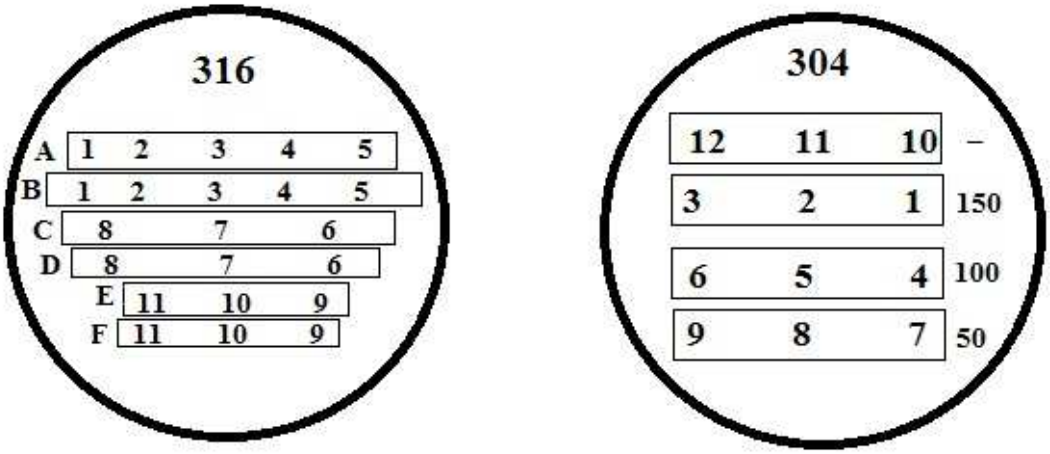


Figura 4.8: Esquema do posicionamento dos cordões de solda no interior dos embutimentos, AISI 316 e AISI 304

mento, de cada solda efetuada nos aços AISI 316 e AISI 304, respectivamente.

O embutimento da esquerda representa o esquema das chapas de aço AISI 316 soldadas, e pode-se observar que as chapas ficaram juntas, umas das outras. Isso gerou muitas dificuldades após o polimento, pois ficava umidade nas pequenas frestas entre as chapas que acabava sendo espalhada, manchando parte da amostra e, com isso, impossibilitando a microscopia óptica. Para resolver esse problema foi feita uma fina camada de resina sobre este embutimento, preenchendo as frestas entre as chapas.

### 4.3.8 Lixamento e Polimento

Para a análise metalográfica, foi necessário fazer o lixamento e polimentos dos corpos de prova embutidos. Utilizou-se uma lixadeira circular com jato d'água contínuo.

Foram utilizadas as seguintes lixas, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200, invertendo a direção de lixamento de uma lixa para a outra, sendo que a primeira foi na direção paralela à

chapa.

Para o polimento, foi utilizado um pano circular da AROTEC modelo SUPER, molhado com alumina 1$\mu$m. Em seguida, foi feito um segundo polimento com pasta de diamante também 1$\mu$m, para acabamento final.

### 4.3.9 Ataque Químico

O ataque químico é necessário para revelar a microestrutura e o próprio cordão de solda, para posterior visualização nas micrografias. Estes procedimentos foram realizados nos Laboratórios de Metalografia e Tratamentos Térmicos da EM-UFOP.

Para o ataque químico, foi feita uma solução com os componentes seguintes:

- 10ml de ácido Nítrico
- 10ml de ácido Acético
- 15ml de ácido Hidroclorídrico
- 5ml de Glicerina

Os corpos de prova embutidos foram imersos nessa mistura para serem atacados. Observou-se uma diferença no tempo de ataque na região do cordão de solda e no material não afetado pela solda. Na região soldada, o ataque ocorreu entre 15s e 30s. Já na região não afetada pela solda, o ataque ocorreu em 1min e 30s.

### 4.3.10 Corrosão Eletrolítica

O procedimento experimental foi realizado utilizando-se uma máquina de polimento e ataque eletrolítico modelo LECTROPOL, fabricante STRUERS.

Decidiu-se por utilizar o polimento seguido de ataque eletrolítico a fim de facilitar a visualização da susceptibilidade à corrosão sem a necessidade de recorrer às técnicas convencionais de ensaios de corrosão.

O equipamento LECTROPOL é subdividido em três partes (Figura 4.9):

- A. Unidade de operação
- B. Mesa de polimento

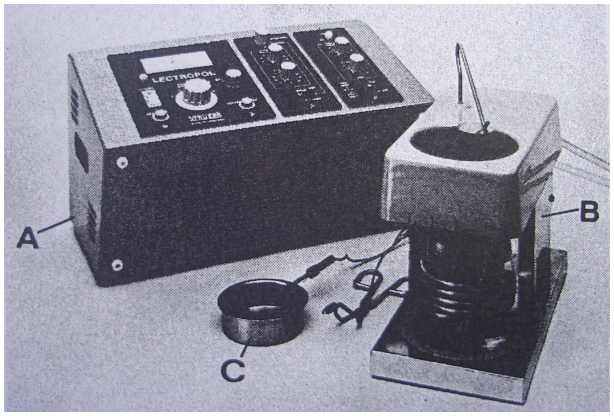


Figura 4.9: Partes do equipamento de polimento eletrolítico - LECTROPOL

- C. Suporte para amostra e do eletrólito

A unidade de operação é onde é feito todo o controle do processo de polimento e ataque eletrolítico. Os parâmetros podem ser alterados nas chaves de seleção, indicadas na Figura 4.10.

- a. Amperímetro e voltímetro
- b. Chave liga/desliga
- c. Lâmpada do liga/desliga
- d. Seleção de ajuste de voltagem
- e. Chave de seleção para polimento externo
- f. Lâmpada da seleção para polimento externo
- g. Botão de seleção da faixa do voltímetro
- h. Botão para leitura da voltagem
- k. Seleção manual/automático
- l. Ajuste fino da voltagem de polimento
- m. Ajuste da voltagem de ataque
- n. Chave de seleção para tempo de polimento manual
- p1. Lâmpada indicando polimento

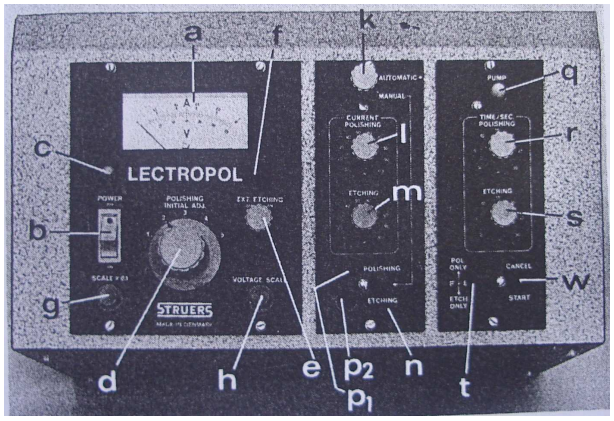


Figura 4.10: Componentes da unidade de operação - LECTROPOL

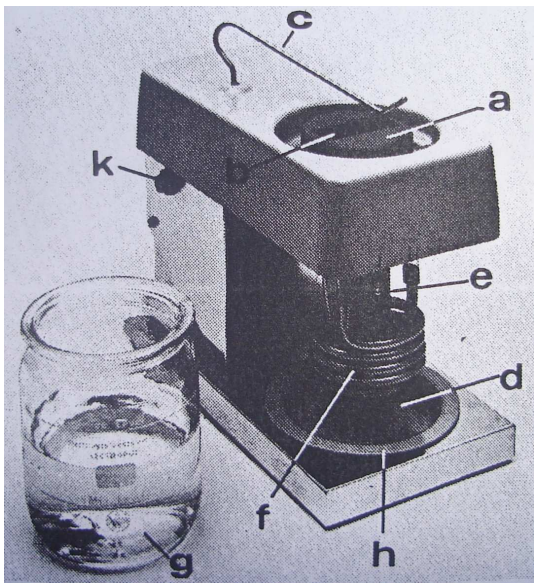


Figura 4.11: Componentes da mesa de polimento - LECTROPOL

- p2. Lâmpada indicando ataque
- q. Lâmpada do bombeamento ligado
- r. Seleção do tempo de polimento (até 30 segundos)
- s. Seleção do tempo de ataque (até 30 segundos)
- t. Chave de seleção entre polimento, ataque ou polimento + ataque
- w. Chave de início do processo, pode ser utilizada para cancelar

Na Figura 4.11 está mostrada a mesa de polimento, com suas partes principais apontadas.

Descrição das partes da mesa de polimento:

- a. Câmara de cerâmica para o cátodo
- b. Chapa de aço inoxidável à prova de ácido
- c. Braçadeira do ânodo, ajustável horizontalmente e verticalmente para segurar a amostra
- d. Bomba de circulação
- e. Válvula de ajuste da vazão de bombeamento
- f. Serpentina de resfriamento
- g. Vidro contendo o eletrólito
- h. Base para o vidro
- k. Botão de segurança para parar a operação

Após ensaios preliminares, avaliando superficialmente os possíveis parâmetros a serem utilizados, foram realizados dois ensaios idênticos, para efeito de estatística, mostrados na Tabela 4.6. Esses ensaios foram realizados no metal base de ambos os aços, e somente após a definição dos melhores parâmetros, realizou-se os ensaios nos cordões de solda.

Tabela 4.6: Ensaios definindo os melhores parâmetros do polimento e ataque eletrolítico

| | **Polimento** | | **Ataque** | | **Polimento + Ataque** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **AISI 304** | **AISI 316** | **AISI 304** | **AISI 316** | **AISI 304** | **AISI 316** |
| 10 Segundos | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A |
| 20 Segundos | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A |
| 30 Segundos | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A | 3, 6 e 9A |

Os ensaios de polimento e ataque eletrolítico foram realizados nas chapas soldadas dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316. Foram realizados três ensaios ao longo do cordão de solda, sobre a superfície superior de cada placa soldada. Os ensaios foram feitos centralizando-se o eixo do cordão de solda sobre uma máscara de proteção com abertura circular de 0,5$cm^2$, que é a região onde ocorre a reação eletrolítica, como mostra a Figura 4.12. Nestes ensaios utilizou-se a face da chapa e não sua seção transversal como no ataque químico, pois é a superfície da chapa que sofre influência e está em contato com o ambiente.

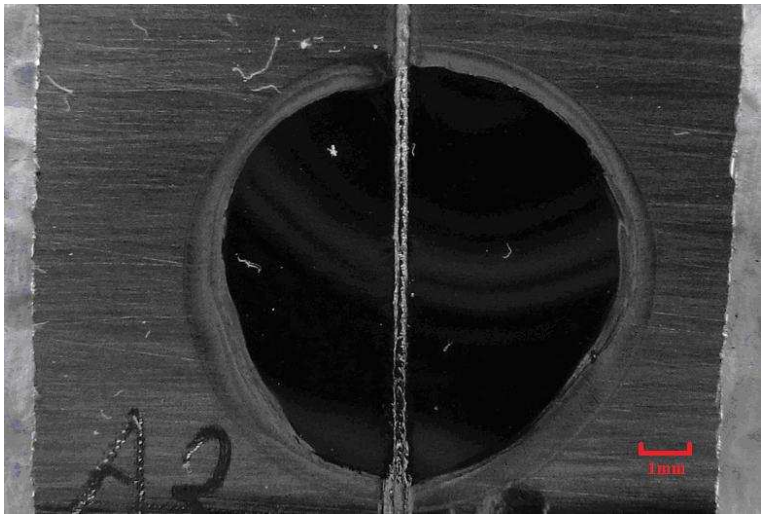


Figura 4.12: Região circular atacada eletroliticamente, cordão de solda centralizado

### Reativo Utilizado

Para o polimento e ataque eletrolítico, utilizou-se o Reativo A2, conforme orientações do Manual do Equipamento[46] LECTROPOL (STRUERS), em que este é citado para utilização em Aços Inoxidáveis.

Composicao do Reativo:

- 78ml de Ácido Perclórico
- 120ml de Água Destilada
- 700ml de Etanol
- 100ml de Butilcellosolve

### Parâmetros Utilizados

Após os ensaios preliminares e os mostrados na Tabela 4.6, buscando as melhores condições de tempo e corrente para o ataque eletrolítico, determinou-se as seguintes condições por meio de análise visual na microscopia óptica:

- Tempo = 10s de Polimento Eletrolítico
- Tempo = 10s de Ataque Eletrolítico
- Corrente = 9A

Para padronização dos resultados, adotou-se a mesma condição de tempo e corrente para ambos os aços AISI 304 e AISI 316.

**Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As amostras submetidas aos ensaios de corrosão eletrolítica foram levadas ao MEV, e posteriormente utilizou-se as imagens adquiridas para a análise da susceptibilidade à corrosão, através de técnicas de tratamentos de imagem.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram o cordão de solda e sua região próxima do AISI 316, ambos atacados eletroliticamente.

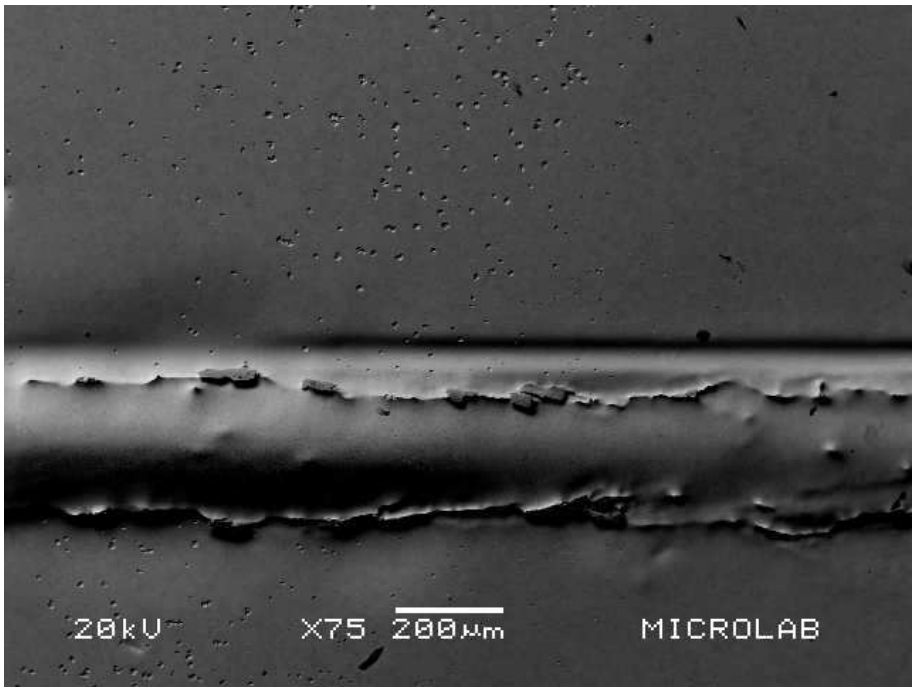


Figura 4.13: Cordão de solda no AISI 316 submetido à corrosão eletrolítica - MEV

A Figura 4.15 mostra o mesmo procedimento anterior, mas para o AISI 304.

O Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado está localizado no laboratório Microlab - Escola de Minas, no prédio do DEGEO-EM-UFOP.

### 4.3.11 Análise da Susceptibilidade à Corrosão por Tratamento de Imagem

As amostras soldadas e submetidas à corrosão eletrolítica foram levadas ao MEV para aquisição das imagens com uma boa resolução para as análises. O tratamento de imagem foi feito através do reconhecimento e identificação de pites, de maneira automática no

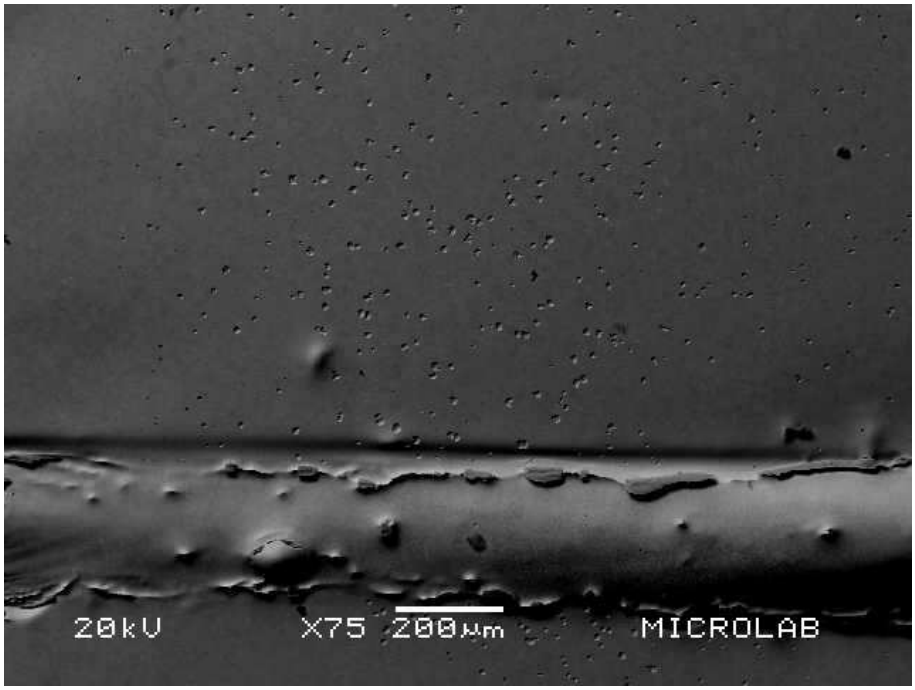


Figura 4.14: Cordão de solda no AISI 316 submetido à corrosão eletrolítica - MEV

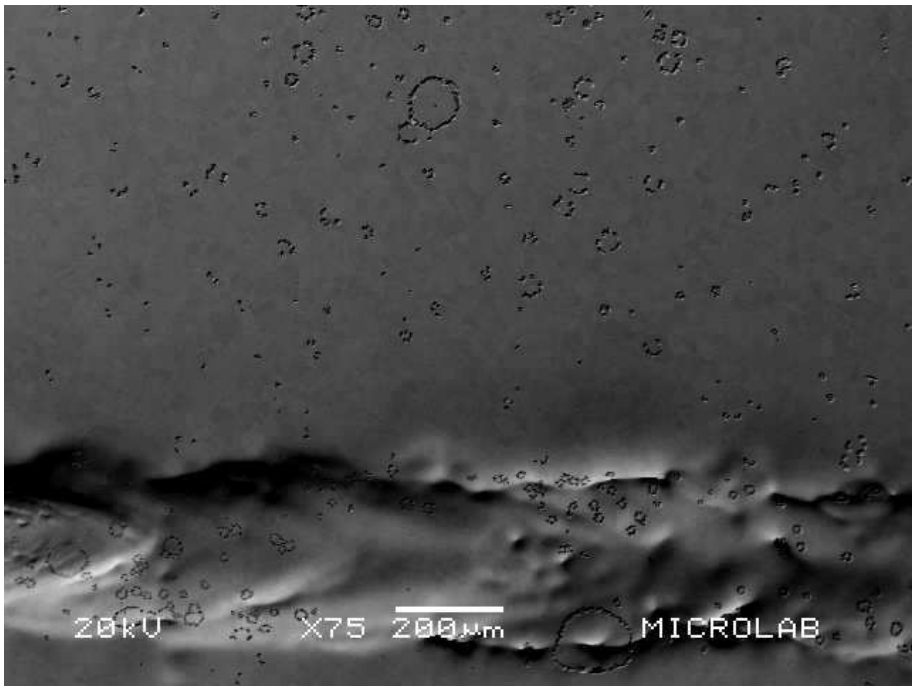


Figura 4.15: Cordão de solda no AISI 304 submetido à corrosão eletrolítica - MEV

software, por motivo de padronização e confiabilidade dos resultados. O mesmo tratamento foi utilizado para todas as amostras após os ensaios de corrosão eletrolítica dos aços AISI 304 e AISI 316, à esquerda e direita da Figura 4.16, respectivamente.

As imagens foram tratadas utilizando o software de domínio público ImageJ 1.44c[47], no sistema operacional UBUNTU 10.10 (maverick), Kernel Linux 2.6.35-32-generic, GNOME 2.32.0.

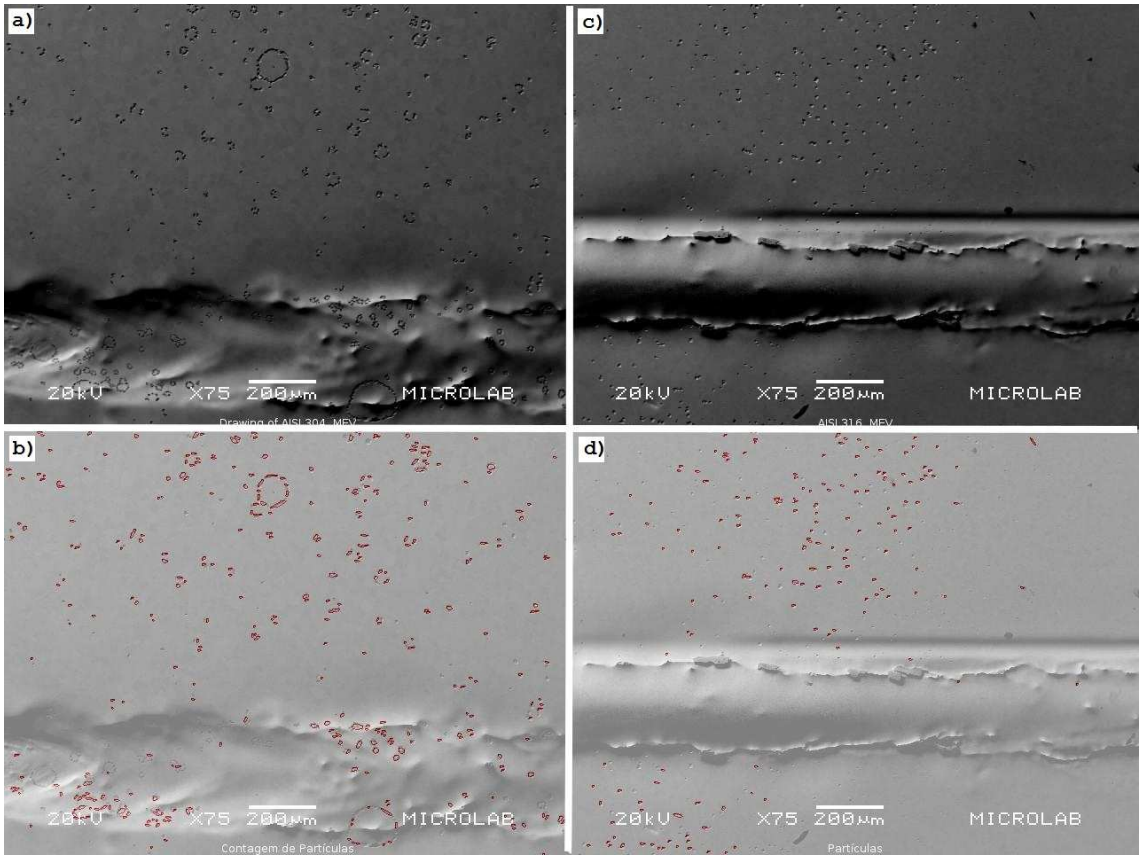


Figura 4.16: Reconhecimento e identificação de pites nas amostras após os ensaios de corrosão eletrolítica dos aços AISI 304 (esquerda) e AISI 316 (direita)

Foram executados os seguintes passos para o tratamento adequado das imagens obtidas no MEV.

1. *Subtract Background* - 1px. Removendo o fundo da Imagem.

2. Recortar manualmente o rodapé das imagens, retirando os dados do MEV

3. *Make Binary* ou *Threshold* (Para calcular a densidade de vazios no Histograma)

4. *Analyse Particles*: Dados (*Size* 5 - inf; 0,1 - 1,0; Elipses)

5. Colorir as Elipses: *Type* = RGB => *Adjust Color Balance* (*Red* = Max depois *All* = Min)

6. *Stacks: Image to Stack* => Z *Project* (*Average Intensity*). OBS: é necessário duas ou mais imagens abertas

7. *Stacks* => *Make Montage*

8. Se for necessário separar partículas agrupadas em um conjunto, usar *Watershed* após o *Threshold*

9. *Analyze* => *Set. Scales* => 200$\mu m$ = 77 Pixels

# Capítulo 5
# Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados das análises metalográficas incluindo aqueles dos ensaios de microdureza Vickers. Discutiu-se os resultados obtidos nessas análises.

## 5.1 Análise por Microscopia Óptica (MO)

### 5.1.1 Análise da Seção Transversal do AISI 316

Foram feitas microscopias ópticas da seção transversal de todos os cordões de solda realizados no primeiro experimento. As imagens mostradas nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são referentes às soldagens descritas na Tabela 4.1.

Na Figura 5.1, as imagens mostram todas as soldas feitas na velocidade de 150mm/s. A imagem superior-esquerda mostra a solda número 1, feita com o laser na potência de 1000W. Pode-se observar que o cordão tem largura maior que os outros, pois é a solda com maior potência realizada nessa velocidade. As soldas 2 e 3 mostradas nas imagens superior-direita e no meio-esquerda, respectivamente, tiveram resultados muito bons, com profundidade adequada e uma boa largura. A solda 4, imagem no meio-direita, feita com potência de 400W, não foi suficiente para atravessar a amostra, ficando com uma profundidade de aproximadamente 70% da espessura da chapa. Na imagem inferior, nota-se que a potência de 500W também não foi suficiente para atravessar a chapa.

A solda 6 apresentou o melhor resultado, considerando-se como fator de qualidade a relação entre a largura e profundidade das soldas.

Os cordões mais largos foram apresentados nas soldagens em baixa velocidade, 50mm/s. A Figura 5.3 exibe as imagens das soldas 9, 10 e 11, que seguiram o mesmo padrão das soldas anteriores.

A solda apresentada na Figura 5.3c, condição 11, mostra que a potência de 200W é

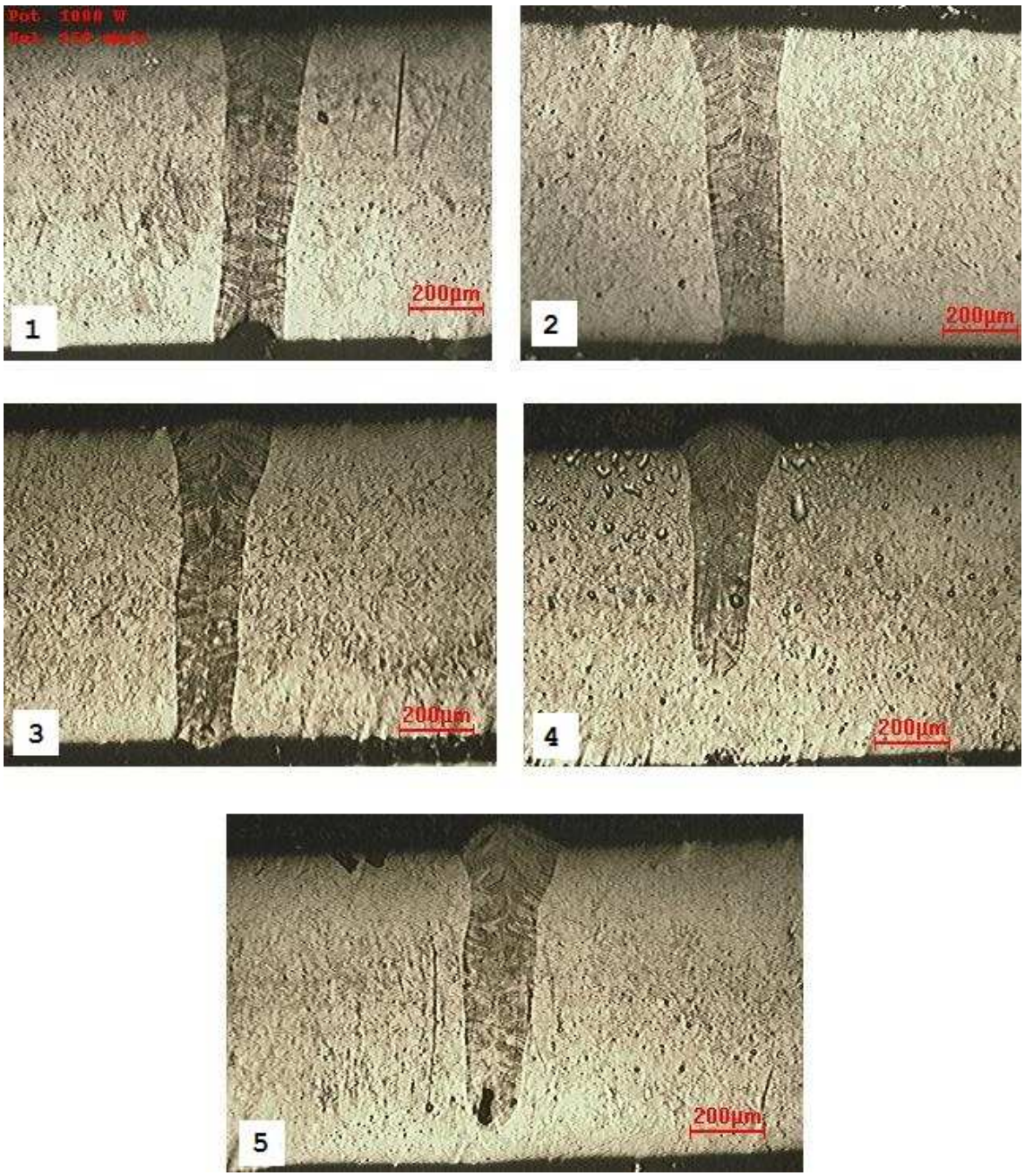


Figura 5.1: Micrografias do aço AISI 316, velocidade 150mm/s e potências 1) 1000W, 2) 800W, 3) 600W, 4) 400W, 5) 500W

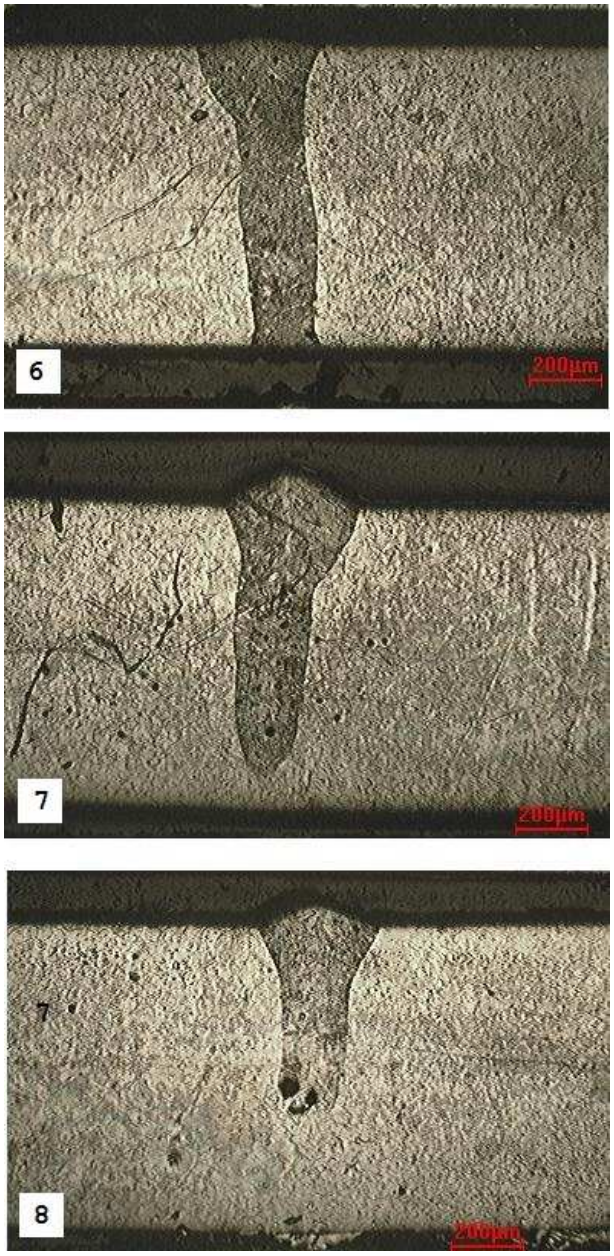


Figura 5.2: Micrografias do aço AISI 316, velocidade 100mm/s e potências 6) 500W, 7) 400W, 8) 300W

suficiente para atravessar somente 50% da chapa. O melhor resultado nessa velocidade foi o da solda 9, feita com 400W de potência.

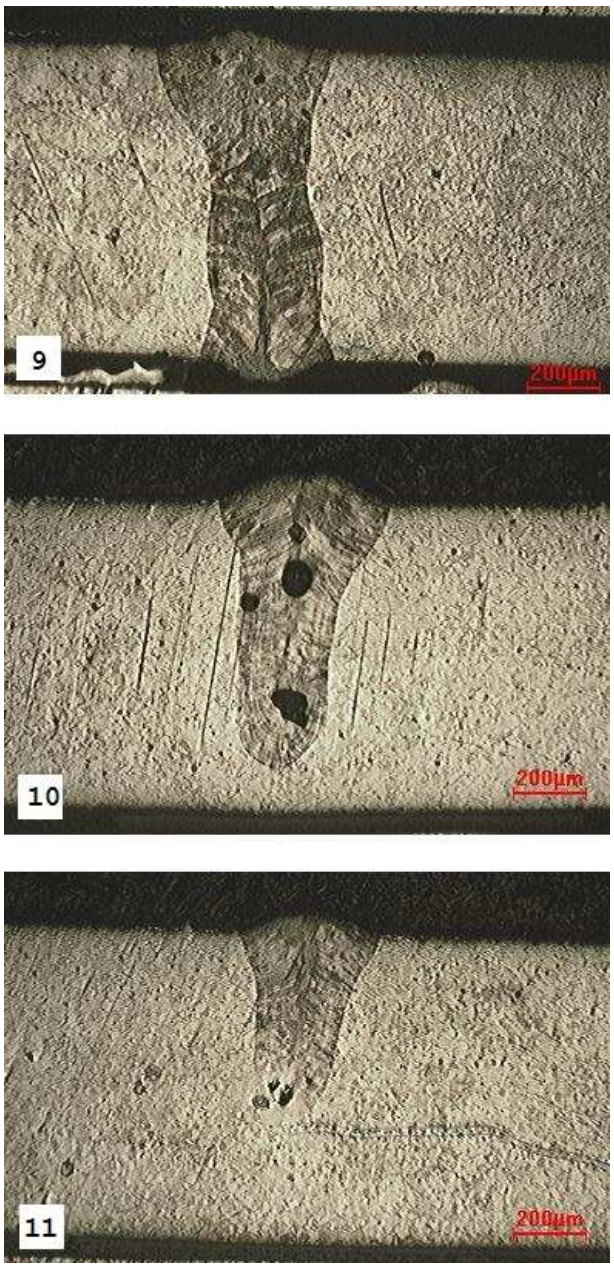


Figura 5.3: Micrografias do aço AISI 316, velocidade 50mm/s e potências 9) 400W, 10) 300W, 11) 200W

Portanto, os melhores resultados para o aço AISI 316, foram os cordões das soldagens 3, 6 e 9.

### 5.1.2 Análise da Seção Transversal do AISI 304

Para o terceiro experimento, também foram feitas microscopias ópticas da seção transversal de todos os cordões de solda realizados. Para o aço AISI 304, foram definidas quatro soldagens para cada uma das três velocidades de ensaio. Os dados referentes às soldas mostradas nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 estão descritos na Tabela 4.4.

Seguindo a mesma sequência anterior, a Figura 5.4 mostra as imagens das soldas feitas na velocidade de 150mm/s.

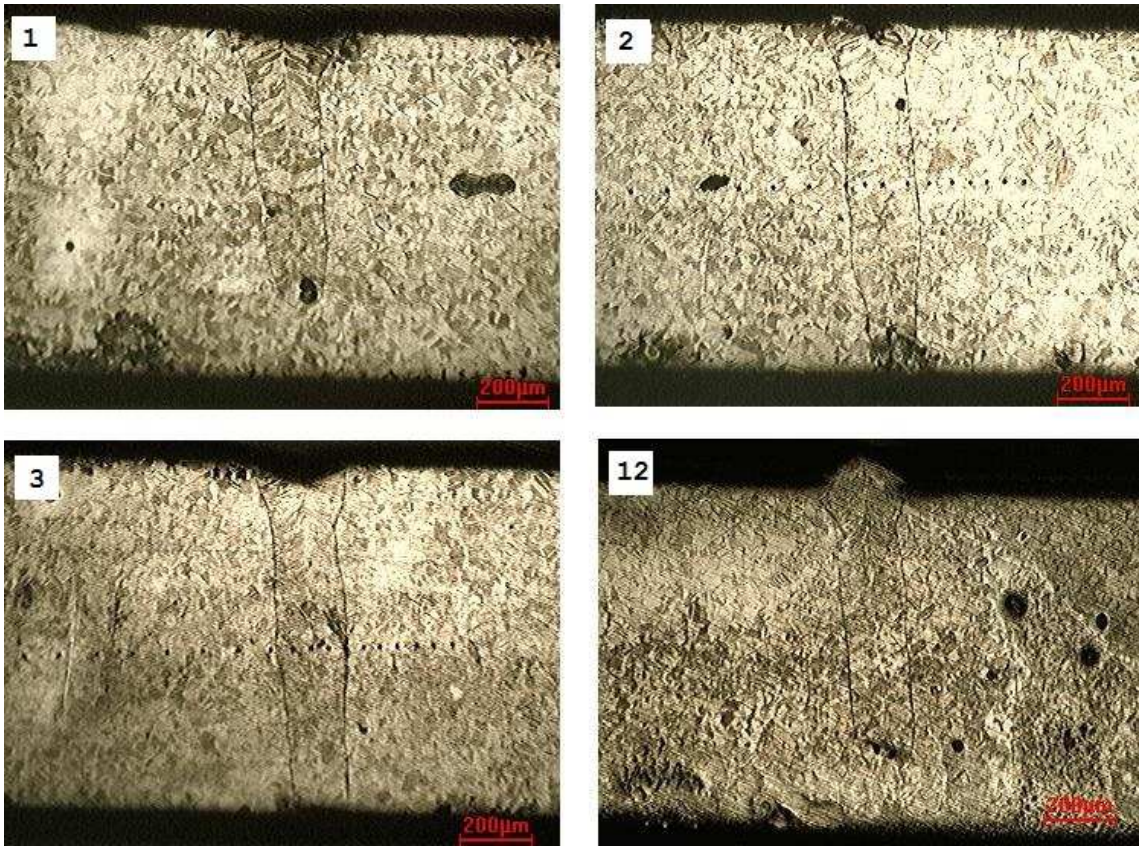


Figura 5.4: Micrografias do aço AISI 304, velocidade 150mm/s e potências 1) 500W, 2) 600W, 3) 700W, 12) 550W

No canto superior-esquerdo da Figura 5.4 está a imagem da solda número 1, feita com o laser na potência de 500W, e observa-se que ela não teve profundidade de 100% da chapa. A imagem superior-direita mostra a solda 2, com melhor resultado macroscópico e, aparentemente, também um bom resultado microscópico, com uma boa espessura atravessando quase toda a chapa. Mas o melhor resultado microscópico foi o da solda 3 com 700W, na imagem inferior-esquerda com espessura se mantendo homogênea durante praticamente todo o cordão da solda. A última imagem, inferior-direita, foi uma tentativa com uma potência intermediária, entre as soldas 1 e 2. Essa imagem mostra o cordão 12,

feito com 550W de potência.

A Figura 5.5 mostra as soldas 4, 5, 6 e 11, seguindo a sequência superior-esquerda, superior-direita, inferior-esquerda e inferior-direita. A velocidade de 100mm/s se mostrou eficiente para três das quatro potências utilizadas, variando apenas a espessura dos cordões. O melhor resultado foi o cordão 5, coincidindo também com a melhor avaliação macroscópica.

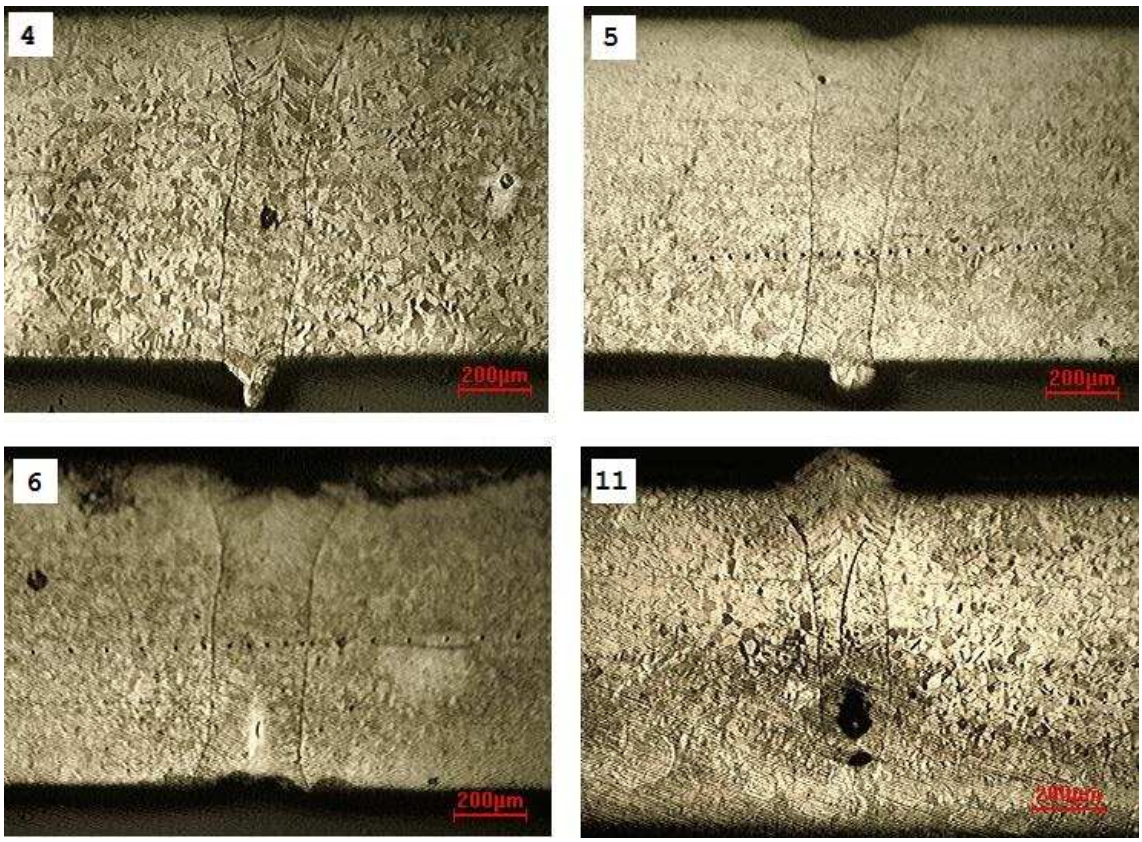


Figura 5.5: Micrografias do aço AISI 304, velocidade 100mm/s e potências 4) 400W, 5) 500W, 6) 600W, 11) 450W

As soldas 7, 8, 9 e 10 estão mostradas na 5.6, seguindo o mesmo padrão anterior, superior-esquerda, superior-direita, inferior-esquerda e inferior-direita, respectivamente. A solda 8, de 400W, foi a que obteve melhores resultados macro e microscópico.

Como no aço AISI 316, a largura do cordão de solda tem uma relação inversa com a velocidade, observa-se aumento da largura com a redução da velocidade de soldagem. Os mais largos foram encontrados nas soldagens com a menor velocidade: 50mm/s.

Com essas análises, destacam-se os melhores resultados para o aço AISI 304, que foram os cordões das soldagens 3, 4 e 8, sendo que os dois últimos já eram esperados pela avaliação macroscópica.

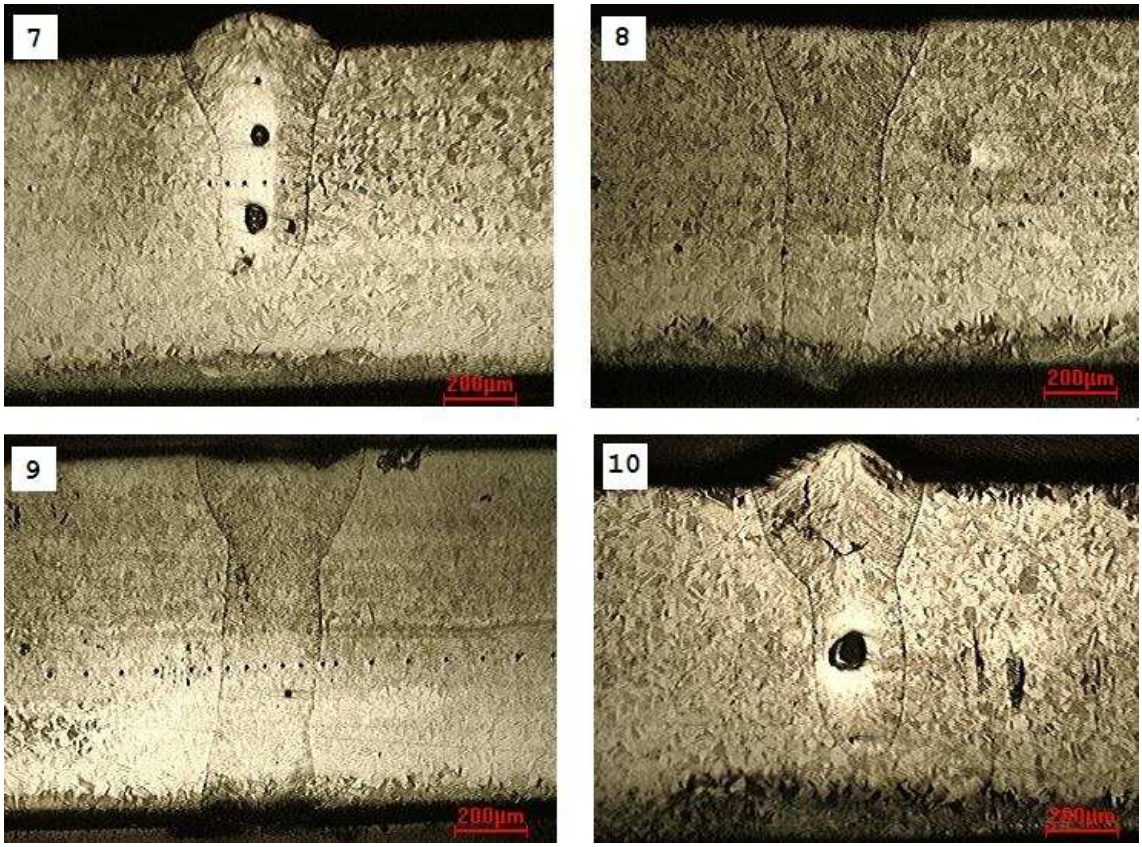


Figura 5.6: Micrografias do aço AISI 304, velocidade 50mm/s e potências 7) 300W, 8) 400W, 9) 500W, 10) 350W

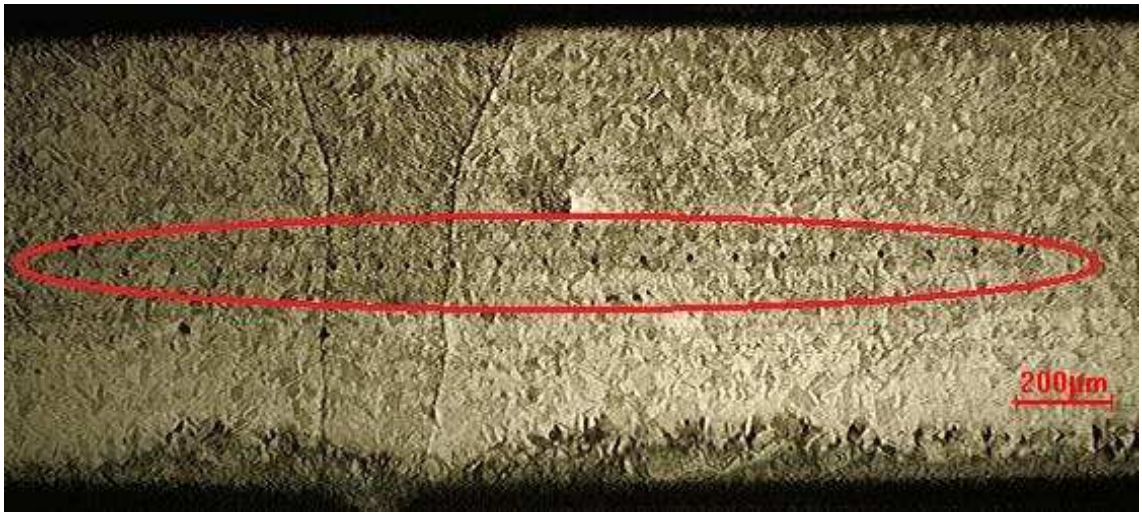


Figura 5.7: Perfil de microdureza Vickers

Observou-se uma maior incidência de porosidades nos cordões em que não houve penetração total, pois os gases gerados no processo após a formação do *keyhole* ficaram retidos devido à solidificação rápida dos leitos de solda.

## 5.2 Microdureza Vickers

Foram realizadas endentações piramidais na superfície do material, em um corte transversal dos cordões de solda. A carga de 25g foi selecionada para a realização de todos os ensaios de microdureza, visto que esse parâmetro gerava uma endentação com tamanho adequado para a medição. Outro parâmetro selecionado previamente é o tempo de ensaio, que neste caso foi definido em cinco segundos.

As endentações do ensaio de microdureza foram feitas em uma linha única, tanto na parte interna como na região próxima ao cordão, para análise da Zona Termicamente Afetada. Uma das vantagens da soldagem a laser é, justamente, o tamanho da ZTA, imperceptível nas imagens obtidas por microscopia óptica. Nos ensaios de microdureza não foram observadas variações significativas nos valores de dureza. A Figura 5.7 exemplifica o processo.

Um detalhe do cordão de solda no meio da linha de endentações pode ser observado na Figura 5.8,com ampliação de 200x.

A forma piramidal das endentações é bem destacada com uma ampliação de 400x, como mostra a Figura 5.9. Nessa imagem também é mostrado o cordão da solda com quatro endentações dentro e duas fora, sendo uma de cada lado.

Figura 5.8: Perfil de microdureza Vickers, cordão de solda no centro da imagem

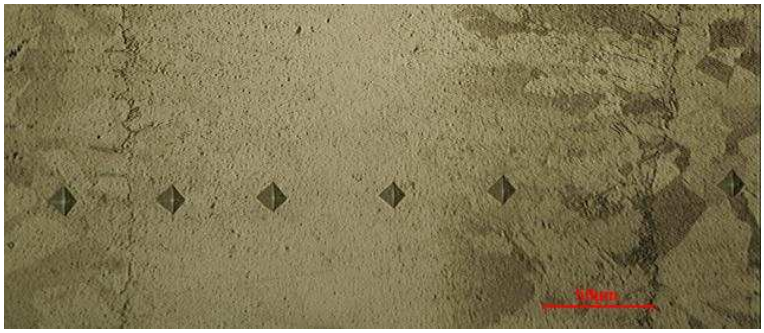

Figura 5.9: Endentações do ensaio de microdureza Vickers

### 5.2.1 AISI 316

A Tabela 5.1 contém as médias dos valores medidos no Material Base (MB) e na Zona Fundida (ZF), além das respectivas medidas de desvio padrão e os resultados da análise estatística. As colunas dois e quatro contém o valor médio daquele conjunto de endentações, medidos em HV (Microdureza Vickers).

Para uma avaliação consistente dos diferentes valores de dureza encontrados no material base e no cordão de solda, efetuou-se uma análise estatística através do Teste T de Student.

Em relação aos resultados da análise estatística, no Teste T consideraram-se os dados em duas situações diferentes: o material base como situação inicial e os dados da zona fundida como situação final. A maior parte dos dados apresentou valores menores que 0,05 para o Test T. Tomando como hipótese nula que a média da situação inicial é igual à média da situação final, pode-se rejeitar essa hipótese, pois os valores obtidos foram menores que 0,05 que é o nível de significância determinado. Portanto, existe uma diferença significativa entre os valores de microdureza obtidos no cordão de solda e os valores no metal base.

Tabela 5.1: Valores médios de microdureza e da análise estatística - AISI 316

| Cordão | Média ZF (HV) | Desv. Pad. | Média MB (HV) | Desv. Pad. | Teste T |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 199 | 17,47 | 161 | 7,3 | 0,0043 |
| 3 | 216 | 5,39 | 192 | 9,39 | < 0,001 |
| 4 | 216 | 9,08 | 184 | 22,13 | 0,058 |
| 5 | 235 | 5,99 | 198 | 9,66 | < 0,001 |
| 6 | 220 | 9,92 | 185 | 9,79 | < 0,001 |
| 7 | 227 | 13,79 | 195 | 12,43 | 0,0148 |
| 8 | 221 | 7,79 | 202 | 13,7 | < 0,001 |
| 9 | 229 | 3,02 | 193 | 8,57 | < 0,001 |
| 10 | 217 | 14,01 | 188 | 13,23 | < 0,001 |
| 11 | 201 | 4,79 | 189 | 8,32 | 0,0012 |

Cada linha da tabela é referente a um cordão de solda, que foi submetido a aproximadamente 30 endentações. No primeiro cordão, ocorreram problemas de deformação nas endentações, afetando as medidas da microdureza, portanto, foi retirado da tabela.

Observa-se que, em geral, as médias dos valores de dureza obtidos dentro do cordão de solda (na zona fundida, ZF) são 15% maiores que as médias dos valores medidos fora do cordão (MB), evidenciando um pequeno endurecimento na região soldada. Esse endurecimento do cordão, ocasionando em uma diferença de dureza entre o cordão de solda e o material base, pode ser relacionada à geração de tensões residuais no processo de soldagem.

### 5.2.2 AISI 304

A Tabela 5.2 contém as médias dos valores medidos no AISI 304, seguindo o mesmo padrão de ensaios do AISI 316.

Tabela 5.2: Valores médios de microdureza e da análise estatística - AISI 304

| Cordão | Média ZF (HV) | Desv. Pad. | Média MB (HV) | Desv. Pad. | Teste T |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 241 | 26,46 | 233 | 17,55 | 0,055 |
| 3 | 224 | 25,44 | 241 | 16,15 | 0,858 |
| 5 | 224 | 19,08 | 307 | 38,71 | < 0,001 |
| 6 | 256 | 14,91 | 371 | 34,90 | < 0,001 |
| 7 | 250 | 15,58 | 259 | 28,03 | 0,251 |
| 8 | 239 | 16,41 | 239 | 19,63 | 0,480 |
| 9 | 239 | 15,27 | 224 | 11,57 | 0,001 |

Ocorreram problemas de deformação nas endentações dos cordões número um e qua-

tro, afetando as medidas da microdureza, portanto, também foram retirados da tabela.

No cordão número três ocorreu a primeira inversão do padrão observado até o momento, nessa microdureza o valor médio obtido nas endentações dentro da Zonda Fundida foi menor que o valor fora dela. Isso quer dizer que o material base tem uma dureza maior que a do material fundido no cordão da solda. Nos cordões cinco e seis essa inversão continuou ocorrendo. O resultado de média mais próxima foi obtido na microdureza do cordão 8. Pode-se considerar que nesse caso não ocorreu alteração na dureza do aço.

Para o aço AISI 304, ocorreu uma maior variação nos valores das microdurezas. Nesse caso não foi possível concluir no aumento da dureza na Zona Fundida.

## 5.3 Medidas da Largura e da Profundidade do Cordão de Solda

### AISI 304

A Tabela 5.3 contém as medidas da largura média e da profundidade do cordão de solda no AISI 304. As medidas de largura foram realizadas no topo (leito de fusão), no meio e na base do cordão de solda, e a partir desses valores foi calculada a largura média.

Tabela 5.3: Medidas da largura e da profundidade do cordão de solda no AISI 304

| **Cordão de Solda** | **Profundidade ($\mu m$)** | **Largura ($\mu m$)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Topo** | **Meio** | **Base** | **Média** |
| 1 | 895 | 355 | 225 | 195 | **258** |
| 2 | 1100 | 300 | 245 | 155 | **233** |
| 3 | 1200 | 305 | 235 | 185 | **241** |
| 4 | 1200 | 425 | 245 | 200 | **290** |
| 5 | 1200 | 425 | 250 | 250 | **308** |
| 6 | 1200 | 480 | 320 | 370 | **390** |
| 7 | 775 | 505 | 295 | 270 | **357** |
| 8 | 1200 | 555 | 305 | 245 | **369** |
| 9 | 1200 | 550 | 325 | 375 | **417** |
| 10 | 885 | 555 | 285 | 245 | **362** |
| 11 | 890 | 395 | 235 | 215 | **282** |
| 12 | 915 | 285 | 200 | 195 | **227** |

**AISI 316**

A Tabela 5.4 contém as medidas da largura média e da profundidade do cordão de solda no AISI 316. As medidas de largura foram realizadas da mesma forma que no AISI 304.

Tabela 5.4: Medidas da largura e da profundidade do cordão de solda no AISI 316

| **Cordão de Solda** | **Profundidade ($\mu m$)** | **Largura ($\mu m$)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Topo** | **Meio** | **Base** | **Média** |
| 1 | 1000 | 320 | 250 | 235 | **268** |
| 2 | 1000 | 325 | 230 | 210 | **255** |
| 3 | 1000 | 315 | 205 | 185 | **235** |
| 4 | 710 | 305 | 185 | 165 | **218** |
| 5 | 890 | 310 | 220 | 155 | **228** |
| 6 | 1000 | 430 | 275 | 255 | **320** |
| 7 | 875 | 430 | 255 | 190 | **292** |
| 8 | 610 | 385 | 205 | 190 | **260** |
| 9 | 1000 | 580 | 325 | 440 | **448** |
| 10 | 845 | 560 | 305 | 270 | **378** |
| 11 | 620 | 455 | 275 | 230 | **320** |

## 5.4 Correlações entre Profundidade e Velocidade da Soldagem

A Figura 5.10 mostra a relação entre três experimentos de soldagem no AISI 316. Nesse experimento, fixou-se a potência do laser em 400W para estabelecer uma correlação entre a profundidade de penetração do cordão de solda com a velocidade, e também a largura desse cordão com a velocidade. As três velocidades utilizadas para a soldagem foram 50, 100 e 150mm/s.

Nos pontos superiores, representados com quadrados azuis, estão os valores de profundidade ($\mu m$) obtidos nas diferentes velocidades utilizadas. Através de uma regressão linear, obteve-se a Equação 5.1.

$$Prof.(\mu m) = -2,9Vel.(mm/s) + 1145 \tag{5.1}$$

A relação se aproxima a uma reta decrescente, quanto maior a velocidade de soldagem,

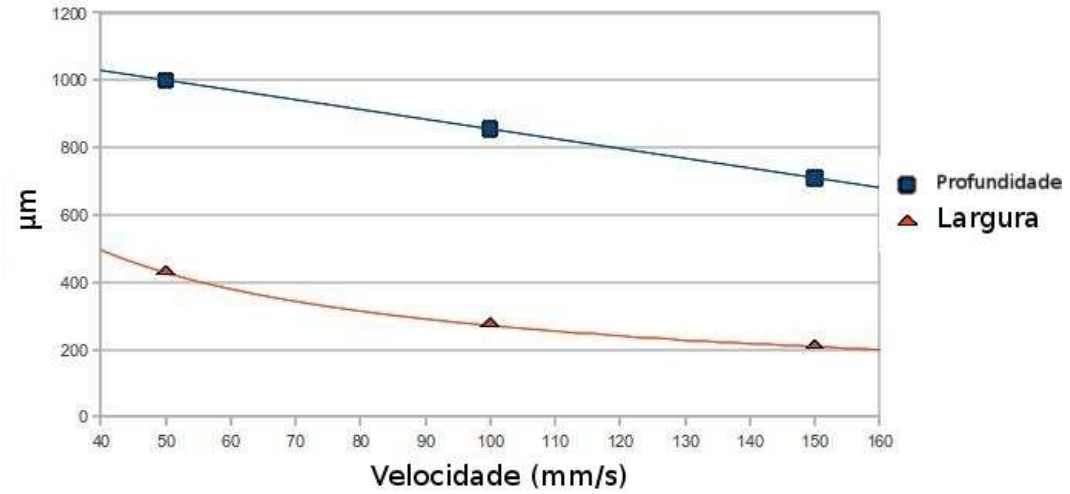


Figura 5.10: Curvas relacionando a profundidade e a largura dos cordões de solda com a velocidade da soldagem

menor a profundidade obtida pois a densidade de potência empregada em cada ponto é menor e a região fica menos tempo exposta ao feixe laser.

Já os pontos triangulares na cor laranja, indicam a relação entre a profundidade ($\mu m$) e a largura média dos cordões de solda. A relação obtida na Equação 5.2 não foi uma reta, como pode-se observar.

$$Larg.(\mu m) = 5605 Vel.(mm/s)^{-0,657} \tag{5.2}$$

A largura também decresce com o aumento da velocidade, mas não linearmente como a profundidade. Para um intervalo maior de velocidades é provável que a profundidade também seja não-linear, como mostra a literatura[24] [25], e ocorreu linearidade nesse trabalho devido a faixa de velocidades utilizadas.

## 5.5 Correlações entre Profundidade e Potência

A Figura 5.11 mostra as relações obtidas entre a profundidade ($\mu m$) atingida e a largura ($\mu m$) dos cordões de solda com a variação da potência do laser em cada soldagem. Essas relações foram obtidas para os cordões de solda do AISI 304 com velocidade de soldagem fixada em 150mm/s.

Os pontos na parte superior da Figura 5.11 (quadrados em azul) mostram os valores de profundidade obtidos. O último ponto, para a potência de 700W, está localizado abaixo

da reta e foi excluído do cálculo na regressão linear. Isso ocorreu pois não foi possível determinar o valor exato de profundidade obtida, sendo que o cordão teve penetração completa na chapa. Entretanto, se a chapa tivesse uma espessura maior, o valor de profundidade poderia ter sido maior, ajustando o ponto à reta obtida. A reta da Equação 5.3 obviamente é crescente, pois um aumento na potência do laser consequentemente aumenta a profundidade de penetração, pois a densidade de potência resultante na região atingida pelo feixe é maior.

$$Prof.(\mu m) = 2P(W) - 179 \tag{5.3}$$

Na parte inferior da imagem, os pontos triangulares na cor laranja mostram a relação entre os valores de largura obtidos para diferentes potências do laser utilizadas. A Equação 5.4 contém uma observação interessante, que é o fato de que a largura do cordão vai aumentando tanto para valores elevados de potência, quanto para valores reduzidos. Existe então uma faixa de potência ideal para assegurar a largura dentro dos limites adequados.

Esse fato ocorre porque para potências muito altas, a densidade de potência é maior que a necessária para formar o *keyhole* na região. E para baixos valores de potência, ocorre somente uma fusão superficial na região.

$$Larg.(\mu m) = 0,0027P(W)^2 - 3,18P(W) + 1158 \tag{5.4}$$

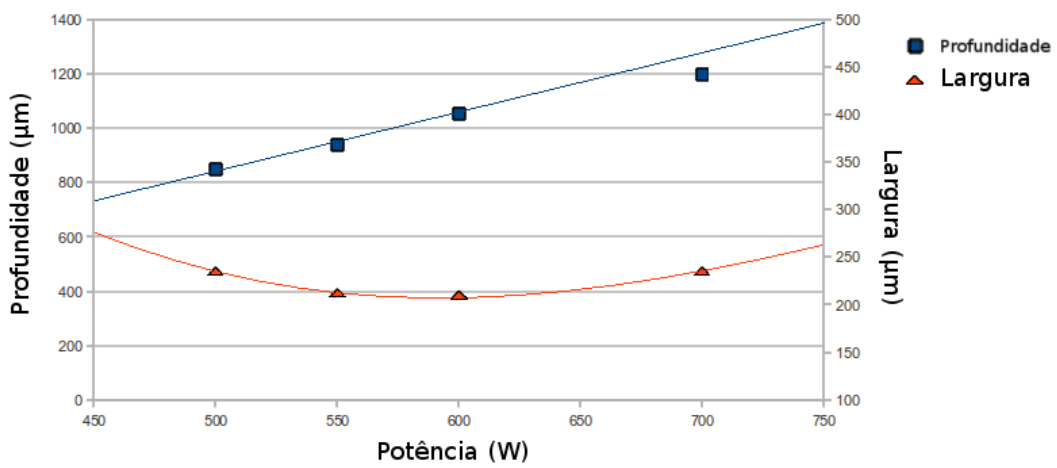


Figura 5.11: Curvas relacionando a profundidade e a largura dos cordões de solda com a potência do laser, para V=150mm/s

A importância dessas relações obtidas é a possibilidade de se otimizar os parâmetros

de acordo com a espessura do material a ser soldado.

É importante ressaltar que estas equações mostram a tendência geral do processo, e a expressão exata depende de muitos outros fatores e variáveis que não foram consideradas neste trabalho.

A partir dessas equações, pode-se selecionar a potência e/ou velocidades mais adequadas para cada caso, sem a necessidade de executar inúmeros ensaios para determinar os parâmetros adequados para cada espessura de chapas dos aços AISI 304 e AISI 316.

## 5.6 Defeitos Observados

Alguns defeitos foram observados nas micrografias, ocasionados por diferentes motivos, inclusive pelo ajuste inadequado de alguns parâmetros.

Um exemplo do defeito com maior ocorrência está mostrado na Figura 5.12. O aparecimento de porosidade aconteceu em praticamente todos os cordões que não tiveram profundidade suficiente para atravessar a chapa. Isso provavelmente ocorre porque quando a chapa é totalmente atravessada, existem dois caminhos para escapamento de gases. Caso contrário os gases ficam presos no fundo da solda, pois a parte superior solidifica antes de ocorrer o escapamento.

Figura 5.12: Defeito ocorrido no cordão da solda - Porosidade

Outro defeito percebido foi a sangria do aço quando a chapa foi totalmente atravessada, Figura 5.13. Uma causa pode ser a utilização de uma potência muito superior à

necessária para atravessar a chapa.

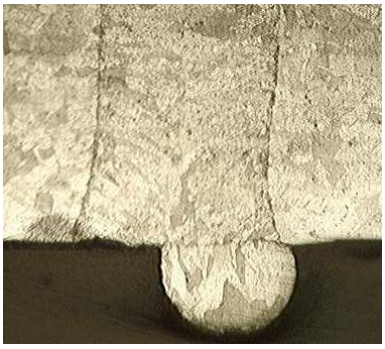

Figura 5.13: Defeito ocorrido no cordão da solda - Sangria

Em alguns casos ocorreu um defeito causado durante a solidificação da Zona Fundida. Esse defeito é conhecido por rechupe, e está mostrado na Figura 5.14

Figura 5.14: Defeito ocorrido no cordão da solda - Rechupe

## 5.7 Análise da Susceptibilidade à Corrosão por Tratamento de Imagem

### 5.7.1 Análise do AISI 304

As imagens foram divididas em duas, para analisar separadamente o metal base e o cordão de solda. Na Figura 5.15 foi realizado o reconhecimento, identificação e contagem dos pites no metal base do AISI 304.

Para padronização, as imagens foram subdivididas em: a) imagem do metal base; b) imagem do reconhecimento dos pites; c) imagem da contagem do número de pites e d) imagem do cálculo da densidade de pites.

Os resultados dessa análise estão na Tabela 5.5, que contém o número de pites encontrados, com um tamanho mínimo ajustado nas configurações iniciais, sua área média, seu perímetro médio e a densidade de vazios, que representa a percentagem da imagem que foi atingida por pites.

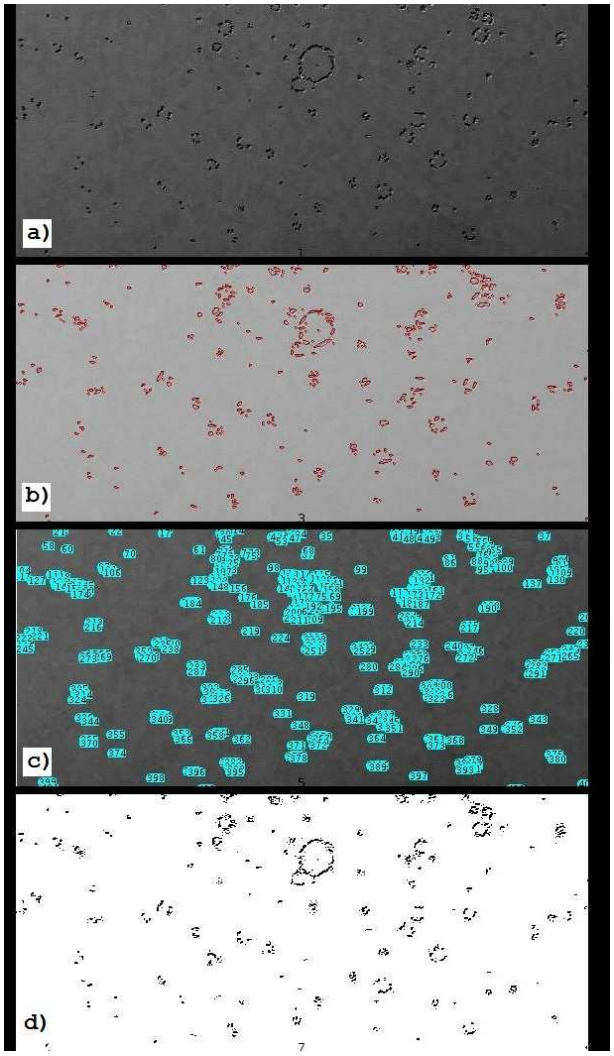


Figura 5.15: Tratamento de imagem da corrosão no metal base do AISI 304

Tabela 5.5: Análise da corrosão eletrolítica no metal base do AISI 304

| **N$^o$ de Partículas** | **Área ($\mu m^2$)** | | | **Perímetro ($\mu m$)** | | | **Densidade de Vazios** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Max** | **Min** | **Média** | **Max** | **Min** | **Média** | |
| **403** | **377** | **6** | **45** | **182** | **7** | **26** | **1,8%** |

Ainda para o AISI 304, a Figura 5.16 segue o mesmo padrão anterior, mas para o cordão de solda.

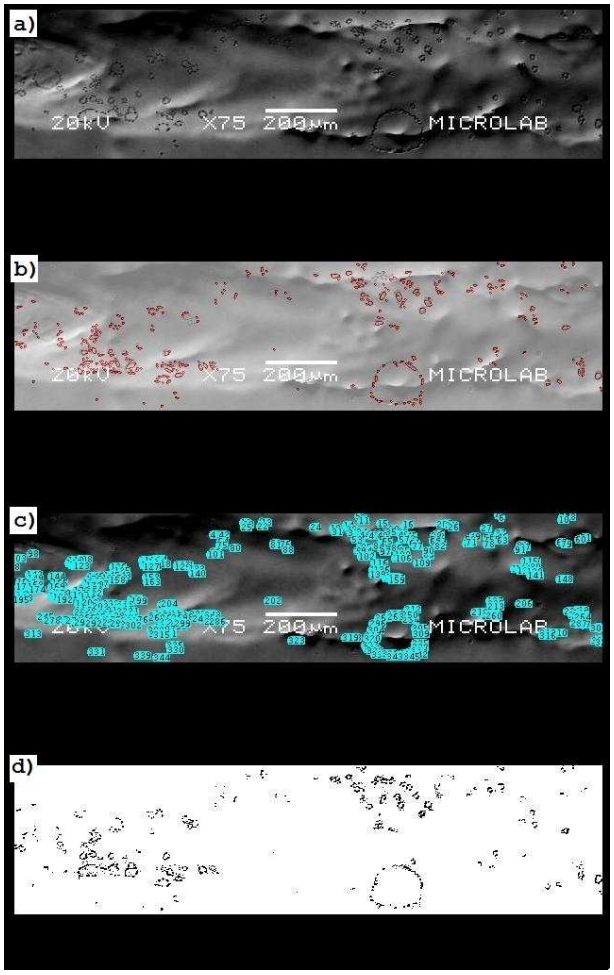


Figura 5.16: Tratamento de imagem da corrosão no cordão de solda do AISI 304

Os dados da análise da corrosão eletrolítica no cordão de solda do AISI 304 estão na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Análise da imagem de corrosão eletrolítica no cordão de solda do AISI 304

| **N$^o$ de Partículas** | **Área ($\mu m^2$)** | | | **Perímetro ($\mu m$)** | | | **Densidade de Vazios** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Max** | **Min** | **Média** | **Max** | **Min** | **Média** | |
| **345** | **310** | **6** | **40** | **166** | **7** | **25** | **1,7%** |

Comparando-se as tabelas 5.5 e 5.6, foi realizado o gráfico da Figura 5.17. Neste gráfico, o tamanho médio dos pites no metal base do AISI 304 é apenas um ponto percentual maior que o do cordão de solda. Ainda nas tabelas, observa-se também a diferença entre a área média, que foi maior para o metal base.

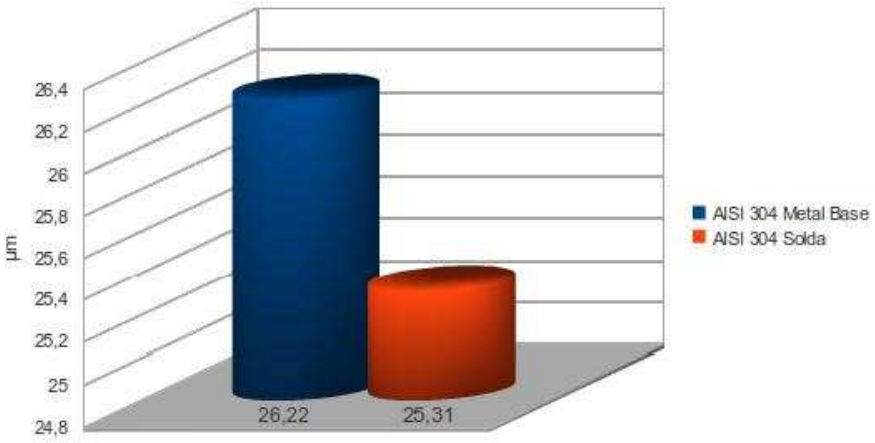


Figura 5.17: Tamanho médio dos pites no AISI 304 - Metal base x Solda

O cordão de solda obteve resultados ligeiramente melhores também para a densidade de vazios, como mostra a Figura 5.18.

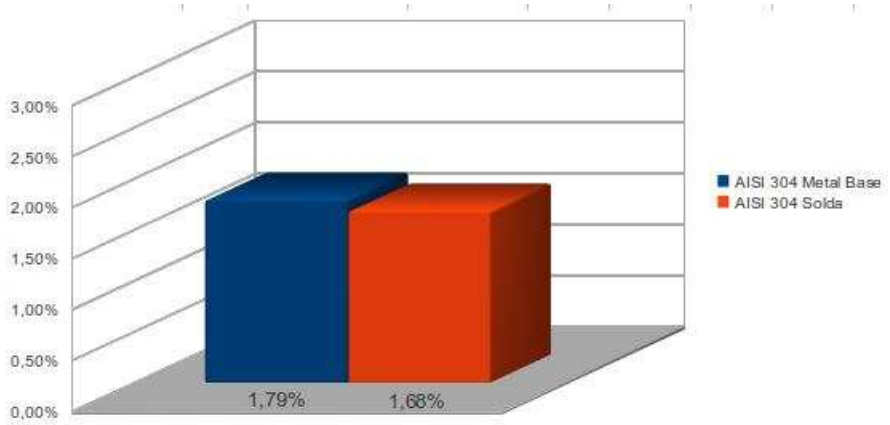


Figura 5.18: Densidade de pites no AISI 304 - Metal base x Solda

### 5.7.2 Análise do AISI 316

As imagens do AISI 316 também foram divididas em duas, para analisar separadamente o metal base e o cordão de solda. No metal base, mostrado na Figura 5.19 foi executado o reconhecimento, identificação e contagem dos pites.

Na Tabela 5.7, estão os resultados dessa análise, contendo o número de pites encontrados, a área, o perímetro e a densidade de vazios.

Para o cordão de solda do AISI 316, foi realizado o mesmo procedimento, como mostrado na Figura 5.20.

Na Tabela 5.8 estão os dados resultantes da análise da corrosão eletrolítica no cordão

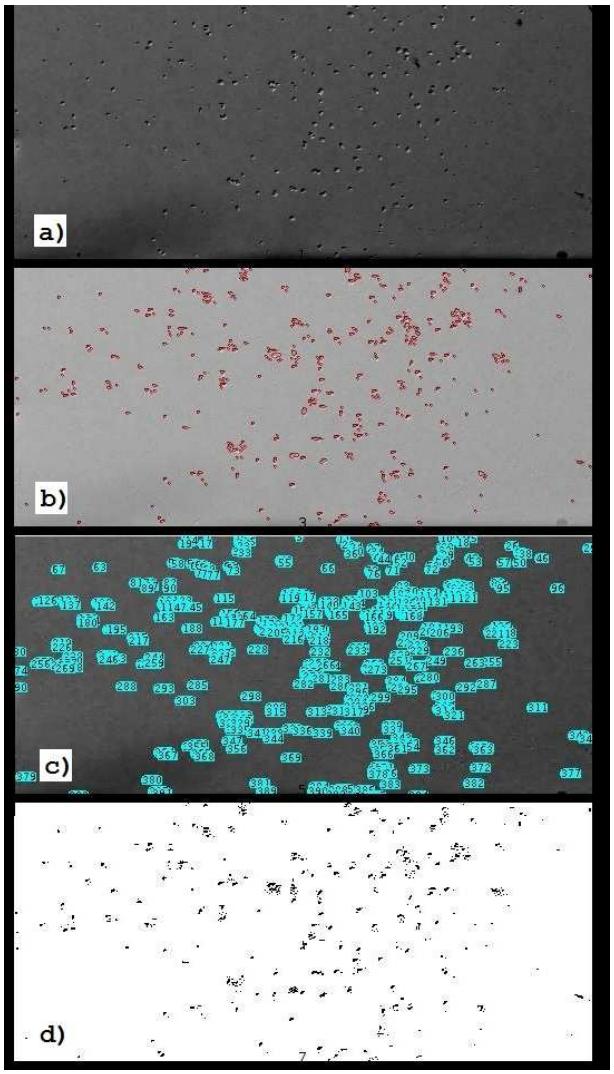


Figura 5.19: Tratamento de imagem da corrosão no metal base do AISI 316

Tabela 5.7: Análise da imagem de corrosão eletrolítica no metal base do AISI 316

| **N$^o$ de Partículas** | **Área ($\mu m^2$)** | | | **Perímetro ($\mu m$)** | | | **Densidade de Vazios** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Max** | **Min** | **Média** | **Max** | **Min** | **Média** | |
| **401** | **215** | **6** | **29** | **117** | **7** | **18** | **1,4%** |

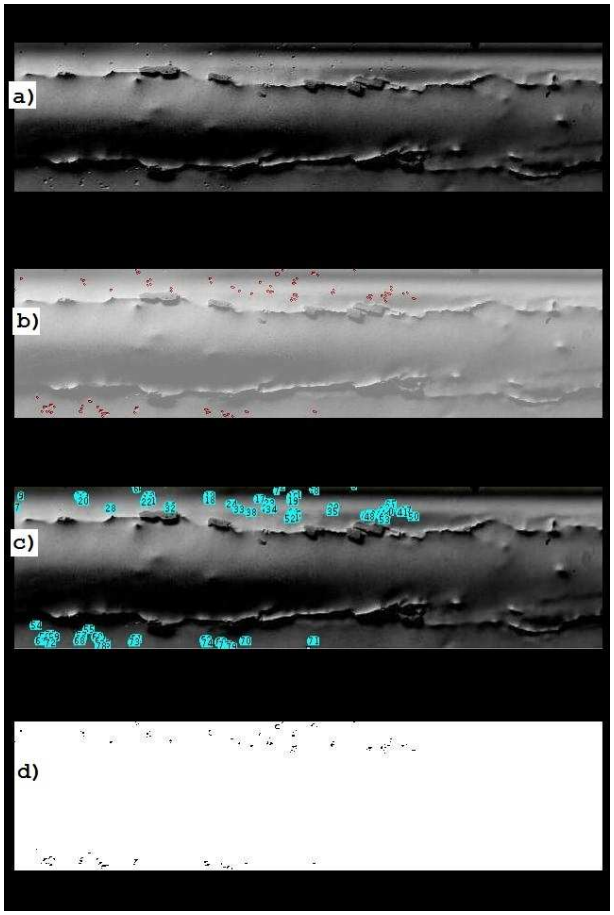


Figura 5.20: Tratamento de imagem da corrosão no cordão de solda do AISI 316

de solda do AISI 316.

Tabela 5.8: Análise da imagem de corrosão eletrolítica no cordão de solda do AISI 316

| **N$^o$ de Partículas** | **Área ($\mu m^2$)** | | | **Perímetro ($\mu m$)** | | | **Densidade de Vazios** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Max** | **Min** | **Média** | **Max** | **Min** | **Média** | |
| **79** | **80** | **6** | **21** | **57** | **7** | **15** | **0,3%** |

O mesmo procedimento de comparação foi utilizado a partir das Tabelas 5.7 e 5.8.

No gráfico da Figura 5.21, o tamanho médio dos pites no metal base do AISI 316 é três pontos percentuais maior que o do cordão de solda. O mesmo ocorre para a área média, também com melhor resultado para o cordão de solda.

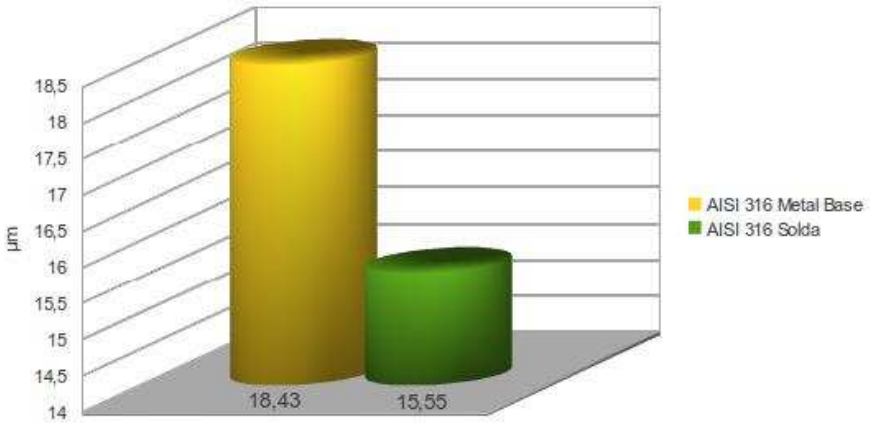


Figura 5.21: Tamanho médio dos pites no AISI 316 - Metal base x Solda

Como no caso do AISI 304, o cordão de solda também obteve resultados melhores para a densidade de vazios, como é mostrado na Figura 5.22. Nesse caso, o cordão praticamente não foi afetado pela corrosão.

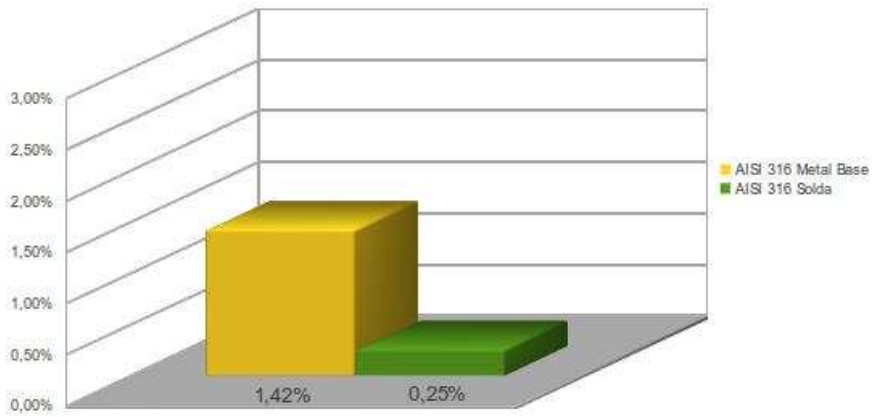


Figura 5.22: Densidade de pites no AISI 316 - Metal base x Solda

Os menores valores encontrados foram os mesmos em todos os casos, devido às configurações iniciais utilizadas, em que foi definido um tamanho mínimo para as partículas a serem identificadas, excluindo assim os píxels solitários nas imagens. Por esse motivo foram encontrados valores iguais a 6,75$\mu m^2$ para a área e 7,35$\mu m$ para o perímetro. É importante ressaltar que isso não altera os resultados, pois não afeta as regiões maiores, além de que foram utilizados os mesmos parâmetros para todos os casos avaliados.

Portanto, em ambos os casos, ligeiramente para o AISI 304 e mais acentuado para o AISI 316, a região soldada apresentou um desempenho superior ao metal base em relação à susceptibilidade à corrosão, pois além da menor densidade de pontos encontrados, o tamanho médio desses pontos também foi inferior, o que caracteriza uma maior resistência à corrosão neste meio específico.

# Capítulo 6
# Conclusões

O trabalho desenvolvido buscou encontrar os ajustes mais adequados entre os parâmetros operacionais para soldagens dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 utilizando um laser de alta potência Yb-Fibra.

Constatou-se que o ajuste adequado dos parâmetros é de grande influência para a qualidade da solda. Observou-se que os efeitos da modificação nos parâmetros também influênciam uns aos outros, isto é, o ajuste de parâmetros da soldagem a laser é um problema multivariável e não-linear, dificultando encontrar a configuração ótima.

Considerando a qualidade da solda como sendo uma relação entre a largura e a profundidade, os melhores parâmetros encontrados para o AISI 316 foram os utilizados no cordão de solda número três, com potência igual a 600W, velocidade igual a 150mm/s e densidade de potência igual a 76,4$kW/mm^2$. Já para o AISI 304, a melhor configuração foi a da solda número quatro, com potência igual a 400W, velocidade igual a 100mm/s e densidade de potência igual a 51,0$kW/mm^2$.

Uma das características analisadas foi a influência da variação de cada parâmetro nos defeitos observados. Um ponto positivo é que defeitos como trincas de solidificação nas soldas não foram constatados. O principal defeito encontrado foi a presença de porosidade nos cordões de solda, principalmente nos cordões que não atingiram profundidade para atravessar a chapa, ou seja, quando não ocorreu uma penetração total.

Observou-se uma diferença entre as microdurezas do AISI 304 e do AISI 316 em relação ao efeito da soldagem. Os cordões de solda do aço AISI 316 apresentaram dureza superior àquela do metal base, já no cordão de solda do AISI 304, esse aumento não foi constatado.

Correlações entre a potência e a velocidade de soldagem com a profundidade e largura dos cordões de solda foram encontradas. Essas correlações são fisicamente consistentes e seguem padrões validados em trabalhos de outros autores.

Através das equações obtidas nas correlações pode-se estimar os parâmetros adequados para a soldagem de chapas com diferentes espessuras dos aços AISI 304 e AISI 316.

Em relação à susceptibilidade à corrosão, o comportamento do cordão de solda foi melhor que o do material base, o que ficou evidenciado pelo número, tamanho e distribuição dos pontos de corrosão detectados. Para essa análise, foi desenvolvido um método rápido de avaliação da susceptibilidade à corrosão combinando uma técnica computacional de tratamento de imagens com a corrosão provocada em célula de ataque eletrolítico. A técnica desenvolvida para avaliar a susceptibilidade à corrosão mostrou-se eficaz e recomenda-se sua utilização em estudos da mesma natureza.

# Capítulo 7
# Sugestões para Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros deverão enfocar aspectos relacionados ao desempenho em relação às soldas quando submetidas à tração, torção e fadiga, por exemplo.

Uma análise mais detalhada do comportamento da solda em outros ensaios de corrosão, para posterior comparação com os resultados da técnica desenvolvida.

A variação de outros parâmetros operacionais como vazão dos gases, orientação do feixe e distância focal devem, também, ser levadas em conta na expectativa de contribuírem para melhor desempenho operacional do laser e otimização da qualidade das soldas resultantes.

Uma opção para possibilitar a medição de maiores profundidades atingidas nas soldas é soldar chapas com espessuras maiores e, com isso, utilizar o laser em potências mais elevadas, atingindo maior profundidade no cordão de solda.

# Referências Bibliográficas


[1] ION, J. C. *Laser Processing of Engineering Materials - Principles, Procedure and Industrial Application*. Londres: Ed. Elsevier, 2005.

[2] RIVA, R. et al. Desenvolvimento da soldagem a laser para a fabricação de aeronaves. In: *VIII Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do IEAv*. São José dos Campos, São Paulo: IEAv, 2008.

[3] ABINOX, N. I. *Coletânea de Informações Técnicas - Aço Inoxidável: Composição Química e Aplicações dos Aços Inoxidáveis*. [S.l.].

[4] ABINOX, N. I. *Coletânea de Informações Técnicas - Aço Inoxidável: Manual Técnico de Soldagem do Aço Inox*. [S.l.].

[5] OLSEN, F. O. Theorical investigation in the fundamental mechanism of high intensity laser light reflectivity. *High Power CO2 Laser Systems and Applications*, SPIE - International Society for Optics and Photonics, p. 114 – 122, 1988.

[6] NARASIMHAM, K. V. Laser materials and industrial applications of lasers. *ONU - Advanced in Materials Technology Monitor*, v. 1, n. 4, p. 1–22, 1994.

[7] BELFORTE, D. Tailor blank welding in europe. *Industrial Laser Solutions*, USA, March 2002.

[8] HOFFMANN, P.; GEIGER, M. Recent development in laser system technology for welding applications. In: *Annals of the CIRP*. [S.l.: s.n.].

[9] ASM-HANDBOOK-COMMITTEE. *ASM HandBook - Welding, Brazing and Soldering*. ASM International, 1993. ISBN 0-87170-382-3. Disponível em: <www.asminternational.org>.

[10] HILTON, P. A. Fibre optic beam delivery for high-power cw nd:yag lasers. *TWI Report*, v. 49, n. 88277.

[11] VERHAEGHE, G. The fiber laser - a newcomer for material welding and cutting. *Welding Journal*, v. 84, n. 8, p. 56 – 60, 2005.

[12] SIQUEIRA, G. R. *Soldagem a Laser Autógena da Liga de Alumínio Aeronáutico AA6013: Otimização de Parâmetros e Análise Microestrutural*. Dissertação (Mestrado) — Tese de mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2007.

[13] LADARIO, F. P. et al. *Um estudo do processo de soldagem a laser de blanks automotivos, com e sem revestimento, no ambiente industrial visando melhorias incrementais e reduÃ§ao de custos*. Disponível em: <www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021004060.pdf>.

[14] LIMA, M. S. F. *Processos de Fabricação Assistidos por Laser: oportunidades em engenharia de petróleo e gás natural.* [S.l.]. 1 - 11 p.

[15] HEYDEN, J.; NILSSON, K.; MAGNUSSON, C. Laser welding of zinc coated steel. *Lasers in manufacturing*, v. 6, Junho 1989.

[16] WANDERA, C. *Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium.* Tese (Doutorado) — Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2010.

[17] COLAÇO, R.; PINA, C.; VILAR, R. Influence of the processing conditions on the abrasive wear behaviour of a laser surface melted tool steel. *Scripta Materialia*, Elsevier Science Ltd, v. 41, n. 7, p. 715–721, 1999.

[18] CHUNG, B.; AL. et. The effect of shielding gas types on co2 laser tailored blank weldability of low carbon automotive galvanized steel. *Materials Science and Engineering A*, USA, v. 272, p. 357–3624, 1999.

[19] TZENG, Y. Process characterisation of pulsed nd:yag laser seam welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 16, p. 10 – 18, 2000.

[20] OLSEN, F. O. et al. Recent investigations in sensories for adaptive control of laser cutting and welding. In: *Laser advanced materials processing - LAMP,92.* Nagaoka, Japan: High temperature society of Japan, 1992. p. 405–414.

[21] LOCKE, E.; HELLA, R. Quantum eletronics. *IEEE Journal*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 179–185, Feb 1974.

[22] BAARDSEN, E.; SCHMATZ, D.; BISARO, R. E. High speed welding of sheet steel with a co2 laser. *Welding Journal*, v. 52, p. 227–229, April 1973.

[23] DULEY, W. Co2 lasers: Effects and applications. *ACADEMIC PRESS*, p. 241, 1976.

[24] ION, J. C. High power nd:yag laser welding of thick section structural steels. *Confidential TWI Report*, v. 19, n. 88277.

[25] VERHAEGHE, G.; HILTON, P. Battle of the sources - using a high-power yb-fibre laser for welding steel and aluminium. In: *Annual Assembly and International Conference of International Institute of Welding.* [S.l.]: International Institute of Welding, 2005.

[26] WANG, H. et al. Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 184, p. 379 – 385, 2007.

[27] CAIAZZO, F. et al. Ti6al4v sheets lap and butt joints carried out by co2 laser: mechanical and morphological characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 149, p. 546 – 552, 2004.

[28] GYORGY, E. et al. Surface nitridation of titanium by pulsed nd:yag laser irradiation. *Applied Surface Science*, v. 186, p. 130 – 134, 2002.

[29] RYKALIN, N.; UGLOV, A.; KOKORA, A. *Laser Machining and Welding*. [S.l.]: Mir Publishers, 1978.

[30] LUXON, J. T.; PARKER, D. E.; PLOTKOWSKI, P. D. *Lasers in Manufacturing: An Introduction to the Technology*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1987. ISBN 0-387-17427-3.

[31] KATAYAMA, S. et al. Effect of vacuum on penetration and defect in laser welding. *Journal of Laser Applications*, v. 13, p. 187 – 192, 2001.

[32] ASM-HANDBOOK-COMMITTEE. *ASM HandBook - Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*. ASM International, 2004. A. ISBN 0-87170-380-7. Disponível em: <www.asminternational.org>.

[33] ASM-HANDBOOK-COMMITTEE. *ASM HandBook - Corrosion*. ASM International, 1992. ISBN 87170-007-7. Disponível em: <www.asminternational.org>.

[34] CRAFER, R. Advances in welding processes. *4th International Conference*, Harrogate, Yorks, England, n. 46, p. 267–278, May 1978.

[35] BROWN, C.; BANAS, C. Deep penetration laser welding. *AWS ANNUAL MEETING*, San Francisco, April 1971.

[36] WILLGOSS, R.; MEGAW, J.; CLARK, J. Laser welding of steels for power plant. *Optics and Laser Technology*, v. 11, n. 2, p. 73–82, April 1979.

[37] ASM-HANDBOOK-COMMITTEE. *ASM HandBook - Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. ASM International, 2003. ISBN 0-87170-705-5. Disponível em: <www.asminternational.org>.

[38] STREICHER, M. Theory and application of evaluation tests for detecting susceptibility to intergranular attack in stainless steels and related alloys-problems and opportunities. *STP 656 - Intergranulur Corrosion of Stainless Alloys*, American Society for Testing and Materials, n. 656, p. 3–84, 1978.

[39] DEYEV, G. F.; DEYEV, D. G. *Surface Phenomena in Fusion Welding Processes*. New York: CRC Press - Taylor And Francis Group, 2006. ISBN 0-8493-9883-5.

[40] HOWARTH, D. J. *A Review of the development and application of laser and laser-arc hybrid welding in European shipbuilding*. London, 2005. 7-9 p.

[41] IPG. *IPG Photonics, fiber laser, model YLR-2000, PL0501900, manual do equipamento*. [S.l.], 2005.

[42] GOIA, F. A. *Endurecimento da Superfície do Aço Ferramenta VC131 Utilizando Laser a Fibra*. Dissertação (Mestrado) — Tese de mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2010.

[43] ASM-HANDBOOK-COMMITTEE. *ASM HandBook - Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004. A. ISBN 0-87170-706-3. Disponível em: <www.asminternational.org>.

[44] LINUXCNC.ORG. *Enhanced Machine Controler - EMC2*. [S.l.]. Disponível em: <www.linuxcnc.org>.

[45] STEEN, W. M. *Laser Material Processing*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1991. ISBN 3-540-19670-6.

[46] ELECTROLYTES for Lectropol, Movipol and Elytopol. Kobenhavn, Aarhus, Odense, October 1960. 1-9 p.

[47] IMAGEJ - Image Processing and Analysis in Java. USA. Disponível em: <http://rsb.info.nih.gov/ij>.