

CENTRO PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA  
PROFESSOR MIGUEL REALE

ANDRÉ LUIZ COELHO  
ROMILDA DE JESUS SANTOS  
WALTER BORGES ROCHA

**Estudo do comportamento metalográfico e das propriedades mecânicas do  
metal ER 316 L depositado por manufatura aditiva pelo processo ao arco  
elétrico (MADA)**

São Paulo  
2024

CENTRO PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA  
PROFESSOR MIGUEL REALE

ANDRÉ LUIZ COELHO  
ROMILDA DE JESUS SANTOS  
WALTER BORGES ROCHA

**Estudo do comportamento metalográfico e das propriedades mecânicas do  
metal ER 316 L depositado por manufatura aditiva pelo processo ao arco  
elétrico (MADA)**

Projeto científico elaborado como requisito  
parcial para a conclusão do Curso Superior  
de Tecnologia Mecânica: Processos de  
Soldagem.

Orientador(a): Me. Edgar de Souza Dutra

São Paulo

2024

ANDRÉ LUIZ COELHO  
ROMILDA DE JESUS SANTOS  
WALTER BORGES ROCHA

**Estudo do comportamento metalográfico e das propriedades mecânicas do metal ER 316 L depositado por manufatura aditiva pelo processo ao arco elétrico (MADA)**

Projeto científico elaborado como requisito parcial para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador(a): Me. Edgar de Souza Dutra

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Me. Edgar de Souza Dutra (Orientador)      Assinatura: \_\_\_\_\_

Instituição: FATEC ITAQUERA      Data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof. Dr. Fabrício Iusuti de Medeiros      Assinatura: \_\_\_\_\_

Instituição: FATEC ITAQUERA      Data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof. Dr. Wágner Batista Silva      Assinatura: \_\_\_\_\_

Instituição: FATEC ITAQUERA      Data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

## RESUMO

A manufatura aditiva se diferencia dos processos tradicionais por adicionar material em camadas finas em vez de subtrair. Essa abordagem permite a produção de peças complexas ou personalizadas com menos etapas e economia de material. No entanto, enfrenta desafios devido aos ciclos térmicos, variáveis que podem afetar a microestrutura e as propriedades mecânicas. Este trabalho se propôs a caracterizar mecânica e metalurgicamente amostras fabricadas por manufatura aditiva por deposição ao arco (MADA) do ER 316 L. Análises químicas, microestruturais e mecânicas mostraram que as peças produzidas por MADA têm microestrutura ferrítica-austenítica com diferentes morfologias de ferrita, ao contrário da estrutura austenítica do material convencional. As microestruturas menores resultam em maior microdureza e limite de escoamento, mas menor ductilidade, devido à anisotropia e variabilidade das microestruturas. Em resumo, enquanto MADA oferece vantagens em design e economia de material, otimizar a qualidade e desempenho requer uma compreensão detalhada dos processos para enfrentar os desafios de propriedades mecânicas.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva; MADA; ER 316 L; Aço Inoxidável; Microestrutura.

## **ABSTRACT**

*Additive manufacturing differs from traditional processes by adding material in thin layers instead of subtracting it. This approach allows the production of complex or customized parts with fewer steps and material savings. However, it faces challenges due to thermal cycling, variables that can affect the microstructure and mechanical properties. This work aimed to characterize mechanically and metallurgically samples manufactured by arc deposition additive manufacturing (WAAM) of ER 316 L. Chemical, microstructural and mechanical analyses showed that the parts produced by WAAM have a ferritic-austenitic microstructure with different ferrite morphologies, unlike the austenitic structure of the conventional material. The smaller microstructures result in higher microhardness and yield strength, but lower ductility, due to the anisotropy and variability of the microstructures. In summary, while WAAM offers advantages in design and material savings, optimizing quality and performance requires a detailed understanding of the processes to address the challenges of mechanical properties.*

**Keywords:** *Additive manufacturing; WAAM; ER 316 L; Stainless steel; Microstructure.*

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> - Impulsionador de bomba centrífuga .....	16
<b>Figura 2</b> - Processos de soldagem GMAW .....	18
<b>Figura 3</b> - Figura esquemática da fonte de soldagem .....	21
<b>Figura 4</b> - Esquemática da reversão de alimentação do arame no processo CMT .....	23
<b>Figura 5</b> - Execução da manufatura aditiva com resfriamento por água .....	24
<b>Figura 6</b> - Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA.....	25
<b>Figura 7</b> - Diagrama esquemático dos modos de solidificação.....	26
<b>Figura 8</b> - Diagrama de Schaeffler.....	36
<b>Figura 9</b> - Fluxograma com as principais variações a partir do aço inoxidável austenítico AISI 304 .....	38
<b>Figura 10</b> - Progressão de fabricação do corpo de prova.....	42
<b>Figura 11</b> - Preparação do corpo de prova.....	43
<b>Figura 12</b> - Sequência de soldagem do corpo de prova .....	43
<b>Figura 13</b> - Sequência de soldagem do corpo de prova .....	44
<b>Figura 14</b> - Soldagem do corpo de prova .....	44
<b>Figura 15</b> - Planos de corte do corpo de prova.....	45
<b>Figura 16</b> - Graus de liberdade do eixo do robô .....	49
<b>Figura 17</b> - Tempo de parada da programação.....	51
<b>Figura 18</b> - Termômetro digital Fluke .....	52
<b>Figura 19</b> - Imagem da câmera termográfica.....	52
<b>Figura 20</b> - Gráfico tensão deformação .....	53
<b>Figura 21</b> - Máquina universal de tração .....	54
<b>Figura 22</b> - Corpo de prova de tração .....	55
<b>Figura 23</b> - Dimensionamento do entalhe e corpo de prova.....	56
<b>Figura 24</b> - Plano de corte das amostras do CP de manufatura aditiva .....	57
<b>Figura 25</b> - Equipamento de ensaio Charpy.....	57
<b>Figura 26</b> - Plano de corte das amostras de ensaio para dobramento.....	58
<b>Figura 27</b> - Máquina de dobramento .....	59
<b>Figura 28</b> - Ilustração do dimensionamento conforme ASTM E 290 (2022) .....	60
<b>Figura 29</b> - Durômetro.....	61
<b>Figura 30</b> - Software Axion Vision SE 64 e microscópio ZEISS Axion 10.....	62
<b>Figura 31</b> - Embutidora Fatec Itaquera .....	63
<b>Figura 32</b> - Amostra (1) superior ao corpo de prova, amostra dois (2) central ao corpo de prova e amostra três (3) inferior ao corpo de prova todas retiradas transversalmente .....	64
<b>Figura 33</b> - Lixadeira / Politriz Fortel.....	64
<b>Figura 34</b> - Solução reagente Kalling .....	65
<b>Figura 35</b> - Espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva .....	66
<b>Figura 36</b> - Estereoscópio ZEISS modelo AXION.....	67
<b>Figura 37</b> - Corpos de prova do ensaio de tração rompidos .....	69
<b>Figura 38</b> - Corpos de prova Charpy rompido.....	71
<b>Figura 39</b> - Corpo de prova após ensaio de dobramento .....	72
<b>Figura 40</b> - Imagem representativa de uma marca de dureza Vickers .....	73
<b>Figura 41</b> - Estrutura de solidificação.....	75
<b>Figura 42</b> - Amostra central (ferrita colunar) .....	75
<b>Figura 43</b> - Amostra inferior (ferrita vermicular).....	76

<b>Figura 44</b> - Amostra superior (ferrita e austenita).....	76
<b>Figura 45</b> - Amostra central (análise de inclusões).....	78
<b>Figura 46</b> - Amostra central (análise macrográfica).....	79

## Índice de tabelas

<b>Tabela 1</b> - Resumo dos nomes dos processos.....	13
<b>Tabela 2</b> - Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis em relação aos aços.....	37
<b>Tabela 3</b> - Composição química do aço AISI 304 L.....	40
<b>Tabela 4</b> - Propriedades mecânicas do aço AISI 304 L.....	40
<b>Tabela 5</b> - Composição química do ER 316 L.....	41
<b>Tabela 6</b> - Propriedades mecânicas do ER 316 L.....	41
<b>Tabela 7</b> - Dimensões corpo de prova tamanho reduzido.....	55
<b>Tabela 8</b> - Dimensões e tolerâncias do corpo de prova Charpy.....	56
<b>Tabela 9</b> - Resultados dos ensaios de tração das amostras de aço ER 316 L fabricadas por MADA - CP Longitudinais.....	69
<b>Tabela 10</b> - Resultados dos ensaios de tração das amostras de aço ER 316 L fabricadas por MADA - CP Transversais.....	69
<b>Tabela 11</b> - Resultados do ensaio de Charpy CPs Transversais.....	70
<b>Tabela 12</b> - Resultados de ensaio de Charpy CPs Longitudinais.....	70
<b>Tabela 13</b> - Resultados de ensaio de dureza Vickers.....	72
<b>Tabela 14</b> - Comparação de valores normativo com o do corpo de prova.....	74
<b>Tabela 15</b> - Tabela de composição química via EDS.....	77

## Lista de siglas e símbolos

AISI- American Iron and Steel Institute (Instituto Americano do Ferro e Aço)  
AC - Corrente Elétrica (Ampères)  
AF - Ferrita Eutética  
ARM - Avanço de Movimento do Robô  
ASME - American Society of Mechanical Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)  
AWS - American Welding Society (Sociedade Americana de Soldagem)  
CAD - Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)  
C - Carbono  
CFC - Cúbica de Face Centrada  
CMT - Cold Metal Transfer (Transferência de Metal a Frio)  
Cr - Cromo  
 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  - Óxido de Cromo  
 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  - Carboneto de Cromo  
CP - Corpo de prova  
CPT - Temperatura Crítica de Pite (Critical Pitting Temperature)  
CCT - Temperatura Crítica de Corrosão em Frestas (Critical Crevice Temperature)  
DED - Deposição de Energia Dirigida  
ED - Ensaio Destrutivo  
EDS - Espectroscopia por Descarga Luminescente (Glow Discharge Spectroscopy)  
Fe - Ferro  
FN - Ferrite Number (Número de Ferrita)  
FDM - Modelagem por Deposição Fundida  
GMAW - Gas Metal Arc Welding (Soldagem a Arco de Gás Metálico)  
GTAW - Gas Tungsten Arc Welding (Soldagem a Arco de Gás Tungstênio)  
HV - Hardness Vickers (Dureza Vickers)  
HB - Hardness Brinell (Dureza Brinell)  
HRC - Hardness Rockwell (C Scale) (Dureza Rockwell - Escala C)  
IV - 4  
k/s - Quilo por Segundo  
kV - Quilovolt (Unidade de medida de tensão elétrica)  
L/min - Litros por Minuto

MA - Manufatura Aditiva  
MADA - Manufatura Aditiva por Deposição a Arco  
MAG - Metal Active Gas (Gás Ativo de Metal)  
MIG - Metal Inert Gas (Gás Inerte de Metal)  
mA - Milliampere (Unidade de medida de corrente elétrica)  
m/min - Metros por Minuto  
m/s - Metros por Segundo  
Mn - Manganês  
Mo - Molibdênio  
mm - Milímetro  
mm/min - Milímetro por Minuto  
M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> - Carbetos  
Nb - Nióbio  
NbC - Carboneto de Nióbio  
Ni - Níquel  
Nieq - Níquel Equivalente  
PS - Plano de Soldagem  
Rh - Ródio  
SLA- Estereolitografia  
Si - Silício  
SLS - Sinterização Seletiva a Laser  
Ti - Titânio  
U - Tensão  
V - Vanádio  
W - Tungstênio  
XX - 20  
δ- Delta  
χ- Chi  
σ - Sigma

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	15
1.2. OBJETIVO GERAL .....	17
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2. REVISÃO LITERÁRIA.....</b>	<b>17</b>
2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW .....	17
2.1.1. <i>Equipamento de soldagem</i> .....	19
2.1.2. <i>Unidade de alimentação de arame (cabecote)</i> .....	20
2.1.3. <i>Pistola de soldagem</i> .....	20
2.1.4. <i>Gás protetor e sistema de alimentação</i> .....	20
2.1.5. <i>Arame eletrodo</i> .....	20
2.2. MANUFATURA ADITIVA .....	21
2.2.1. <i>Manufatura aditiva por deposição a arco</i> .....	22
2.3. AÇO INOXIDÁVEL.....	25
2.3.1. <i>Propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos</i> .....	29
2.3.2. <i>Desafios na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos</i> .....	29
2.3.3. <i>Formação de carbonetos e corrosão intergranular</i> .....	30
2.3.4. <i>Influência dos elementos de liga na formação de carbonetos e corrosão intergranular</i> .....	30
2.4. AÇO INOXIDÁVEL ER 316 L.....	31
2.4.1. <i>Propriedades microestruturais e mecânicas do ER 316 L</i> .....	32
2.4.2. <i>Aplicações e vantagens do ER 316 L na manufatura aditiva</i> .....	32
2.5. RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA E ADITIVOS DE LIGA .....	33
2.6. NORMAS E PADRÕES DE QUALIDADE .....	35
2.7. APLICAÇÕES E PROPRIEDADES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS .....	36
2.8. ANÁLISE DE CONFORMIDADE COM NORMAS .....	38
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
3.1. METAL DE BASE (SUBSTRATO).....	40
3.2. CONSUMÍVEL .....	41
3.2.1. <i>Propriedades mecânicas - ER316L</i> .....	41
3.3. PLANEJAMENTO DE EXECUÇÃO DO CORPO DE PROVA .....	41
3.4. PRODUÇÃO DO CORPO DE PROVA .....	43
3.5. ENSAIOS DESTRUTIVOS .....	45
3.6. ENSAIOS MECÂNICOS .....	45
3.7. EQUIPAMENTOS E CÉLULA DE TRABALHO: DESCRIÇÃO DO ROBÔ INDUSTRIAL E DA CÉLULA UTILIZADA .....	46
3.7.1. <i>Definição de robô</i> .....	46
3.7.2. <i>Histórico sobre robôs na indústria</i> .....	46
3.7.3. <i>Robôs industriais para soldagem GMAW</i> .....	47
3.7.4. <i>Descrição do robô motoman yaskawa ar 2010</i> .....	48
3.8. VARIÁVEIS DE CONTROLE DO PROCESSO. ....	50
3.9. ENSAIO DE TRAÇÃO .....	53
3.10. ENSAIO CHARPY.....	55
3.11. ENSAIO DE DOBRAMENTO .....	58
3.12. ENSAIO DE DUREZA.....	60
3.12.1. <i>Ensaio de dureza Vickers</i> .....	61
3.13. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MACROESTRUTURAL .....	62
3.13.1. <i>Preparação das amostras</i> .....	63
3.13.2. <i>Ataque químico</i> .....	65

3.13.3.	<i>Análise microestrutural</i> .....	65
3.13.4.	<i>Análise macroestrutural</i> .....	66
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
4.1.	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	68
4.2.	ENSAIO CHARPY.....	69
4.3.	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	71
4.4.	ENSAIO DE DUREZA.....	72
4.5.	CARATERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MACROESTRUTURAL.....	26
4.5.1.	<i>Principais modos de solidificação e microestruturas</i> .....	26
4.5.2.	<i>Macrografia</i> .....	77
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>80</b>
<b>6.</b>	<b>CRONOGRAMA</b> .....	<b>82</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>83</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas as tecnologias de manufatura aditiva (MA), também conhecidas como impressão 3D de materiais metálicos, têm atraído atenção significativa em diferentes e diversas áreas das indústrias metalmeccânica. O processo de MA iniciasse com o modelamento matemático do sólido que se deseja construir, através de softwares de desenho técnico e com ajuda de computadores, posteriormente ele é fatiado em múltiplas camadas e codificado para uma linguagem de programação própria do sistema de impressão a ser usado, para gerar um caminho da tocha ferramenta para o sistema de impressão. Depois disso, o componente 3D é produzido reproduzindo o programa em camadas de acordo com os dados do modelo fatiado. Além do modelo fatiado, dois elementos principais são necessários para construir uma peça: a matéria-prima (pó metálico ou arame fio) e uma fonte de calor, que pode ser um laser, feixe de elétrons ou arco elétrico segundo Saboori *et al.* (2020).

Em geral, os sistemas MA são categorizados em duas classes diferentes: sistemas de leito de pó e sistemas de alimentação de arame fio. Em sistemas de leito de pó, uma camada de pó é espalhada na plataforma ou cuba do sistema de impressão, onde esse por sua vez sofre a aplicação de energia focada e precisa na área a ser fundida. A capacidade de reproduzir com precisão e alta resolução bem como o controle dimensional da peça que se deseja construir dependerá da fonte de energia. Em contrapartida, nos sistemas de alimentação por arame fio (MADA), o material é alimentado diretamente dentro de uma poça de fusão que já é formada por uma fonte de calor focalizada no substrato ou na camada já depositada. A deposição de energia dirigida (DED), com processo de alimentação de material, utiliza uma fonte de calor focalizada, que pode ser um laser ou um feixe de elétrons ou arco elétrico e um material que é arame fio enquanto é entregue diretamente na poça de fusão. Deve-se destacar também que na literatura geralmente são relatados diferentes nomes para este processo de acordo com Feriotti *et al.* (2021). Na Tabela 1 abaixo observa-se um resumo desses nomes.

**Tabela 1** - Resumo dos nomes dos processos.

<b>VAT PHOTOPOLYMERISATION</b>	<b>FOTOPOLIMERIZAÇÃO</b>
Material Jetting	Impressão por Jato de Material
Binder Jetting	Impressão 3D de aglomerante
Material Extrusion	Deposição de Material Fundido
Power Bed Fusion	Fusão em camada de pó
Sheet Lamination	Laminação de Folhas
Directed Energy Deposition	Deposição direta de energia

**Fonte:** Adaptado de Feriotti (2021)

Dentro do processo de deposição direta de energia (DED) temos ainda o processo manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), onde este padrão de deposição é definido pelo movimento relativo entre o substrato e a cabeça de deposição. Esse movimento pode ser obtido movendo apenas a cabeça de deposição, apenas o substrato ou ambos, o substrato e a cabeça de deposição, o método utilizado depende principalmente do tamanho e da geometria da peça a ser construída.

Em particular, no processo MADA, que é conhecido como o processo mais versátil, a alimentação de arame fio pode ser implementada por meio de uma única cabeça de deposição (tocha). Apesar dos méritos acima mencionados, o processo MADA apresenta baixa eficiência limitando-se a taxa de deposição relativa à transferência metálica empregada no processo de soldagem (GMAW) arco elétrico com gás de proteção, a superfície rugosa final que deve ser usinada após o processo de construção. Além disso, trabalhos anteriores demonstraram que o histórico de aporte térmico de uma peça produzida através do processo MADA tem um efeito marcante na microestrutura e no desempenho mecânico dos componentes. Portanto, a qualidade das peças produzidas por MADA é definida principalmente pelos parâmetros de construção utilizados durante o processo. É bem conhecido que muitos parâmetros podem ser variados no processo GMAW, e estes incluem: corrente (A); tensão (U); velocidade de arame (m/min.), fluxo do gás (l/min.).

Nos últimos anos, os aços inoxidáveis têm sido intensamente processados por tecnologias de MA, principalmente devido às elevadas propriedades mecânicas que os tornam adequados, para uma ampla gama de aplicações em diversas áreas das indústrias, como os setores automotivo, aeroespacial e petroquímico. O aço ER

316 L é de longe o mais processado e estudado, e seu sucesso está relacionado principalmente à sua soldabilidade, resistência à corrosão e a propriedades mecânicas. Entre as tecnologias MA, o processo GMAW é o que pode proporcionar um elevado grau de flexibilidade na concepção e produção de grandes componentes fabricados com o metal de adição ER 316 L. Na verdade, as peças de grandes complexidades podem ser produzidas através do processo MADA com redução de peso e desperdício de material inicial. Nos últimos anos, surgiu um crescente corpo de literatura científica no qual a correlação entre os parâmetros de processo e microestrutura e as propriedades mecânicas do aço inoxidável produzido por MADA ER 316 L, foi estudada por Yadollahi *et al.* (2015), onde também foi estudado por Saboori *et al.* (2020) a influência do intervalo de tempo entre a deposição das camadas e as propriedades mecânicas do DED ER 316 L.

Entre as ligas metálicas aplicadas na manufatura aditiva está o aço inoxidável austenítico 316 L, que apresenta excelente resistência à corrosão e oxidação, boa resistência mecânica e boa conformabilidade conforme estudado por Kale *et al.* (2020). Essa liga apresenta microestrutura completamente austenítica em condições padrões de fabricação, entretanto, os ciclos de fusão e solidificação que ocorrem durante a MA criam condições de não equilíbrio e podem favorecer a precipitação de fases secundárias, como ferrita ultrafina como demonstrado nos estudos de Jeong *et al.* (2021). Há relatos na literatura também de haver a formação de uma microestrutura com a precipitação da ferrita, como fase primária e a austenita como fase secundária, como de acordo com os estudos de Wang *et al.* (2020).

Essas alterações na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do aço inoxidável 316 L, ocorrem devido as altas taxas de solidificação entre 103 K/s e 106 K/s como demonstrado no estudo de Debroy *et al.* (2018), que ocorrem nas técnicas de manufatura aditiva. E assim como relatado por diversos autores, fatores como composição química e velocidade de solidificação são importantes variáveis de processo que afetam o modo de solidificação dos aços inoxidáveis, como discutido nos estudos de Farshidianfar *et al.* (2016), Guilherme (2016), Kou (2003), Lippold *et al.* (2005), Pessanha (2011) e Suutala *et al.* (1980).

## 1.1. Justificativa

O processo MADA é uma tecnologia emergente da manufatura aditiva na linha da energia depositada direcionada (DED), com grande potencial para a produção de peças complexas e de alta performance, trazendo economia e sustentabilidade. Esse processo é especialmente relevante na fabricação de componentes expostos a ambientes agressivos, como o impulsor de uma bomba hidráulica utilizado em sistemas que lidam com componentes químicos cloretados, onde o desgaste por corrosão química é uma preocupação crítica.

Em ambientes que contêm resíduos à base de cloro, o aço inoxidável pode sofrer corrosão, afetando sua camada passivadora e resultando em falhas prematuras dos componentes. A capacidade do processo MADA de produzir peças com geometrias otimizadas e microestruturas controladas permite o desenvolvimento de soluções inovadoras para mitigar esses problemas. Segundo Cunningham *et al.* (2017), o processo MADA oferece um grande potencial econômico em comparação aos métodos de fabricação convencionais, como usinagem e fundição, proporcionando maior durabilidade e resistência à corrosão.

Além disso, o uso do processo MADA na fabricação de componentes para aplicações críticas, como sistemas hidráulicos em ambientes cloretados, abre caminho para um futuro industrial mais eficiente e sustentável. A otimização dos tempos de ciclo, a redução de custos e a automatização de atividades são fatores que contribuem diretamente para a competitividade das empresas, ao mesmo tempo que diminuem o consumo de energia, a geração de resíduos e a emissão de poluentes.

A aplicação se destina à fabricação de impulsores destinados as bombas que trabalhem em ambientes com altas concentrações de cloretos como empresas de saneamento básico (Figura 1).

**Figura 1-** Impulsor de bomba centrífuga



**Fonte:** Adaptado de FESM (2012)

## **1.2. Objetivo geral**

Dessa forma, o objetivo geral desse trabalho é analisar a macroestrutura, microestrutura e o comportamento mecânico do aço inoxidável ER 316 L fabricado pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA).

## **1.3. Objetivos específicos**

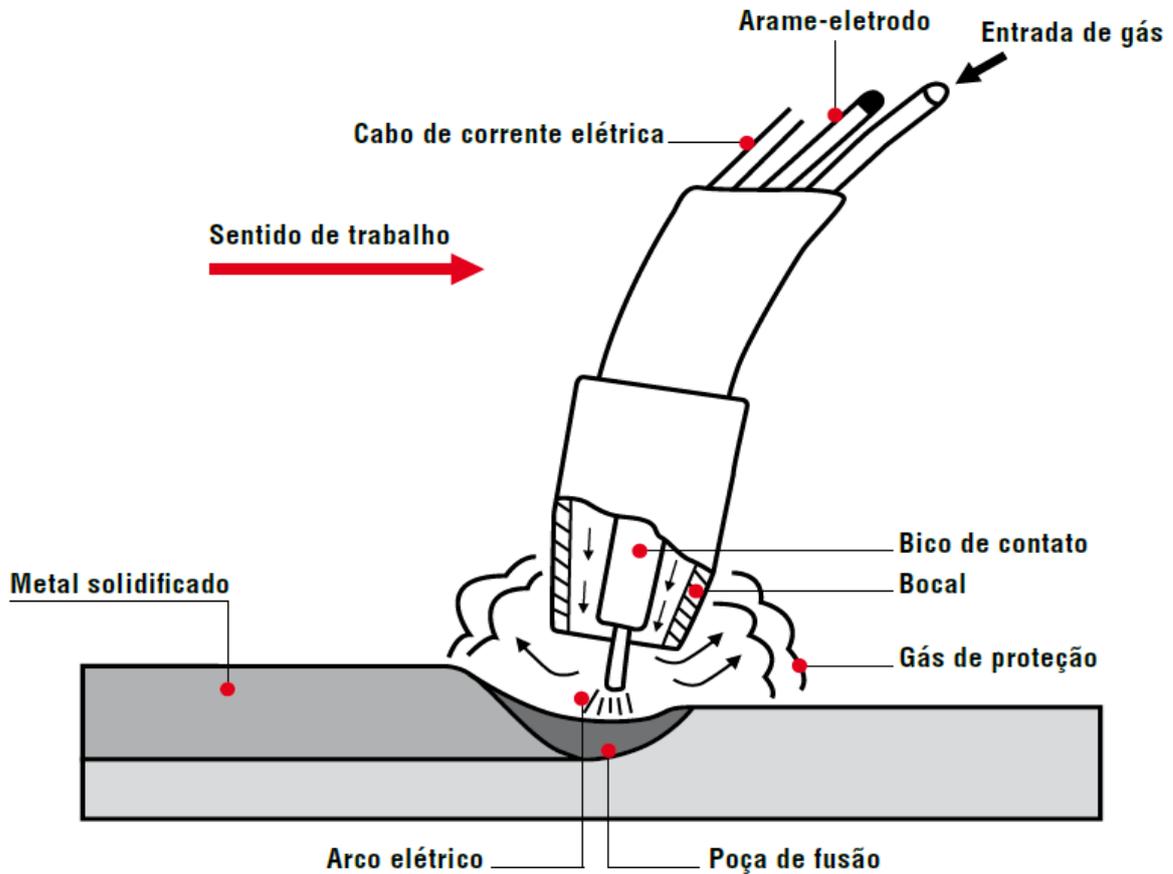
- Caracterizar a macroestrutura e a microestrutura das amostras e verificar se corresponde ao modo de solidificação previsto com base na composição química;
- Analisar o ensaio de tração, o escoamento, a ductibilidade e a dureza da amostra e verificar se houve uniformidade nas medições.

## **2. REVISÃO LITERÁRIA**

### **2.1. Processo de soldagem GMAW**

A tecnologia GMAW (Gas Metal Arc Welding), introduzida por volta de 1920 e inicialmente denominada MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas), trouxe uma revolução significativa ao campo da soldagem como estudado por Barbedo (2011). Comumente referido como MIG/MAG (Figura 2), esse método se destaca por sua ampla aplicação na indústria, caracterizada pelo uso de um eletrodo consumível para fundir e gerar gotas metálicas destinadas à deposição como estudado por Machado (1996).

**Figura 2 - Processos de soldagem GMAW**



Fonte: SENAI CIMAT (2012)

A transferãncia de metal nesse processo ocorre em trãs modos principais, os quais sãõ influenciados por variãveis como corrente (A), tensãõ (U) e diãmetro do eletrodo. O modo de curto-circuito envolve o contato direto do eletrodo com a peãa, gerando um curto-circuito controlado para a transferãncia de metal como descrito no estudo de Machado (1996). Jã no modo de transferãncia globular, o eletrodo se aproxima da peãa sem tocã-la, resultando na formaãõ de gotas mãdias que sãõ transferidas por gravidade, sendo adequado para soldagem de chapas mais espessas e materiais que exigem maior penetraãõ segundo Machado (1996).

Por fim, o modo de transferãncia por aerossol ou spray mantãem o eletrodo e a peãa a uma distãncia constante, gerando um arco estãvel e transferindo partãculas finas em forma de spray, garantindo alta qualidade e precisãõ dimensional como demonstrado por Machado (1996). O processo GMAW oferece uma taxa de deposiãõ de metal elevada, promovendo uma soldagem rãpida e eficiente. Segundo Villani (2006) sua adaptabilidade às exigãncias especãficas de cada projeto permite a

automação, semi automação ou execução manual, conferindo uma notável flexibilidade em sua aplicação.

Essa versatilidade tem contribuído significativamente para a sua difusão na indústria de manufatura aditiva, onde a precisão e a eficiência são requisitos fundamentais. Ao analisar o processo GMAW, é imprescindível considerar suas variáveis influentes, tais como corrente de soldagem, tensão do arco, polaridade de soldagem, entre outras como estudado por Hermans *et al.* (1999).

Assim como estudado por Vieira (2006) o controle preciso dessas variáveis é essencial para garantir soldas de qualidade satisfatória, embora não exista uma fórmula única para atingir o resultado ideal em todas as situações. Investir em conhecimento e experiência na seleção dos parâmetros é fundamental para obter resultados consistentes e de alta qualidade. A soldagem GMAW se destaca por sua versatilidade, permitindo a união de diversos tipos de metais e proporcionando soldas de alta qualidade, com boa penetração e acabamento uniforme conforme Fortes (2005).

### **2.1.1. Equipamento de soldagem**

Os principais componentes do sistema de soldagem incluem:

- Fonte de energia;
- Unidade de refrigeração para a tocha e cabos;
- Unidade de alimentação de arame e seus controles (Cabeçote);
- Pistola de soldagem e seus cabos (Tocha);
- Gás protetor e seu sistema de alimentação e
- Arame eletrodo.

Para a maioria das aplicações de soldagem MIG/MAG, são utilizadas fontes de corrente contínua com tensão constante. No entanto, os avanços recentes na tecnologia de soldagem introduziram os inversores de soldagem, que oferecem uma alternativa mais eficiente e compacta em comparação com as fontes de energia tradicionais. Os inversores de soldagem convertem a corrente alternada de entrada em corrente contínua de alta frequência, proporcionando maior estabilidade do arco e controle preciso sobre o processo de soldagem.

### **2.1.2. Unidade de alimentação de arame (cabeçote)**

A unidade de alimentação de arame, integrada aos inversores de soldagem, oferece recursos avançados de controle e monitoramento. Além da alimentação constante do arame, os cabeçotes de alimentação agora incluem tecnologias de retroalimentação de informações em tempo real, como sensores de tensão e corrente, que ajustam automaticamente os parâmetros de soldagem para garantir uma operação consistente e de alta qualidade.

### **2.1.3. Pistola de soldagem**

As pistolas de soldagem para uso com inversores de soldagem são projetadas para oferecer maior ergonomia e precisão. Com componentes mais leves e compactos, essas pistolas permitem uma manipulação mais fácil e confortável durante a soldagem.

### **2.1.4. Gás protetor e sistema de alimentação**

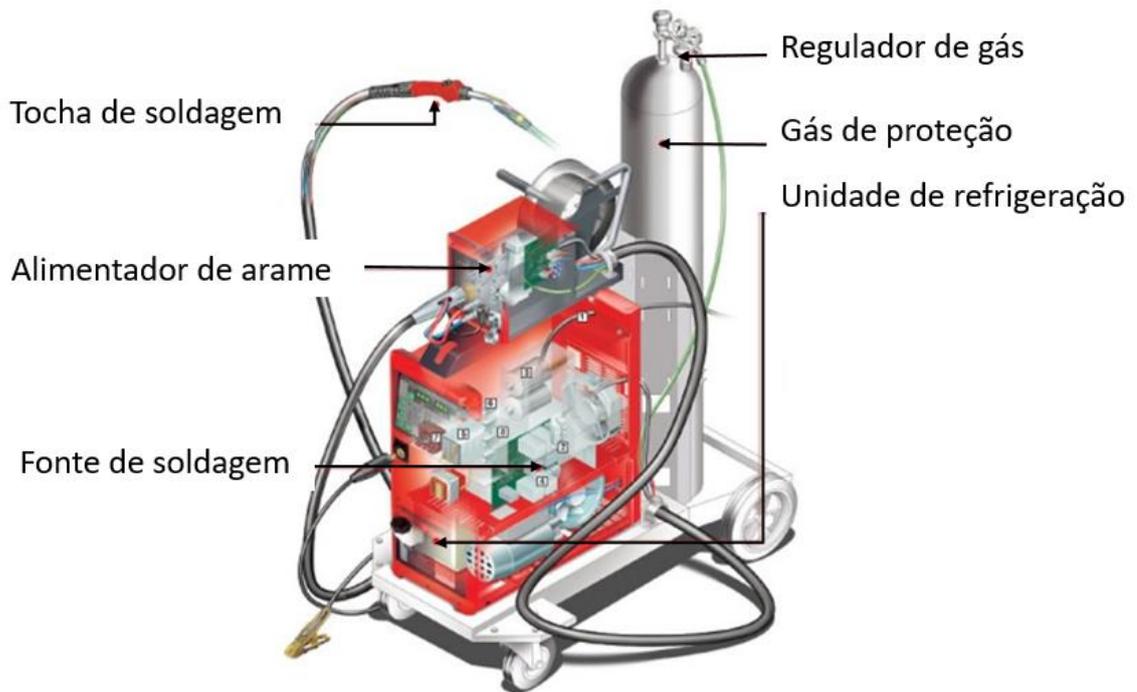
Os sistemas de alimentação de gás protetor foram aprimorados para oferecer uma distribuição mais uniforme do gás ao redor da poça de fusão. Válvulas de controle avançadas e sistemas de mistura de gases garantem uma proteção eficaz contra a contaminação atmosférica e contribuem para a melhoria da qualidade da solda. Além disso, os sistemas de alimentação agora podem ser integrados aos inversores de soldagem, proporcionando uma operação mais eficiente e simplificada.

### **2.1.5. Arame eletrodo**

Os avanços na metalurgia dos arames eletrodos oferecem uma variedade maior de opções para atender às demandas específicas de cada aplicação. Arames de alta resistência, com composições químicas otimizadas, proporcionam uma maior capacidade de carga e resistência à fadiga, resultando em soldas mais duráveis e confiáveis. Além disso, os arames eletrodos agora podem ser revestidos com materiais especiais para melhorar a proteção contra a corrosão e aumentar a

resistência a ambientes agressivos, na Figura 3 podemos ver um esquema do sistema de soldagem utilizado no processo GMAW.

**Figura 3** - Figura esquemática da fonte de soldagem



**Fonte:** Adaptado de Fronius (2024)

## 2.2. Manufatura aditiva

A manufatura aditiva representa uma técnica inovadora oferecendo diversas vantagens para a produção imediata de itens sem a necessidade de moldes. Integrada à impressão 3D, essa tecnologia está revolucionando os processos industriais, tornando-os mais eficientes e econômicos conforme os estudos de Schwab (2016); Volpato (2017); Santos (2021).

A essência da manufatura aditiva reside em seu uso do desenho assistido por computador (CAD) e scanners 3D para criar objetos adicionando camadas de material, como metal e plástico. Ao contrário dos métodos tradicionais, essa abordagem não envolve a remoção de material durante a fabricação (manufatura

subtrativa), o que pode reduzir os custos, eliminar erros e aumentar a agilidade e precisão da produção em série. Esta técnica encontra aplicação em setores que demandam personalização e precisão, como a saúde e a indústria aeroespacial como afirmado nos estudos de Volpato (2017); Santos (2021).

Embora frequentemente associada à impressão 3D, a manufatura aditiva difere-se dessa tecnologia ao se concentrar na produção de componentes complexos e duráveis em um contexto industrial, utilizando materiais como metal. Existem várias técnicas em constante evolução, incluindo a estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a laser (SLS), modelagem por deposição fundida (FDM), jateamento de aglutinantes (Binder Jetting) e PolyJet ou Material Jetting assim como abordado nos estudos de Silva (2023); Da Silva (2023).

Para implementar a manufatura aditiva, as empresas precisam de software de modelagem 3D (CAD), equipamentos de manufatura aditiva e matéria-prima adequada.

Segundo Franco (2019) este processo envolve a criação de um modelo digital, sua conversão para um formato adequado, transferência para a impressora 3D e produção em série do objeto desejado. As vantagens da manufatura aditiva incluem precisão no design e produção, flexibilidade, redução de custos logísticos e de manufatura, e personalização do produto.

No entanto, também apresenta desafios, como custo inicial elevado, uso limitado de materiais e possíveis descontinuidades na superfície das peças assim como explicado no estudo de Souza (2023). Indústrias como saúde, aeroespacial e automotiva estão adotando a manufatura aditiva para reduzir custos operacionais, melhorar a eficiência logística e garantir a qualidade dos produtos finais. Essa técnica permite a produção em série e personalizada, atendendo às demandas dos clientes de forma ágil e precisa como abordado no estudo feito por Ribeiro *et al.* (2022).

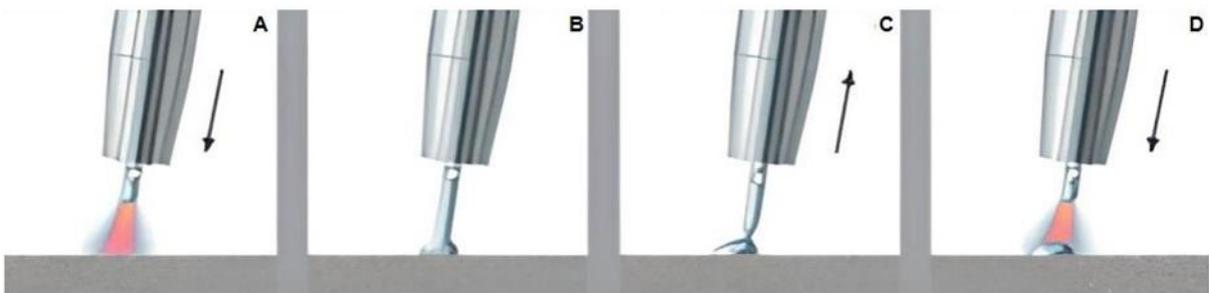
### **2.2.1. Manufatura aditiva por deposição a arco**

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) representa uma técnica inovadora na indústria de manufatura, empregando o arco elétrico como fonte de calor para construir peças complexas camada por camada. Esse método pode empregar dois principais processos: gas metal arc welding (GMAW) e gas tungsten arc welding (GTAW), ambos utilizando o arco elétrico como fonte de calor e proteção gasosa. O

GMAW, em particular, emprega um eletrodo consumível, aquecido por efeito Joule, para iniciar a transferência metálica através de gotas metálicas em estado líquido. Dentro do processo GMAW, a transferência de metal ocorre em três modos principais: curto-circuito, globular e aerossol, os quais são influenciados pelos parâmetros de soldagem e pela quantidade de energia utilizada conforme estudos de Machado (1996).

Segundo estudos de Selvi *et al.* (2018) uma variante comum desse processo, frequentemente utilizada na MADA, é o cold metal transfer (CMT), tecnologia de transferência metálica patenteada pela empresa austríaca Fronius, que envolve uma transferência metálica semelhante a um curto-circuito, mas com uma reversão da alimentação de arame quando ocorre o contato do metal de adição com a poça de fusão assim como podemos ver na Figura 4.

**Figura 4** - Esquemática da reversão de alimentação do arame no processo CMT



Fonte: Adaptado de Fronius (2024)

O MADA se destaca por sua flexibilidade de design, possibilitando a criação de geometrias complexas e personalizadas, sem as restrições dos métodos tradicionais como usinagem e fundição, tais limitações e implicações foi estudado por Haselehun *et al.* (2016). Além disso, esse processo reduz o desperdício de material pois, podem ser impressos peças com um nível de sobre metal muito baixo ou até mesmo em sua medida final possibilitando a fabricação sob demanda e diminuindo assim o tempo e custo de produção, e permitindo a consolidação de peças precisas conforme estudo de Hu *et al.* (2018).

O processo MADA é uma técnica de fabricação que utiliza um arco elétrico para fundir material, permitindo a produção de peças de diversos tipos de materiais metálicos como mostrado no estudo de Silva (2020).

O desenvolvimento da deposição a arco teve seu marco inicial em 1925, quando Ralph Baker patenteou um método inovador de construção de recipientes metálicos, depositando camadas de metal através do controle preciso de um arame como demonstrado por Rault, *et al.* (2020) desde esta época várias pesquisas e inovações foram direcionadas para esta nova técnica. Entretanto segundo Wu *et al.* (2019) esta técnica ainda é pouco comercializada industrialmente em todo o mundo e em todo o seu potencial.

Segundo os estudos de Silva (2020) a alta taxa de deposição do MADA, apesar de ser um grande benefício, traz consigo um desafio, o acúmulo de calor que por sua vez em excesso pode gerar diversos problemas durante a deposição das camadas. À medida que as camadas vão sendo depositadas, o acúmulo de calor passa a ser mais significativo como demonstrado pelo estudo de Yang *et al.* (2017). A Figura 5, demonstra um exemplo de manufatura aditiva à arco com controle de resfriamento, a técnica foi desenvolvida pela Universidade Federal Uberlândia em parceria com a Petrobrás foi patentada pelo instituto Laprosolda em 2020.

**Figura 5** - Execução da manufatura aditiva com resfriamento por água



**Fonte:** Laprosolda (2020)

O aumento de temperatura em excesso pode causar diversos efeitos na estrutura da camada depositada, como o aumento da espessura, uma oxidação intensa e modificações metalúrgicas indesejáveis que podem comprometer as características mecânicas dos materiais assim como estudado por Wu *et al.* (2017).

Por esse motivo, pesquisas que visem aprimorar e controlar de forma mais eficaz as variáveis do processo são fundamentais para a fabricação de componentes com maior resistência mecânica e com precisão geométrica adequada, conforme exemplo na Figura 6, sendo imprescindível possuir um conhecimento abrangente do processo, que abarca fenômenos interdisciplinares complexos, para garantir um controle preciso das variáveis e, por conseguinte, do processo de fabricação conforme afirmado por Li *et al.* (2022).

**Figura 6** - Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA.



Fonte: Rosa (2020)

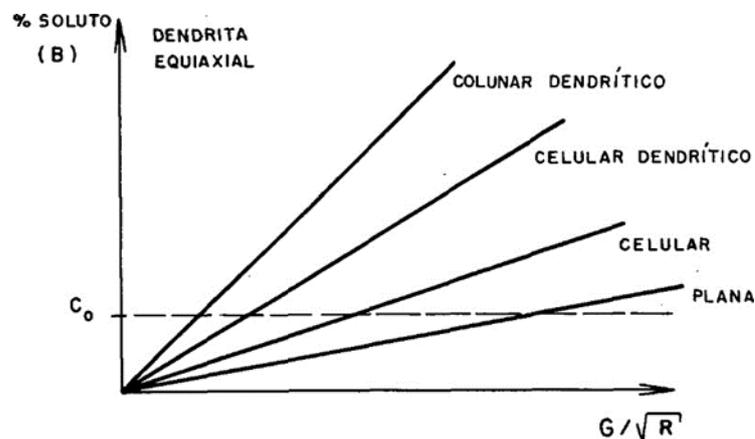
### 2.3. Aço inoxidável

O aço inoxidável tem sido extensivamente estudado em diversos trabalhos de pesquisa para modificações e revestimentos de superfície. Estudos como os feitos por Mingareev *et al.* (2013); Lindner *et al.* (2022) mostraram que técnicas de revestimento, como a deposição de metal a laser com uma camada de  $\text{CoFe}_2\text{Ni}$ , podem melhorar significativamente as propriedades deste material. Esses estudos destacam a importância do aprimoramento das propriedades dos aços através de diferentes técnicas de revestimento e modificação de superfície, com o objetivo de melhorar seu desempenho e longevidade em diversas aplicações como abordado nos estudos de Aslam (2022); Sahoo (2022).

## 2.4. Caracterização microestrutural e macroestrutural

Conforme Modenesi (2001), a solidificação em aços inoxidáveis austeníticos pode se dar de diferentes formas, dependendo da composição química e das condições de resfriamento conforme demonstrado na Figura 7. Essa diferenciação resulta em microestruturas que impactam diretamente as propriedades mecânicas e de corrosão do material. De maneira geral, a formação inicial pode ocorrer em austenita ou ferrita primária, sendo a última mais influenciada pela velocidade de resfriamento e pela relação Cr/Ni.

**Figura 7** - Diagrama esquemático dos modos de solidificação



Fonte: Adaptado de (EMÍLIO; BRANDI; MELLO, 2004, p. 377)

### 2.4.1. Principais modos de solidificação e microestruturas

#### 2.4.1.1. Solidificação com austenita primária:

Caracteriza-se por uma tendência maior à segregação, devido à baixa difusividade dos elementos de liga na fase austenítica.

Microestruturas típicas:

Austenita (A): Solidificação direta para austenita, sem formação de ferrita.

Austenita + Ferrita Eutética (AF): Formação de ferrita em contornos de grão ou dendritas durante a etapa final da solidificação.

#### **2.4.1.2. Solidificação com ferrita primária:**

Durante o resfriamento, a ferrita pode se transformar parcialmente em austenita, mas a transformação é incompleta devido ao rápido resfriamento característico da soldagem.

Microestruturas típicas:

Austenita + Ferrita Vermicular (FA): Ferrita localizada ao longo do centro das dendritas.

Austenita + Ferrita Laminar (FA): Lâminas de austenita com ferrita entre elas, característica de resfriamento rápido.

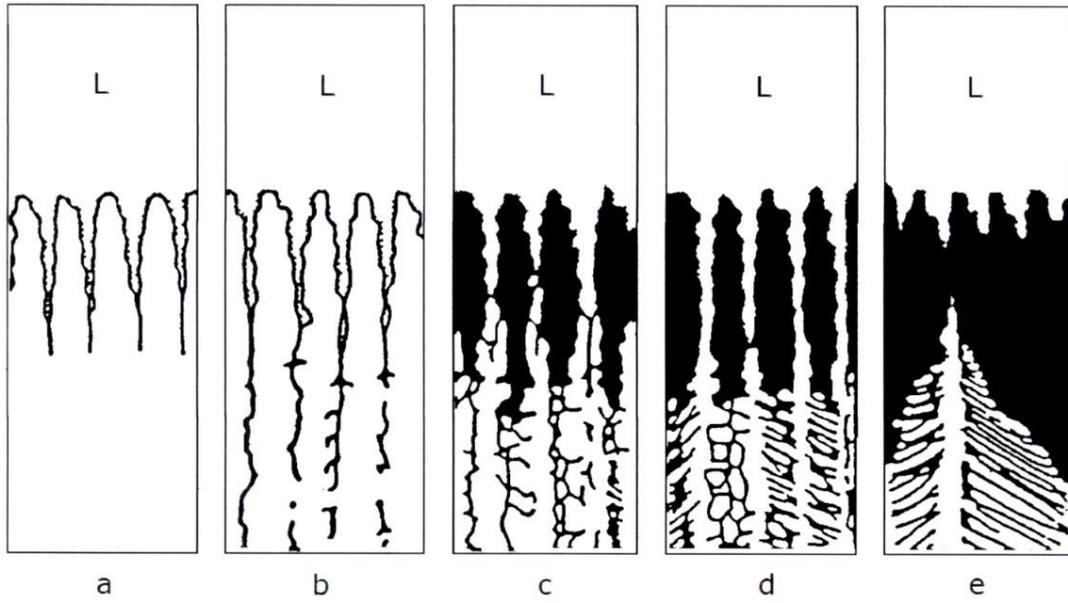
Ferrita + Austenita de Widmanstätten (F): Presente em aços duplex, com austenita nucleando nos contornos de grão da ferrita.

#### **2.4.1.3. Influência da relação Cr/Ni**

Para relações Cr/Ni mais altas, observa-se uma maior quantidade de ferrita remanescente. O número de ferrita ("Ferrite Number", FN) é utilizado para quantificar a presença dessa fase, sendo inferior a 4 em aços solidificados com austenita primária.

Essas características estruturais, como enfatiza Modenesi (2001) conforme Figura 41, influenciam diretamente o desempenho do material em aplicações industriais, especialmente no que tange à resistência mecânica e à corrosão.

**Figura 7** - Representação esquemática do modo de solidificação



**Fonte:** Adaptado de Paulo J. Modenesi (2001)

### **2.4.2. Propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos**

Segundo Sedriks (1996) o AISI 304 é frequentemente considerado o padrão entre os aços inoxidáveis austeníticos, com uma composição química que pode variar para incluir outros elementos de liga, ajustando suas propriedades para diferentes aplicações.

Já os aços inoxidáveis austeníticos 316 L, a exemplo do AISI 304, mantêm uma estrutura monofásica austenítica em uma ampla gama de temperaturas, inclusive em temperaturas ambiente, exibindo alta resistência à corrosão e adequada resistência mecânica conforme Davis (1999). Tendo sido estabelecido como o padrão nesta categoria, o AISI 304 serve como referência para outros tipos de aços inoxidáveis austeníticos, os quais podem variar em sua composição química fundamentalmente.

As aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos, como o 316 L, abrangem desde a produção e manutenção de tanques químicos até usos em estruturas, equipamentos de cozinha e objetos decorativos, devido à sua alta resistência à corrosão e estética superior conforme Lippold (2005).

A soldagem desses aços é viável através de diversos processos disponíveis comercialmente, sendo comum o uso de arames do tipo ER 316 L como material de adição para o AISI 316 L conforme Chiaverini (2005).

### **2.4.3. Desafios na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos**

Devido às suas características físicas, o comportamento de soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos pode diferir de outros materiais. Por exemplo, o aço inoxidável austenítico possui baixa condutividade térmica em comparação com o aço de baixo carbono e o alumínio, o que resulta em uma zona de solda mais larga. Além disso, o coeficiente de expansão térmica da austenita é maior do que o da ferrita conforme Callister; Rethwisch (2018), podendo ocasionar distorções e tensões residuais durante o processo de soldagem. Recomenda-se mitigar essas distorções restringindo a movimentação da chapa, reduzindo o número de passes e optando por juntas que demandem a menor quantidade possível de material depositado.

#### **2.4.4. Formação de carbonetos e corrosão intergranular**

A formação de carbonetos e a corrosão intergranular são fenômenos críticos que afetam a integridade estrutural dos aços inoxidáveis austeníticos, especialmente o AISI 316 L. Estes aços são amplamente utilizados devido à sua excelente resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas, mas são suscetíveis à precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, o que pode levar à corrosão intergranular. Este processo é exacerbado pela presença de carbono e outras condições de temperatura e ambiente durante o tratamento térmico e soldagem conforme estudado por Villanueva (2006).

#### **2.4.5. Influência dos elementos de liga na formação de carbonetos e corrosão intergranular**

Segundo estudos de Fedele (2004) o teor de carbono no AISI 316 L é de 0,03 %. Embora esse valor seja relativamente baixo, ainda é suficiente para promover a formação de carbonetos de cromo  $Cr_{23}C_6$  nos contornos de grão durante a exposição a temperaturas entre 450°C e 850°C, temperaturas tipicamente encontradas em processos de soldagem e tratamentos térmicos.

Cromo (Cr), O cromo é essencial para a formação da camada passivadora que confere resistência à corrosão ao aço inoxidável. No entanto, a formação do carboneto de cromo  $Cr_{23}C_6$  depleta o cromo dos contornos de grão, reduzindo a resistência à corrosão nessas áreas e provocando a corrosão intergranular.

Molibdênio (Mo), Vanádio (V), Tungstênio (W), Titânio (Ti) e Nióbio (Nb): Estes elementos são conhecidos por sua capacidade de formar carbonetos, que aumentam a resistência à fluência do material. Em aços inoxidáveis austeníticos como o 316 L, a adição de molibdênio (1% a 3%) melhora significativamente a resistência à fluência e à corrosão por pites. O nióbio (em teor de 10 vezes o teor de carbono) é particularmente eficaz na prevenção da corrosão intergranular, estabilizando o carbono na forma de NbC (carboneto de nióbio), em vez de carboneto de cromo  $Cr_{23}C_6$ , preservando assim a quantidade de cromo disponível para a formação da camada passivadora.

## 2.5. Aço inoxidável ER 316 L

O arame ER 316L é uma liga de aço inoxidável austenítico, com uma composição química que inclui elementos como cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e, às vezes, pequenas quantidades de outros elementos como manganês (Mn) e silício (Si). A composição típica pode ser em torno de 18 - 20% de Cr, 11 - 14% de Ni e 2 - 3% de Mo, usado para soldagem de aço inoxidável austenítico de carbono ultrabaixo e liga, estabilidade do arco de soldagem, formato uniforme, menos respingos, boa resistência à corrosão, amplamente utilizado na petroquímica, produção de fertilizantes ou soldagem de equipamentos de armazenamento. O arame ER316 L geralmente segue normas e especificações internacionais, como as normas AWS (American Welding Society) e ASME (American Society of Mechanical Engineers), garantindo a qualidade e a conformidade do material.

O aço inoxidável ER 316 L, amplamente utilizado como metal de adição em processos de soldagem e manufatura aditiva, destaca-se pela combinação de excelente resistência à corrosão, alta soldabilidade e boas propriedades mecânicas. Sua classificação como aço austenítico da série 300 o coloca em uma categoria de materiais com uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), conferindo-lhe elevada ductilidade e tenacidade em diversas condições de serviço assim como estudado por Guilherme *et al.* (2014); Silva *et al.* (2020).

A composição química do ER 316 L inclui elementos críticos como cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e silício (Si). O cromo e o molibdênio são fundamentais na formação de uma camada passiva que protege o aço contra a corrosão, especialmente em ambientes com alta concentração de cloretos, como destacado por Lippold (2005); Kotecki (2005). O silício (Si), presente em quantidade controlada, tem um papel essencial na melhoria da fluidez do metal fundido e na estabilidade do arco durante o processo de soldagem, conforme mencionado por Wang *et al.* (2020). Isso é particularmente relevante para o processo (MADA), onde o controle preciso da deposição de material é necessário para garantir uma boa uniformidade e acabamento superficial do componente final.

Estudos como os de Chen *et al.* (2018) destacam a importância de uma composição química balanceada no ER 316L para garantir que o material suporte condições extremas, como as encontradas na indústria petroquímica, onde a

resistência à corrosão é crítica. O molibdênio é um dos elementos mais importantes nesse contexto, pois contribui para a resistência à corrosão por pites e fendas em ambientes que contenham íons de cloro, aumento a densidade da camada passiva, o molibdênio se incorpora à estrutura da camada passiva, tornando-a mais densa e resistente à penetração de íons agressivos. Garantindo uma longa vida útil aos componentes fabricados com esse material.

### **2.5.1. Propriedades microestruturais e mecânicas do ER 316 L**

A microestrutura do ER 316 L é predominantemente austenítica, o que resulta em uma excelente combinação de ductilidade e resistência mecânica. No entanto, a rápida taxa de resfriamento e os ciclos térmicos associados ao processo MADA podem levar à formação de pequenas quantidades de fases secundárias, como a ferrita delta ( $\delta$ ), o que pode impactar negativamente a resistência à corrosão e a tenacidade do material, como discutido por Jeong *et al.* (2021); Wang *et al.* (2020).

Estudos realizados por Chen *et al.* (2018) mostram que, quando os parâmetros de deposição no processo de MADA são controlados adequadamente, o ER 316 L pode alcançar resistência à tração superior a 490 MPa e alongamento acima de 30%, o que demonstra a sua adequação para componentes que precisam manter alta resistência mecânica em condições severas. A presença de silício (Si) também contribui para a melhoria das propriedades mecânicas, ao promover a formação de grãos mais finos durante o processo de solidificação, o que melhora a uniformidade da microestrutura.

### **2.5.2. Aplicações e vantagens do ER 316 L na manufatura aditiva**

Segundo Wu *et al.* (2019); Chen *et al.* (2018) o ER 316 L tem se destacado no processo MADA devido à sua capacidade de suportar as condições desafiadoras impostas pelo processo. Suas propriedades de soldabilidade e resistência à corrosão o tornam adequado para a produção de componentes complexos em setores como o petroquímico e o de sistemas hidráulicos, onde a exposição a ambientes agressivos com alto teor de cloretos é comum.

Conforme discutido por Rafieazad *et al.* (2019), o processo MADA, ao sobrepor camadas de material, pode gerar microestruturas heterogêneas, mas o uso

de técnicas de controle térmico, como a aplicação de ciclos de resfriamento entre as camadas, pode mitigar esses efeitos e garantir a integridade estrutural da peça final. A manufatura com ER 316 L permite também a criação de peças com geometrias intrincadas, uma vantagem que seria difícil de alcançar com métodos convencionais, como a usinagem ou fundição como estudado por Debroy *et al.* (2018).

Essa flexibilidade na produção e a redução de desperdício de material fazem do ER 316 L uma solução eficiente e econômica para a fabricação de componentes que precisam combinar durabilidade e alto desempenho mecânico. Ao adotar esse material em processos de manufatura aditiva, é possível otimizar a eficiência da produção e prolongar a vida útil dos componentes, especialmente em aplicações que exigem alta resistência à corrosão e a ambientes com temperaturas elevadas como mostrado no estudo de Wang *et al.* (2020).

## **2.6. Resistência à fluência e aditivos de liga**

Segundo estudos de Ishida (1974); Nishizawa (1974) a resistência à fluência, os elementos de liga como molibdênio, vanádio, tungstênio, titânio e nióbio desempenham papéis cruciais:

O cromo (Cr) é o elemento químico fundamental para a elaboração dos aços inoxidáveis, devido à formação de uma camada passiva na superfície do aço, além de atuar como estabilizador da ferrita.

Para garantir a formação do filme passivo, os aços inoxidáveis devem ter no mínimo 10,5% em peso de cromo segundo Uijl (2012); Carless (2012). O cromo na superfície do aço é oxidado para formar uma camada invisivelmente fina de óxido de cromo  $Cr_2O_3$ , essa camada é conhecida como passivação e é rapidamente reconstruída se ocorrerem danos, desde que o teor de cromo permaneça acima de um valor limite de aproximadamente 7% como mostrado em Rackley (2010). Defeitos do filme passivo podem ocorrer como resultado da fluência ou do ciclo térmico, e a presença de vapor de água leva à formação de espécies voláteis de hidroxila contendo cromo e à perda de cromo do aço por evaporação assim como mostrado nos estudos de Rackley (2010). Além disso, em ambientes aquosos que contém elementos químicos da família dos halogênios, a resistência pode diminuir drasticamente se o filme passivo romper. Em relação às propriedades mecânicas o cromo pode dificultar o movimento das discordâncias na ferrita atuando como barreira ao seu movimento

assim como demonstrado nos estudos de Wang *et al.* (2013).

O cromo favorece no aumento do potencial de corrosão, da CPT (temperatura crítica de pite - *Critic Pitting Temperature*) e da CCT (temperatura crítica de corrosão em frestas - *Critic Crevice Temperature*) e melhora a estabilidade do filme passivo em ambientes ácidos. O limite máximo para o teor de cromo é de aproximadamente 30 - 32%, onde a precipitação em fase intermetálica pode reduzir acentuadamente a ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão dessas ligas.

Segundo os estudos de Lo Shek (2009); Lai (2009) o níquel é utilizado como forte estabilizador da austenita, sua estrutura cristalina é cúbica de face centrada - CFC e o seu ponto de fusão é em torno de 1453°C. Ele é comumente utilizado para representar os elementos químicos que tendem a estabilizar a austenita, sob a forma de "Níquel equivalente - Nieq". Nos aços inoxidáveis duplex / superduplex geralmente contêm 4 a 9% em peso de Ni.

Molibdênio (Mo): Em concentrações de 1% a 3%, aumenta significativamente a resistência à fluência em aços austeníticos 18 - 8. Por exemplo, a adição de 0,5% de molibdênio a um aço contendo 0,1% a 0,2% de carbono pode dobrar a carga que provoca uma fluência de 0,10% em 100.000 horas a 500°C conforme Chiaverini (2012).

Vanádio (V): Adicionado em torno de 0,2% a aços C - Cr - Mo, aumenta a resistência à fluência até 550 - 600°C, embora possa diminuir a resistência à oxidação.

Tungstênio (W) e Titânio (Ti): Ambos são formadores de carbonetos, aumentando a resistência à fluência e à tração a altas temperaturas. Titânio, em particular, melhora a resistência à fluência em aços austeníticos quando adicionado em cerca de 0,5% conforme Chiaverini (2012).

Nióbio (Nb): Atua similarmente ao titânio, melhorando a resistência à fluência e à corrosão intergranular ao formar NbC em vez de Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

A gestão da formação de carbonetos e da corrosão intergranular no aço inoxidável ER 316 L envolve um delicado equilíbrio na composição química e nas condições de processamento térmico conforme Chiaverini (2012).

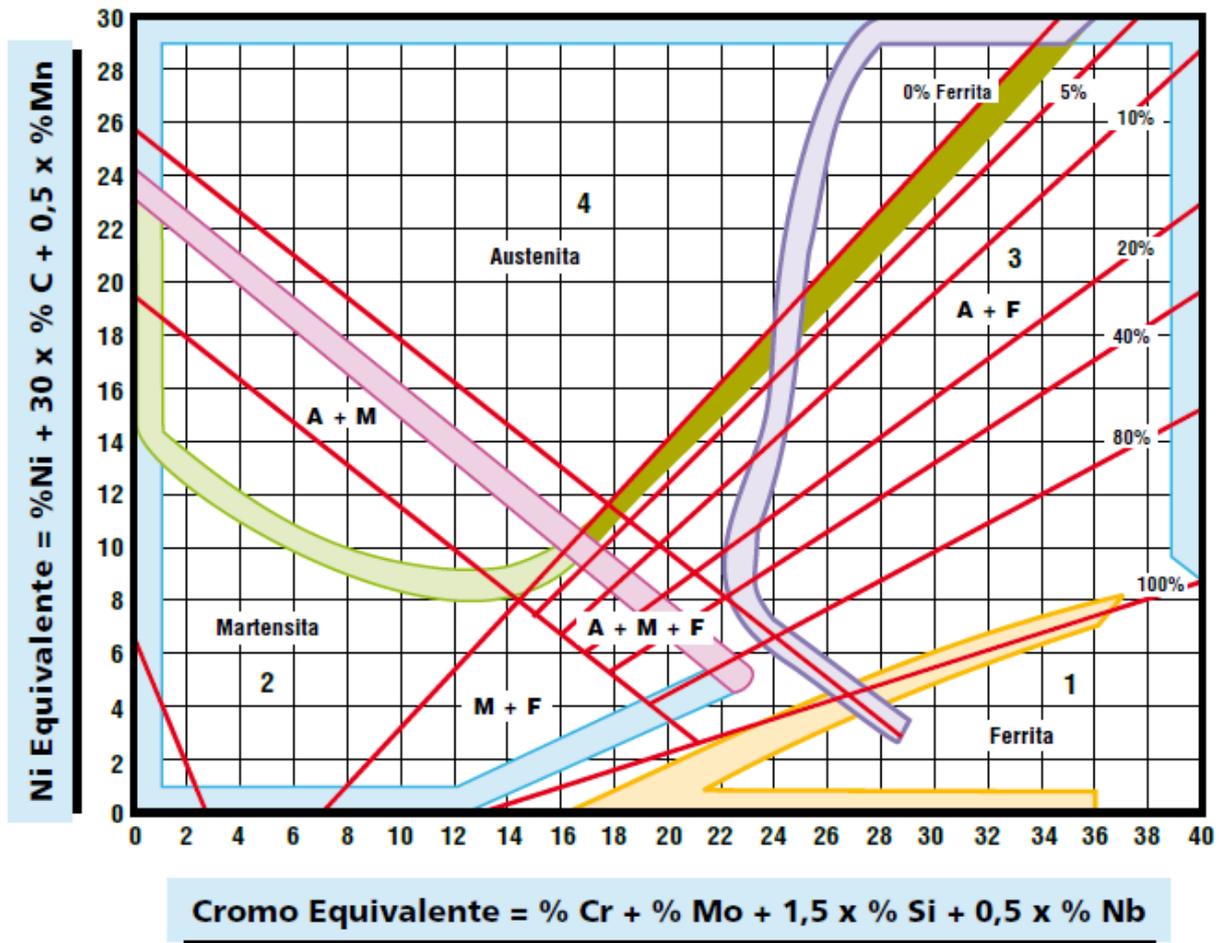
A introdução de elementos como nióbio e molibdênio é essencial para melhorar a resistência à fluência e prevenir a corrosão intergranular, garantindo a longevidade e o desempenho dos componentes fabricados com este material. A correta seleção e combinação desses elementos de liga, juntamente com um controle rigoroso dos processos de soldagem e tratamento térmico, são fundamentais para

otimizar as propriedades do ER 316 L em aplicações industriais críticas conforme Chiaverini (2012).

## **2.7. Normas e padrões de qualidade**

A corrosão intergranular é um fenômeno prejudicial aos aços inoxidáveis austeníticos, especialmente em temperaturas elevadas, levando à formação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, o que pode comprometer a integridade estrutural segundo Sebrinks (1996). A resistência à corrosão é uma propriedade crucial em diversas aplicações industriais, e os aços inoxidáveis austeníticos, com teor adequado de cromo, são escolhas comuns para essas finalidades. A formação de uma camada de óxido de cromo na superfície desses aços contribui significativamente para sua resistência à corrosão conforme Silva (2007). A microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos é influenciada pelos elementos de liga presentes, que estabilizam diferentes fases. Essa diversidade microestrutural confere aos aços propriedades mecânicas e comportamento em serviço variados como mostrado em Davis (1999). O Diagrama de Schaeffler na figura 8 é uma representação gráfica que permite visualizar a microestrutura esperada de aços inoxidáveis em função da composição química, especialmente em relação aos teores de cromo (Cr) e níquel (Ni). No contexto dos aços inoxidáveis austeníticos, como o 316 L, o diagrama é fundamental para compreender como diferentes elementos de liga influenciam na formação da fase austenítica.

Figura 8 - Diagrama de Schaeffler



Fonte: SENAI CIMATEC (2012)

Diagrama de constituição de Schaeffler para aços inoxidáveis. As faixas de composição típicas das ligas ferríticas, martensíticas, austeníticas e duplex foram sobrepostas neste diagrama conforme Davis *et al.* (1994); Reick *et al.* (1990); Pohl *et al.* (1990). Com permissão.

## 2.8. Aplicações e propriedades dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 304, são amplamente utilizados devido à sua excelente resistência à corrosão, aliada a propriedades mecânicas favoráveis. Esses aços, pertencentes às séries 2XX e 3XX, possuem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada, sendo sua fase predominante a austenita. Essa fase é estabilizada pela presença de cromo e níquel em altas concentrações,

que podem variar entre 15% e 32% de Cr e até 30% de Ni conforme Sedriks (1996). A presença desses elementos confere ao AISI 304 uma resistência à corrosão significativa, mesmo em ambientes agressivos, e propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações industriais. Em média, esses aços podem ser utilizados em temperaturas de serviço de até 760°C segundo Lippold (2005). Na Tabela 2 observa-se uma relação das classes e suas respectivas resistências a corrosão.

**Tabela 2** - Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis em relação aos aços

<b>CLASSES DE AÇOS INOXIDÁVEIS</b>	<b>RESISTÊNCIA À CORROSÃO</b>	<b>RESISTÊNCIA MECÂNICA</b>	<b>RESISTÊNCIA Á ALTA TEMPERATURA</b>	<b>RESISTÊNCIA AO IMPACTO</b>
Ferríticos	Média	Baixa	Boa	Média
Martensíticos	Média	Excelente	Média	Baixa
Austeníticos	Excelente	Baixa	Excelente	Excelente
Duplex	Excelente	Boa	Boa	Excelente
Série PH	Boa	Excelente	Média	Média

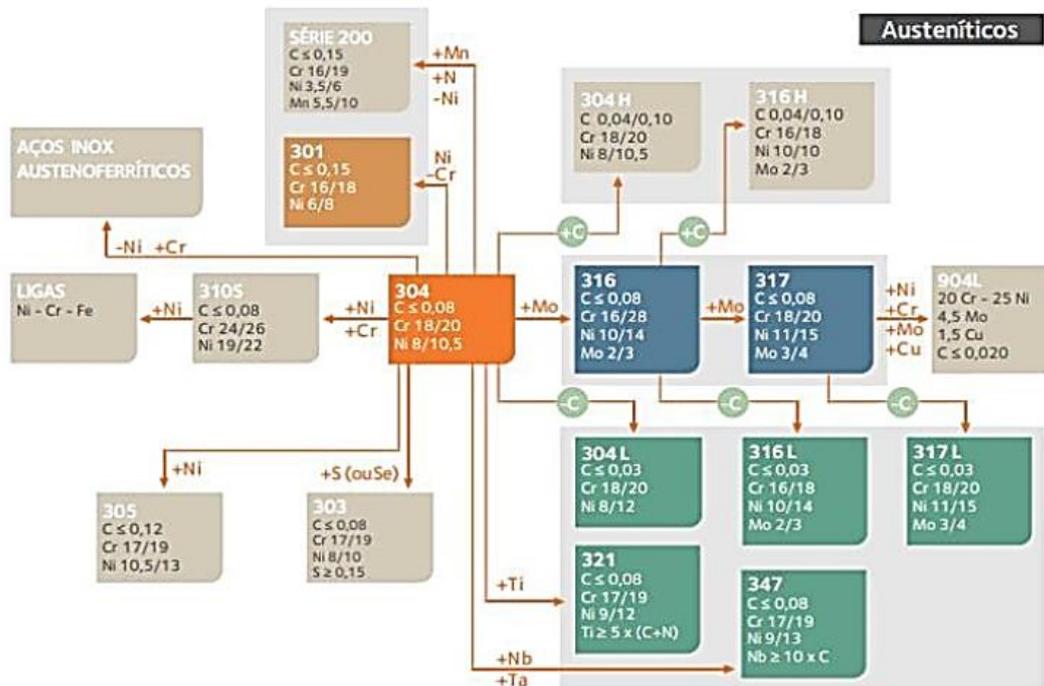
**Fonte:** Adaptado METALINOX (2024)

Os aços da série 2XX apresentam adições de manganês (Mn), enquanto os da série 3XX são mais comuns e possuem maior teor de cromo e níquel. Esses aços não são magnéticos e não são endurecíveis por precipitação, sendo sua dureza influenciada pela instabilidade da austenita quando submetida a encruamento assim como demonstrado nos estudos de Lippold (2005).

Apesar da excelente resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos, ligas compostas por Fe-Cr-Ni-Mn podem apresentar uma resistência inferior em comparação com os aços da série 300.

No entanto, o teor de elementos como o enxofre pode influenciar nas propriedades de usinagem desses aços, como observado no AISI 304 conforme Lippold (2005). A Figura 9 demonstra um fluxograma com as do aço inoxidável 304.

**Figura 9** - Fluxograma com as principais variações a partir do aço inoxidável austenítico AISI 304



Fonte: Lippod (2005)

## 2.9. Análise de conformidade com normas

De maneira geral, a maioria dos aços do tipo “L” que contêm no máximo 0,030% de carbono são os mais empregados. A presença do carbono na liga ocorre de maneira intersticial, possibilitando sua difusão pela estrutura e concentração nos contornos de grãos, promovendo a formação de carbeto de cromo, o que influencia na resistência à corrosão. O cromo presente em solução sólida age como um estabilizador do Fe, pois o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  que se forma superficialmente possui maior afinidade com o oxigênio em comparação ao ferro. À medida que o teor de cromo aumenta, as chances de a liga adquirir melhor resistência em ambientes agressivos são maiores, especialmente na presença de ácido nítrico. Assim, em ligas à base de Fe-Ni-Cr-C, um aumento na quantidade de cromo resulta em maior tendência à formação de ferrita, além de promover a formação de carbeto, sendo o  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  o mais comum nesse processo é essencial para o surgimento de compostos intermetálicos capazes de

fragilizar os aços inoxidáveis austeníticos. A fase sigma ( $\sigma$ ) também é frequente em sistemas Fe-Cr, formando-se a temperaturas abaixo de 815°C, sendo mais proeminente em ligas com alto teor de cromo. O cromo atua como enriquecedor das fases intermetálicas chi ( $\chi$ ) e laves.

A condutividade térmica é baixa, enquanto a expansão térmica é alta, o que apresenta maiores desafios durante a soldagem, podendo resultar em sensitização quando expostos a altas temperaturas, levando à corrosão intergranular em ambientes agressivos. Para minimizar esse efeito, sugere-se que o teor de carbono seja baixo ( $C \leq 0,03\%$ ) e que sejam adicionados alguns elementos de liga como titânio (Ti) e nióbio (Nb), que atuarão como estabilizadores e se ligarão preferencialmente ao carbono na forma de carbonetos de titânio e nióbio. Teores de carbono muito baixos comprometem a resistência mecânica e a dureza da liga. Os aços da série 3XX possuem uma microestrutura formada devido a elementos austenitizantes, principalmente pela presença de níquel, que melhora consideravelmente a resistência à oxidação em temperaturas elevadas, auxiliando na formação de uma fina camada passivadora, como mencionado anteriormente conforme Chiaverini (2005); Lippold (2005); Sedriks (1996).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Metal de base (substrato)

O substrato utilizado no presente trabalho será o aço inoxidável austenítico AISI 304 L, onde sua composição química e propriedades mecânicas podem ser observada nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

**Tabela 3** - Composição química do aço AISI 304 L

<b>Designação</b>	S30403
<b>Tipo</b>	304 L
<b>Carbono (C)</b>	0,030 máx.
<b>Manganês (Mn)</b>	2,00 máx.
<b>Fósforo (P)</b>	0,045 máx.
<b>Enxofre (S)</b>	0,030 máx.
<b>Silício (Si)</b>	0,75 máx.
<b>Cromo (Cr)</b>	18,0 - 20,0
<b>Níquel (Ni)</b>	8,0 - 12,5
<b>Nitrogênio (N)</b>	0,10 máx.

Fonte: Adaptado do ASTM A 240/A 240M – 02a (2012)

**Tabela 4** - Propriedades mecânicas do aço AISI 304 L

<b>Designação</b>	S30403
<b>Tipo</b>	304 L
<b>Resistência a Tração</b>	70 Ksi min.
<b>Resistência a Tração</b>	485 MPa min.
<b>Limite de Escoamento</b>	25 Ksi min.
<b>Limite de Escoamento</b>	170 MPa min.
<b>Alongamento</b>	40% min.
<b>Dureza Brinell</b>	201 máx.
<b>Dureza Rockwell B</b>	92 máx.

Fonte: Adaptado do A 240/A 240M – 02a (2012)

### 3.2. Consumível

Conforme ASME BPVC.II.C (2023), o consumível a ser empregado neste projeto será o ER 316 L e sua composição química é demonstrada na Tabela 5.

**Tabela 5 - Composição química do ER 316 L**

<b>Designação UNS</b>	S31683
<b>Classificação</b>	316 L
<b>Molibdênio (Mo)</b>	2,0 – 3,0
<b>Carbono (C)</b>	0,03 máx.
<b>Manganês (Mn)</b>	1,0 – 2,5
<b>Fósforo (P)</b>	0,03 máx.
<b>Enxofre (S)</b>	0,03 máx.
<b>Silício (Si)</b>	0,30 – 0,65
<b>Cromo (Cr)</b>	18,0 – 20,0
<b>Níquel (Ni)</b>	11,0 – 14,0
<b>Cobre (Cu)</b>	0,75 máx.

Fonte: Adaptado de ASME BPVC.II.C (2023)

#### 3.2.1. Propriedades mecânicas - ER316L

As propriedades mecânicas estão disponibilizadas na Tabela 6, seguindo os requisitos do ASME BPVC.II.C (2023).

**Tabela 6 - Propriedades mecânicas do ER 316 L**

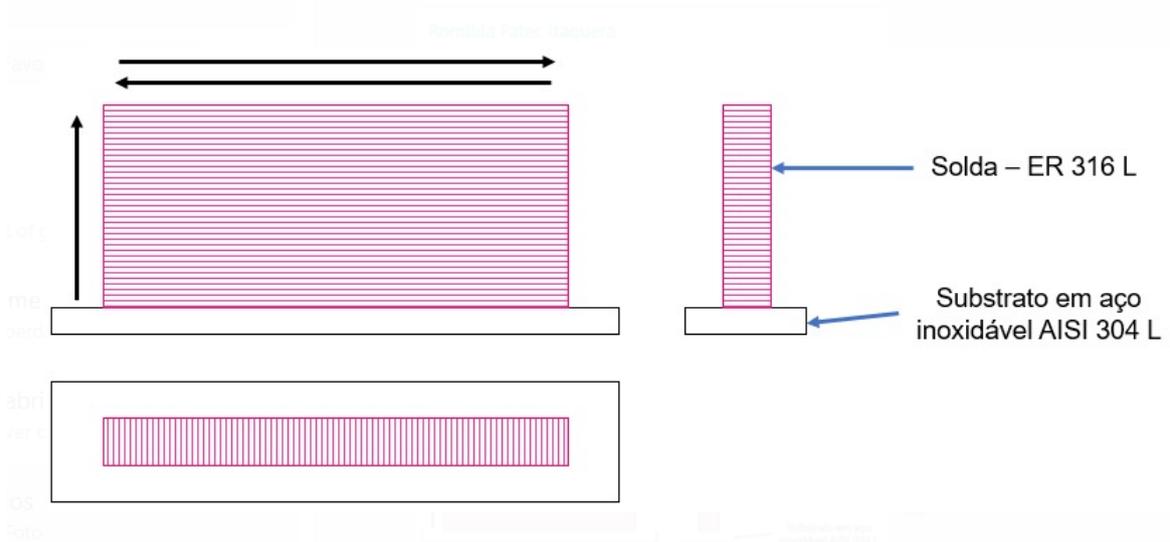
<b>AWS / ISO</b>	E316 L – XX, E19 12 3 LX
<b>Resistência a Tração</b>	70 Ksi min.
<b>Resistência a Tração</b>	490 MPa min.
<b>Alongamento</b>	30% min.

Fonte: Adaptado de ASME BPVC.II.C (2023)

### 3.3. Planejamento de execução do corpo de prova

O plano de soldagem (PS) contém as informações necessárias sobre o corpo de prova proposto para a execução de soldas de produção, a partir dos dados constantes da uma especificação de procedimento de soldagem (Figura 10).

**Figura 10** - Progressão de fabricação do corpo de prova

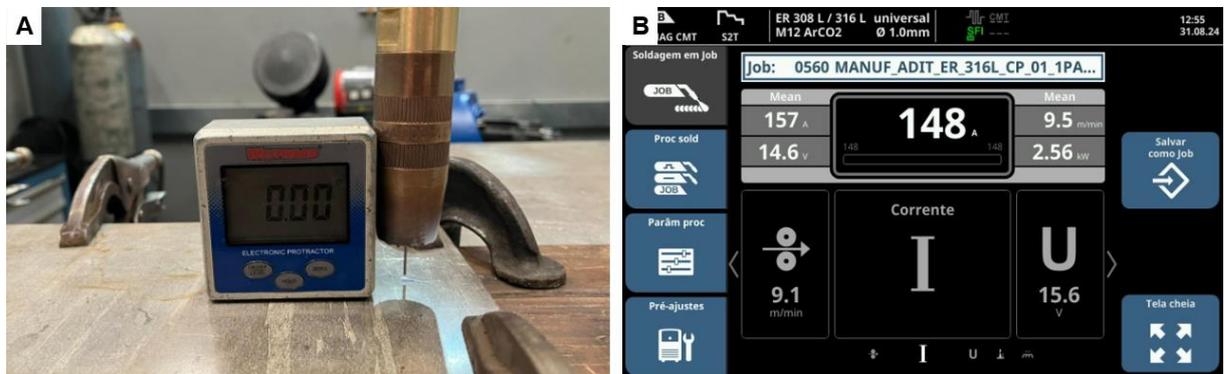


Fonte: Autores (2024)

### 3.4. Produção do corpo de prova

O processo de preparação do corpo de prova para soldagem foi iniciado utilizando o robô Motoman Yaskawa. Após a etapa de preparo, foi conferido o ângulo referente ao bico da máquina de solda junto ao substrato, conforme ilustrado na Figura 11-A, a fim de garantir condições adequadas para a soldagem foi seguido a paremetrização conforme Figura 10-B.

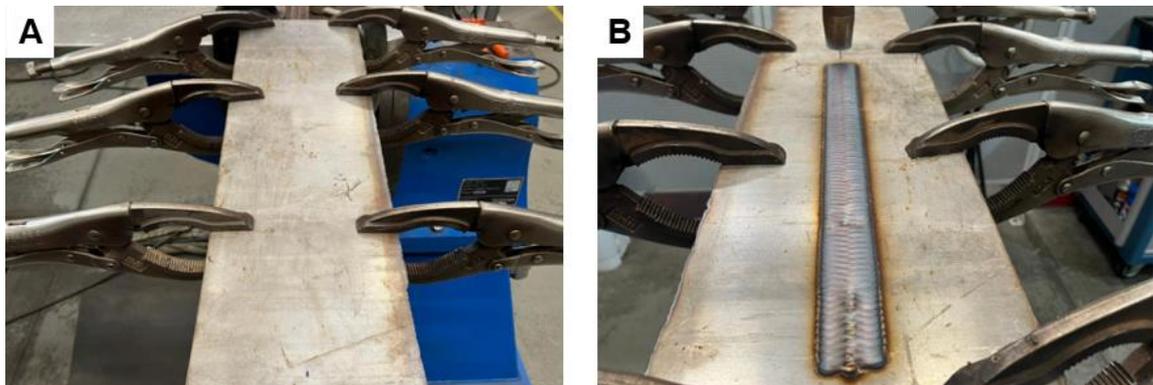
**Figura 11 - Preparação do corpo de prova**



Fonte: Autores (2024)

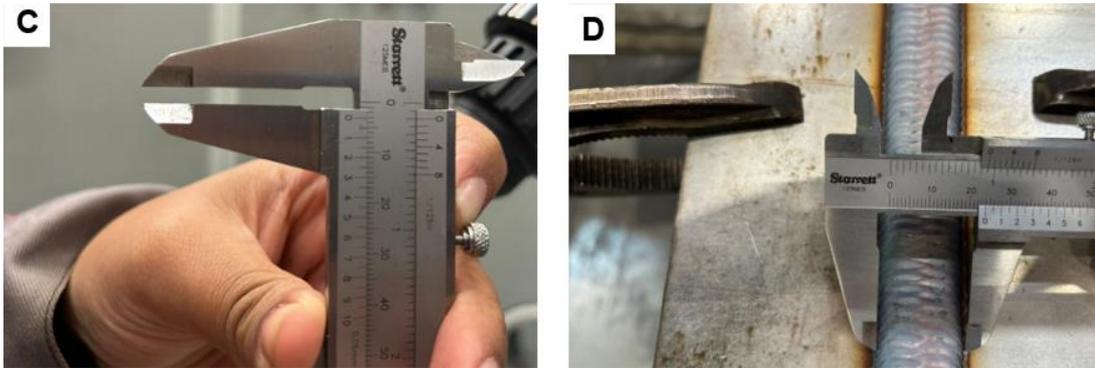
Em seguida foi realizado o primeiro passe de soldagem, no qual foram conferidos as medições como altura do reforço, largura do cordão e demais variáveis operacionais, conforme apresentado na Figura 12 e detalhe A (substrato pronto para ser soldado, detalhe B (primeiro passe de solda), e Figura 13 detalhe C (medição da altura do reforço) e detalhe D (medição da largura do reforço).

**Figura 12 - Sequência de soldagem do corpo de prova**



Fonte: Autores (2024)

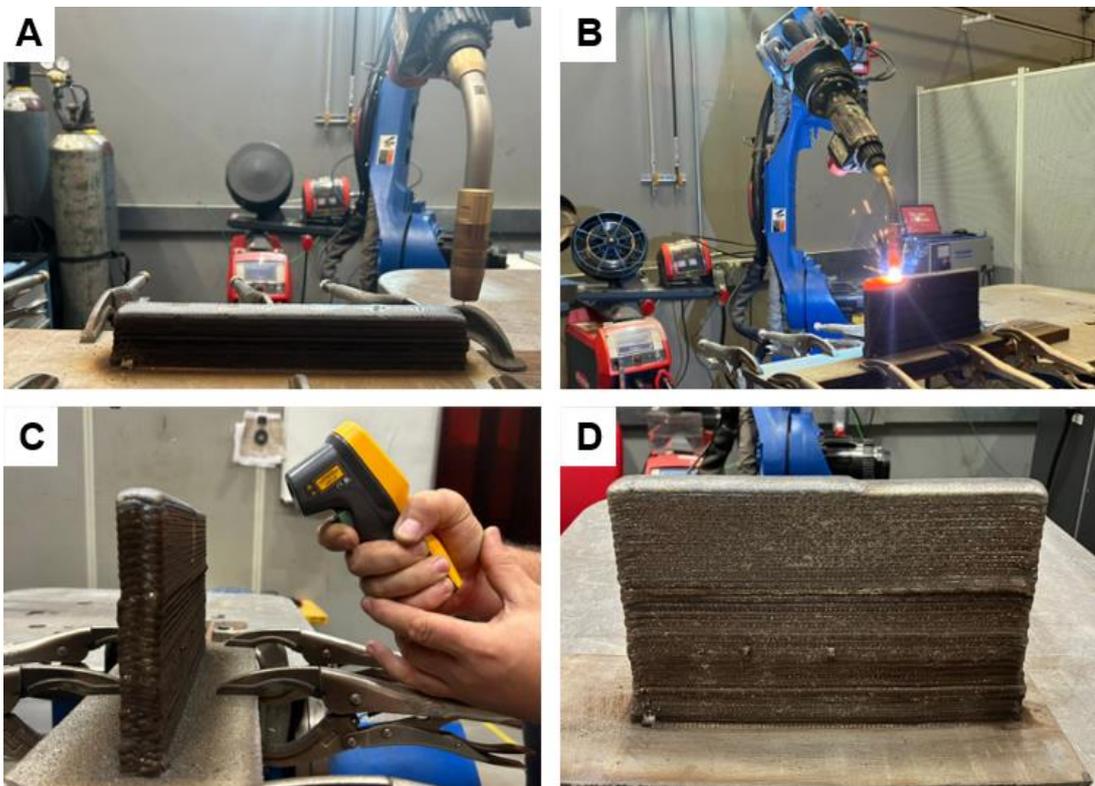
**Figura 13 - Sequência de soldagem do corpo de prova**



**Fonte:** Autores (2024)

Após a parametrização que foi utilizada conforme catalogo do fabricante para está aplicação, o processo de soldagem foi conduzido com a deposição do material ER 316 L camada a camada, no sentido longitudinal ao substrato, com pausas programadas para controle do aporte térmico entre os passes, garantindo a integridade metalúrgica do cordão de solda. O procedimento foi concluído conforme demonstrado na Figura 14 detalhes A, B, C e D.

**Figura 14 - Soldagem do corpo de prova**



**Fonte:** Autores (2024)

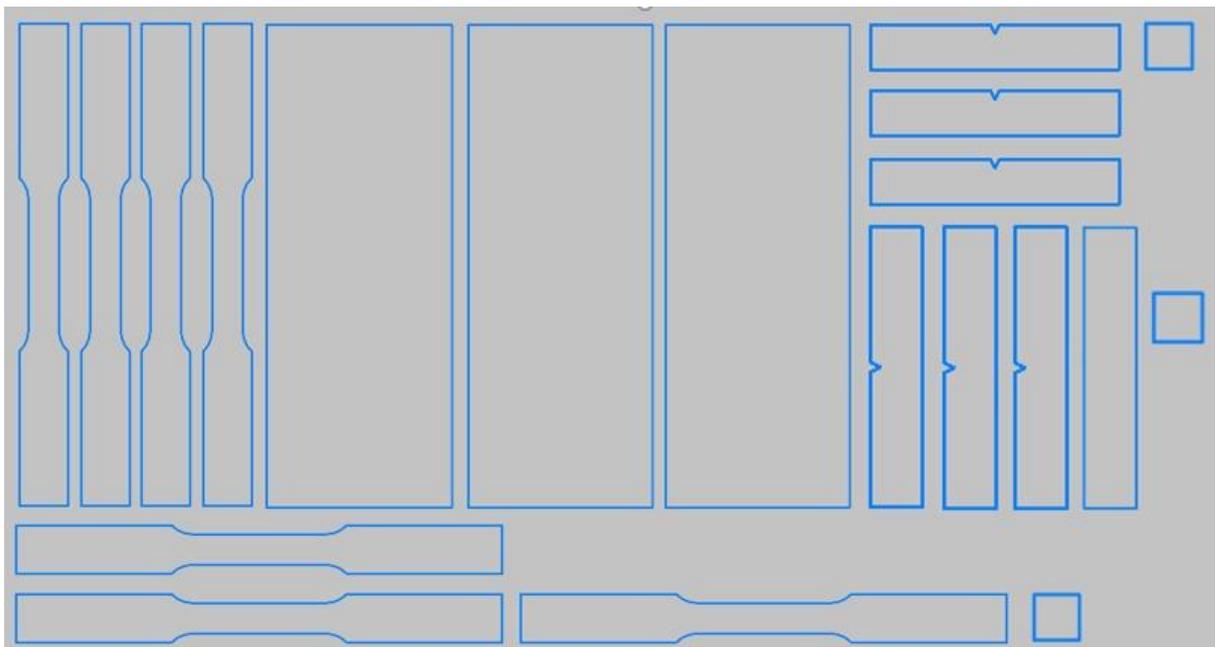
### 3.5. Ensaio destrutivo

São aqueles que deixam algum sinal na peça ou corpo de prova submetido ao ensaio, mesmo que estes não fiquem inutilizados. As técnicas são empregadas para analisar o comportamento dos materiais quando sujeitos a esforços mecânicos em condições específicas, semelhantes às de operação. Na maioria das vezes esses ensaios promovem a ruptura ou a inutilização da amostra analisada, haja vista que algumas propriedades físicas somente são observadas por meio de testes que causam danos no material.

### 3.6. Ensaio mecânico

O planejamento de corte do CP (Figura 15) é uma condição representativa do material a ser ensaiado, em outras palavras, os corpos de prova fazem parte do material que desejamos investigar. Para tanto, serão efetuados ensaios de tração (longitudinal e transversal), impacto Charpy (longitudinal e transversal), seguindo o ASTM A 370 (2006).

**Figura 15** - Planos de corte do corpo de prova



**Fonte:** Autores (2024)

### **3.7. Equipamentos e célula de trabalho: descrição do robô industrial e da célula utilizada**

A automação dos processos produtivos tem evoluído significativamente ao longo das últimas décadas, impulsionada pela busca contínua por maior eficiência e qualidade na produção. Nesse contexto, a soldagem robotizada surgiu como uma solução tecnológica de destaque, permitindo a substituição gradual do trabalho humano em tarefas repetitivas e potencialmente perigosas.

#### **3.7.1. Definição de robô**

Segundo os estudos de Schiavico (1995); Siciliano (1995) um robô industrial pode ser definido como um sistema físico capaz de executar tarefas manipulando o ambiente por meio de operações que exercem forças físicas, tais como pernas, rodas, garras e ferramentas especializadas. Essa definição destaca a capacidade dos robôs de interagir com o mundo físico de maneira autônoma ou semiautônoma, desempenhando funções específicas conforme programado.

#### **3.7.2. Histórico sobre robôs na indústria**

A ideia de máquinas que possam substituir o ser humano em certas atividades remonta ao filósofo Aristóteles, no século IV aC, que imaginava instrumentos capazes de realizar suas próprias tarefas antecipando os desejos humanos. No entanto, foi apenas a partir do desenvolvimento da máquina a vapor, por James Watt em 1769, que a automação começou a tomar forma prática.

No século XX, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, o avanço tecnológico nas áreas de eletroeletrônica e informática permitiu o surgimento dos primeiros robôs industriais. Em 1958, foi desenvolvido o primeiro robô industrial nos Estados Unidos, e a UNIMATION Inc. comercializou o primeiro modelo em 1961. A partir da década de 1970 a indústria automobilística europeia evoluiu amplamente a robótica industrial, promovendo uma automação flexível e programável.

### 3.7.3. Robôs industriais para soldagem GMAW

Os robôs articulados, também conhecidos como robôs manipuladores, são os mais comuns na indústria atualmente. Sua configuração semelhante ao braço humano, oferece grande liberdade e alcance de movimentos, o que os torna ideais para aplicações de soldagem GMAW.

Uma configuração básica de um sistema para soldagem robotizada GMAW, deve incluir os seguintes componentes:

- Robô articulado e unidade de controle:

A seleção do robô adequado deve considerar fatores críticos para o sucesso da aplicação, como graus de liberdade, volume de trabalho, precisão, repetibilidade e capacidade de carga.

- Fonte de soldagem:

Equipamento capaz de fornecer as configurações elétricas necessárias para o processo GMAW.

- Tocha de soldagem robotizada:

Projetada para integração com o robô, permitindo a realização de soldagens de alta qualidade.

- Sistemas de segurança e interconexão:

Embora não seja o foco deste trabalho, é essencial considerar aspectos relacionados à segurança dos operadores e à integração do sistema.

#### **3.7.4. Descrição do robô motoman yaskawa ar 2010**

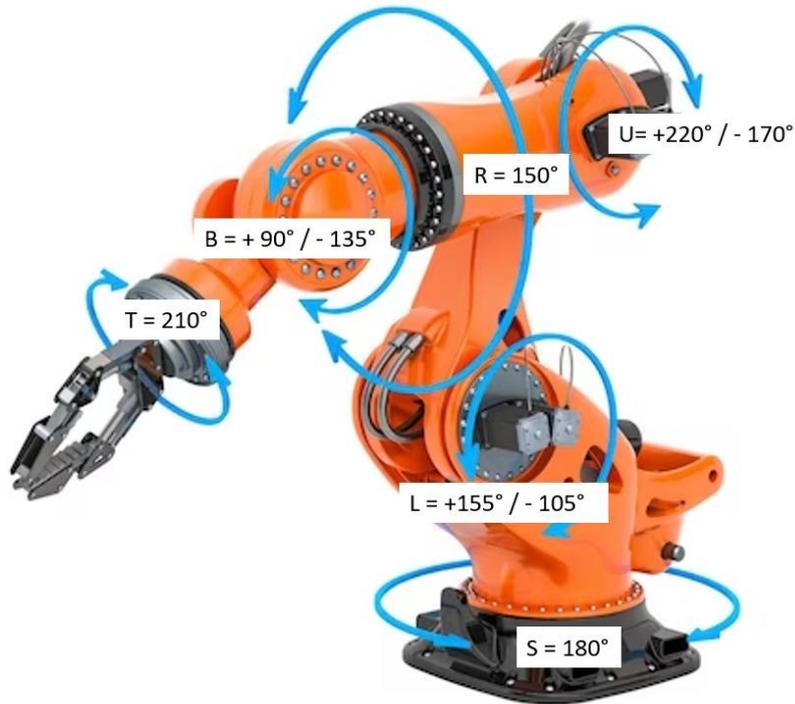
No presente trabalho, foi utilizada uma célula de trabalho equipada com o robô industrial Motoman Yaskawa AR 2010, especialmente projetada para aplicações de soldagem em arco. Este robô possui um design de alta velocidade e alcance estendido, otimizando a produtividade e o desempenho na operação. O braço fino facilita o acesso a áreas de difícil alcance, e uma grande abertura de 50 mm permite o roteamento seguro de cabos e mangueiras, proporcionando acesso desobstruído à tocha de soldagem.

Especificações técnicas:

- Carga máxima: 10 kg
- Número de eixos: 6
- Alcance horizontal máximo: 2.010 mm
- Alcance vertical máximo: 3,649 mm
- Repetibilidade:  $\pm 0,08$  mm
- Controlador: DX 200

A imagem a seguir (Figura 16) ilustra os graus de movimento e liberdade do robô motoman yaskawa ar 2010, demonstrando as várias opções e ângulos em que ele pode operar, o que possibilita maior precisão e flexibilidade em tarefas de manipulação complexa.

**Figura 16 - Graus de liberdade do eixo do robô**



**Fonte:** Autores (2024)

Gama de movimento (graus) por eixo:

Eixo S (Base):  $\pm 180^\circ$

Eixo L (Braço Inferior):  $+155^\circ / -105^\circ$

Eixo U (Braço Superior):  $+220^\circ / -170^\circ$

Eixo R (Pulso 1):  $\pm 150^\circ$

Eixo B (Pulso 2):  $+90^\circ / -135^\circ$

Eixo T (Pulso 3):  $\pm 210^\circ$

Velocidade máxima (graus por segundo) por eixo:

Eixo S:  $197^\circ/\text{s}$

Eixo L:  $190^\circ/\text{s}$

Eixo U:  $210^\circ/\text{s}$

Eixo R:  $410^\circ/\text{s}$

Eixo B:  $410^\circ/\text{s}$

Eixo T:  $610^\circ/\text{s}$

#### **3.7.4.1. Controlador dx 200**

O Controlador DX 200 é uma unidade de alta robustez e eficiência, desenvolvida para melhorar o desempenho de células robóticas voltadas para a soldagem. Entre suas principais características é a flexibilidade nas aplicações, uma vez que o controlador é capaz de suportar até três eixos auxiliares ou externos e pode ser montado isoladamente, permitindo sua adaptação em diferentes configurações de trabalho. Em termos de produtividade, o controle avançado de movimento do robô (ARM) possibilita um planejamento de trajetória otimizado, o que eleva a eficiência operacional.

Outro ponto relevante é a minimização dos custos de integração. O driver é compatível com diversas redes fieldbus, o que facilita sua incorporação no ambiente industrial. No aspecto de segurança, o DX 200 conta com zonas de interferência dinâmica, que protegem o robô, previnem colisões e aumentam a segurança do sistema como um todo.

Além disso, a unidade foi projetada com foco em eficiência energética e confiabilidade, reduzindo o consumo de energia e o tempo médio de reposição de peças (MTTR). Em termos de capacidade de controle, o DX 200 pode sincronizar até 8 robôs ou 72 eixos, garantindo uma coordenação precisa em operações complexas. A interface de programação avançada é outro diferencial, com um pendente leve e tela touch colorida baseada em Windows® CE, oferecendo diversas opções de visualização e facilitando a programação.

A utilização do Motoman AR 2010 com o driver DX 200 permitiu a realização de soldagens precisas e repetitivas, essenciais para a proposta de análise neste trabalho. A configuração da célula de trabalho atende às necessidades específicas do projeto, garantindo a qualidade e a consistência dos resultados obtidos.

### **3.8. Variáveis de controle do processo.**

Assim como discutido no presente trabalho em seu tópico 2.4.2, conforme discutido por Rafieezad *et al.* (2019), o processo MADA, ao sobrepor camadas de material, pode gerar microestruturas heterogêneas, mas o uso de técnicas de controle térmico, como a aplicação de ciclos de resfriamento entre as camadas, pode mitigar esses efeitos e garantir a integridade estrutural da peça final.

No processo realizado foi executado um controle de uma varável essencial do processo MADA que é o aporte térmico imposto pela sobreposição de camada a camada de forma subsequente, foi controlado o tempo de parada no processo deposição conforme demonstrado na Figura 17, onde vemos a programação das linhas do programa realizado na célula de soldagem.

**Figura 17 - Tempo de parada da programação**

```
JOB CONTENT: MASTER
J:MANUF_ADITIVA_ER-316L_CP_01      S:0003
CONTROL GROUP: R1                   TOOL: 02
0011  ARCON
0012  WVON WEV#(1)
0013 0004 MOVL P108 V=30
0014  ARCOF
0015  WVOF
0016  TIMER T=1.00
0017  ADD P110 P112
0018  ADD P109 P112
0019  TIMER T=1.00
0020 0005 MOVL P110 V=30
0021  TIMER T=1.00
0022  ARCON
```

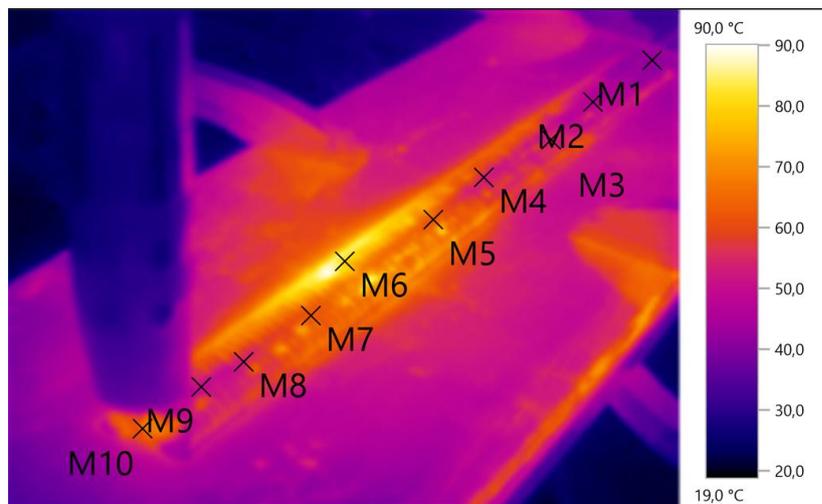
Fonte: Autores (2024)

Além deste controle foi realizado o controle de temperatura entre camadas com termômetro digital laser Fluke assim como vemos na Figura 18 mantendo uma temperatura de interpasses de 300°C.

**Figura 18** - Termômetro digital Fluke

Fonte: Autores (2024)

Para a verificação de distribuição do calor imposto pelo processo MADA, foi utilizado uma câmera termográfica conforme Figura 19, onde foi realizado medições e controle da temperatura no início do processo em suas camadas iniciais, onde se deve ter atenção redobrada com a diluição e para se garantir um crescimento de grão de maneira mais homogenia possível.

**Figura 19** - Imagem da câmera termográfica

Fonte: Autores (2024)

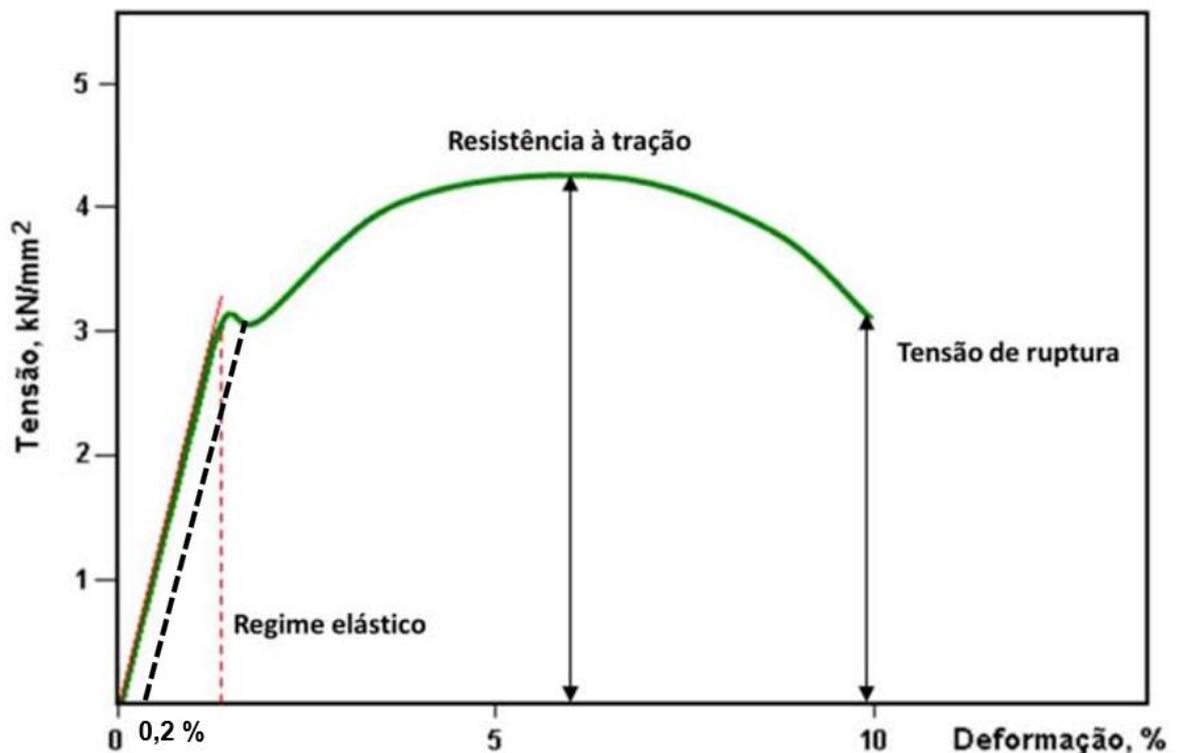
### 3.9. Ensaio de tração

O ensaio de tração avalia a resistência de materiais metálicos ao aplicar uma carga até sua ruptura, fornecendo dados como limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e ductilidade, fundamentais para aplicações que exigem alta resistência mecânica.

Neste estudo, corpos de prova (CPs) foram confeccionados com arame ER 316 L conforme a norma ASTM A370 (2006). Foram preparados três (3) CPs com orientação transversal e três (3) com orientação longitudinal ao sentido de deposição, para refletir as propriedades mecânicas específicas em diferentes direções.

Os ensaios foram realizados em uma máquina Emic GR048, com velocidade de 1 mm/min. A resistência máxima foi registrada diretamente, e o limite de escoamento foi determinado graficamente no ponto de 0,2% de deformação, conforme gráfico de tensão deformação sugerido conforme Figura 20 seguindo a norma ASTM A370 (2006). A curva tensão-deformação também permitiu avaliar a ductilidade do material.

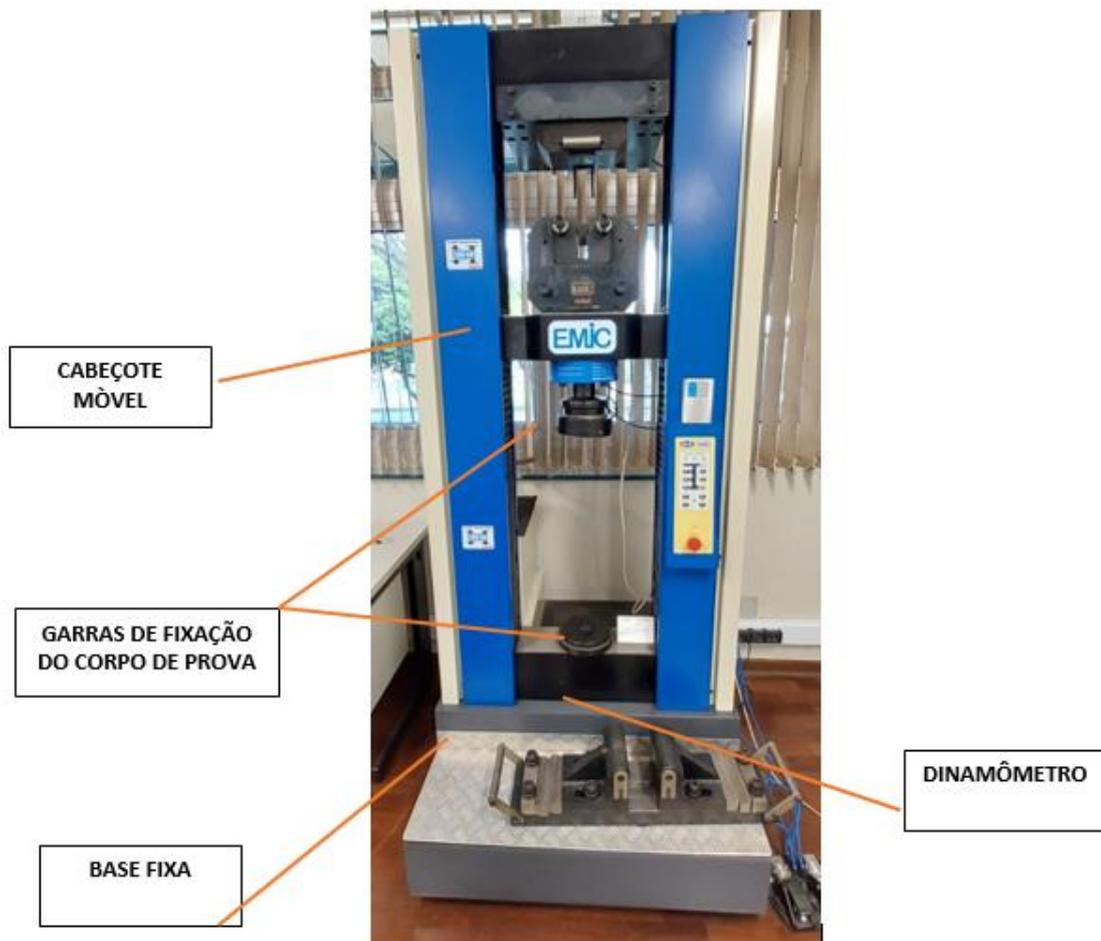
**Figura 20** - Gráfico tensão deformação



Fonte: Adaptado de Centro Universitário Newton Paiva (2017)

O objetivo do relatório é apresentar os resultados dos ensaios de tração realizados nos CP's, seguindo as normas ASTM E8 (2016) e ASTM A370 (2006). Os ensaios em CP's longitudinais (grupo 1) e transversais (grupo 2) foram feitos em uma máquina Emic DL20000 com célula de carga Trd 12 (Figura 21), e a extensão foi medida até a ruptura.

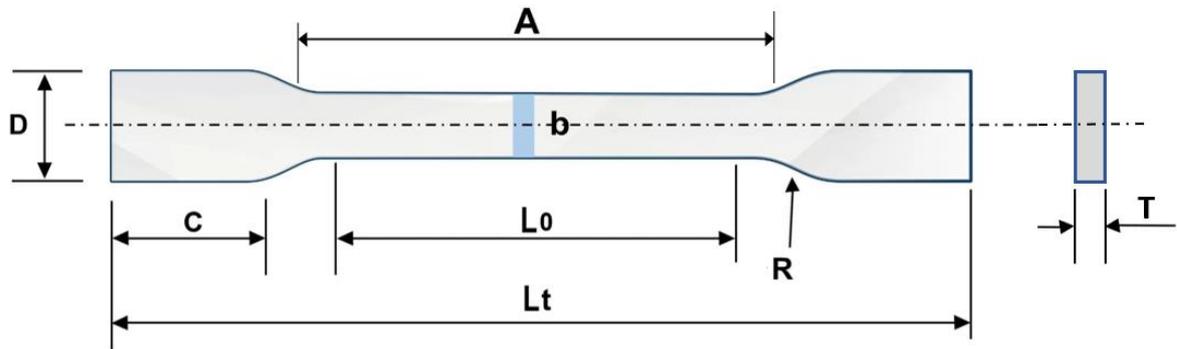
**Figura 21** - Máquina universal de tração



**Fonte:** Autores (2024)

A Figura 22 abaixo mostra um corpo de prova padrão para ensaios de tração e a Tabela 7 mostra os valores dimensionais.

**Figura 22 - Corpo de prova de tração**



Fonte: Adaptado de ASTM A 370 (2006)

**Tabela 7 - Dimensões corpo de prova tamanho reduzido**

<b>DIMENSÕES CORPO DE PROVA TAMANHO REDUZIDO (mm)</b>	
<b>L<sub>0</sub> – Comprimento útil</b>	25,0 ± 0,08
<b>b – Largura</b>	6,25 ± 0,05
<b>T – Espessura</b>	-
<b>R – Raio do Filete, mín.</b>	6
<b>L<sub>t</sub> – Comprimento total, mín.</b>	100
<b>A – Comprimento da seção reduzida, mín.</b>	32
<b>C – Comprimento da seção de acoplamento, mín.</b>	32
<b>D – Largura da seção de acoplamento, aproximada</b>	10

Fonte: Adaptado de ASTM A 370 (2006)

### 3.10. Ensaio Charpy

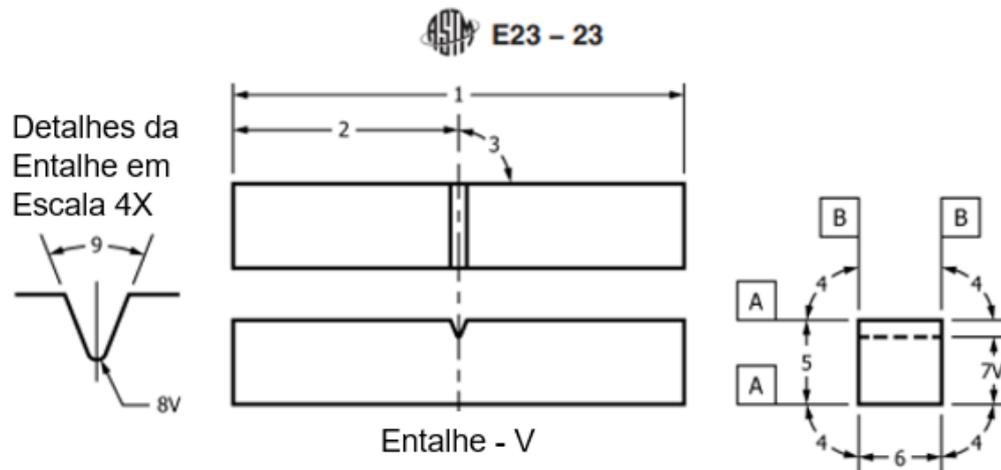
Apesar de existirem ensaios mais complexos e representativos, o ensaio de impacto Charpy é amplamente utilizado mundialmente devido à sua rapidez, baixo custo e simplicidade, sendo obrigatório para testes de aceitação de materiais. O resultado, que é a energia absorvida na ruptura do corpo de prova, pode servir como controle de qualidade desses materiais de acordo com Costa (2014).

O ensaio consiste em romper um corpo de prova com um entalhe central, apoiado nas extremidades, usando o golpe de um pêndulo oscilante. A energia absorvida, geralmente medida em Joules, indica a resistência ao impacto do material segundo Duarte (2006).

Para o ensaio Charpy realizamos 06 corpos de prova de 10 x 10 x 55 mm e entalhe conforme dimensionado na norma ASTM E 23 (2023), mostrado na Figura 23 e a dimensões do corpo de prova conforme Tabela 8, entre os 06 CPs realizamos

03 amostras longitudinais e 03 amostras transversais, como mostrado na Figura 24 plano de corte das amostras do CP de manufatura aditiva, os mesmos foram ensaiados em temperatura ambiente e o equipamento utilizado para a execução do ensaio foi o Izod Pendulum Impact Testing Machine, modelo JB-W300AI/C Figura 25, fabricado pela Time Group Inc. e Jinan Shidai Shijin Instrument Co., Ltd., com energia máxima de 300J para Charpy e 170J para Izod.

**Figura 23** - Dimensionamento do entalhe e corpo de prova



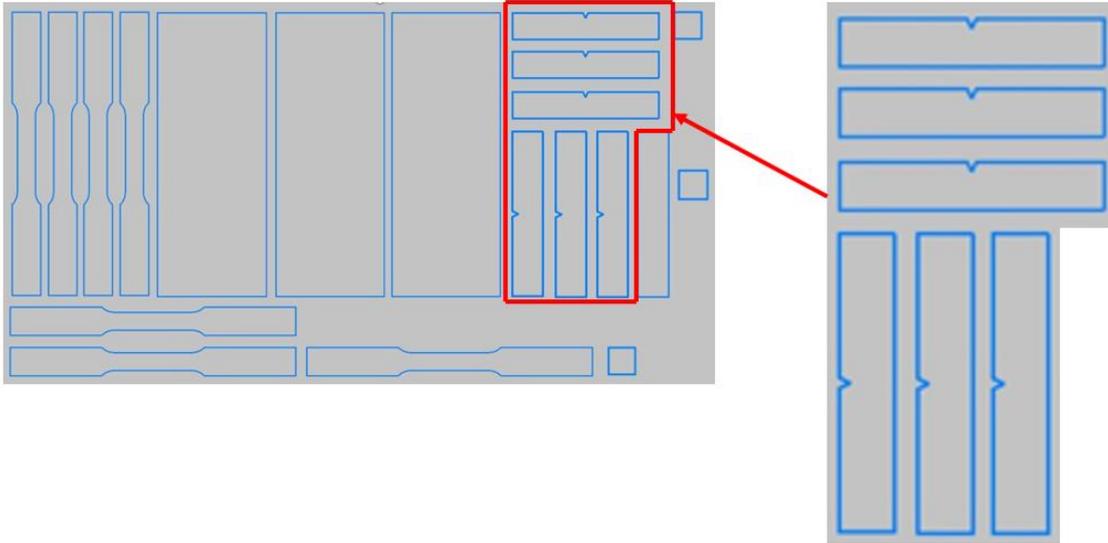
Fonte: Adaptado de ASTM E 23 (2023)

**Tabela 8** - Dimensões e tolerâncias do corpo de prova Charpy

DIMENSÕES E TOLERÂNCIAS			
Número ID	Descrição	Dimensão	Tolerância
1	Comprimento da amostra	55 mm	+0/-2,5 mm
2	Centralização do entalhe	-	± 1 mm
3	Distância do entalhe à borda	90°	± 2°
4	Ângulo dos lados adjacentes	90°	± 0,17°
5	Largura	10 mm	± 0,075 mm
6	Espessura	10 mm	± 0,075 mm
7V	Comprimento do ligamento, tipo V	8 mm	± 0,025 mm
7U	Comprimento de ligamento, tipo U	5 mm	± 0,075 mm
8V	Raio do entalhe, tipo V	0,25 mm	± 0,025 mm
8U	Raio do entalhe, tipo U	1 mm	± 0,025 mm
9	Ângulo do entalhe	45°	± 1°
A	Requisito de acabamento de superfície	2 µm (Ra)	≤
B	Requisito de acabamento de superfície	4 µm (Ra)	≤

Fonte: Adaptado de ASTM E 23 (2023)

**Figura 24** - Plano de corte das amostras do CP de manufatura aditiva



Fonte: Autores (2024)

**Figura 25** - Equipamento de ensaio Charpy



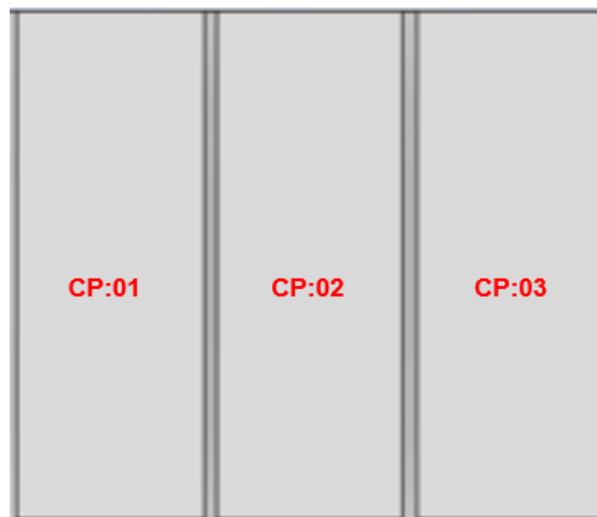
Fonte: Autores (2024)

### 3.11. Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento guiado é uma ferramenta importante para avaliar a ductilidade e o comportamento mecânico de materiais metálicos. A ductilidade é uma propriedade mecânica que indica a capacidade de um material se deformar plasticamente antes de fraturar.

Dessa forma foram realizados 03 ensaios em amostras retangulares com dimensões 10 x 38 x 110 mm conforme ASTM E 190 (2021), para serem submetidas ao ensaio de dobramento. Os dobramentos foram realizados no sentido transversal a progressão de fabricação do corpo de prova de manufatura aditiva conforme Figura 26.

**Figura 26** - Plano de corte das amostras de ensaio para dobramento



**Fonte:** Autores (2024)

O equipamento utilizado para o ensaio de dobramento foi uma prensa hidráulica com capacidade de 10 toneladas e com velocidade de dobramento controlada sendo utilizada a velocidade de 0,01 m/seg. O equipamento é dedicado ao ensaio de dobramento, equipamento ilustrado na Figura 27 mostrada abaixo.

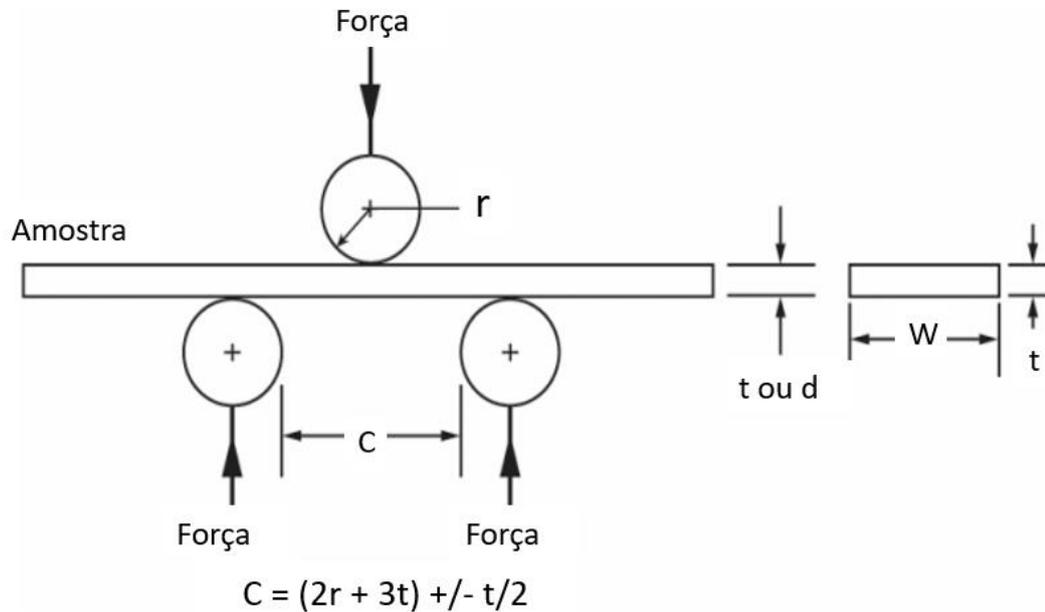
**Figura 27** - Máquina de dobramento



**Fonte:** Autores (2024)

O dimensionamento para a configuração do equipamento sendo este os de distância entre roletes e também de diâmetro do cutelo, foram seguidos a partir da norma ASTM E 290 (2022), onde o diâmetro do cutelo é de 38 mm e a distância entre os roletes 60,2 mm, Figura 28.

**Figura 28** - Ilustração do dimensionamento conforme ASTM E 290 (2022)



Fonte: Adaptado de ASTM E 290 (2022)

### 3.12. Ensaio de dureza

Assim como análise de dureza em juntas soldadas é essencial para avaliar a resistência e integridade estrutural desses componentes o ensaio de dureza e de extrema importância na manufatura aditiva depositado por MADA. A dureza indica a capacidade do material de resistir a deformações e desgastes, propriedades críticas em condições de serviço de acordo com José (2019). O ensaio de dureza Vickers, conforme as normas ASTM E92 (2017) e ASTM E384 (2022) é especialmente útil em juntas soldadas por sua precisão e capacidade de medir materiais finos e detalhes de microdureza.

Este ensaio tem como objetivo avaliar a dureza nas regiões de juntas soldadas por meio do método Vickers, comparando os valores obtidos no corpo de prova com os padrões normativos. A análise busca verificar as características mecânicas a ductilidade e a conformidade do material com as exigências da aplicação prevista.

### 3.12.1. Ensaio de dureza Vickers

Segundo Callister (2008) o ensaio de dureza Vickers consiste em aplicar uma carga controlada sobre um penetrador de diamante em formato de pirâmide quadrada, para avaliar a resistência à deformação em micro e macroestruturas do material.

#### 3.12.1.1. Equipamentos para ensaio de dureza portátil

Os equipamentos a seguir compõem um sistema de medição portátil para o ensaio de dureza Vickers da marca GE, empregado para avaliar a resistência de materiais metálicos a partir do impacto de um indenter. A Figura 29 a seguir demonstra os componentes deste equipamento.

**Figura 29 - Durômetro**



Fonte: Autores (2024)

Item um (1) Unidade de Leitura (MIC 10 da GE Inspection Technologies), dispositivo digital que registra e exibe os valores de dureza após o impacto do indenter no material. Configurável para diferentes escalas de dureza (HV - Vickers, HB - Brinell, HRC - Rockwell). Possui interface de navegação e leitura direta dos resultados. Item dois (2) Indenter, sonda de impacto que entra em contato direto com a superfície do material. Responsável pela aplicação de uma força controlada que mede a resistência ao impacto e dureza. Item três (3) Bloco padrão de calibração, disco metálico com dureza conhecida, essencial para a calibração do equipamento, garantindo a precisão das leituras. Item quatro (4) cabo conector, conecta o indenter à unidade de leitura, transmitindo o sinal gerado após o impacto para a leitura digital.

Esses equipamentos são ideais para ensaios de dureza em locais de difícil acesso ou em peças de grande porte, onde a utilização de máquinas estacionárias seria inviável.

As amostras foram preparadas para garantir uma superfície plana e limpa, com baixa rugosidade de usinagem superficial. O ensaio foi aplicado nas regiões do material para verificar a variação de dureza entre essas áreas.

### 3.13. Caracterização microestrutural e macroestrutural

As análises das macros e microestruturas foram realizadas em um estereoscópio e microscópio digital com ampliação de 50x e 100x da marca Zeiss, modelo AXION 10, através do software Axion Vision SE 64, conforme apresentado nas Figuras 30-A e 30-B.

**Figura 30** - Software Axion Vision SE 64 e microscópio ZEISS Axion 10



Fonte: Autores (2024)

A caracterização macroestrutural e microestrutural do aço inoxidável ER 316 L, produzido pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), foi realizada com o objetivo de analisar as propriedades estruturais do material em diferentes escalas estruturais. As etapas de preparação e análise seguiram os procedimentos descritos no tópico 3.13.1

### 3.13.1. Preparação das amostras

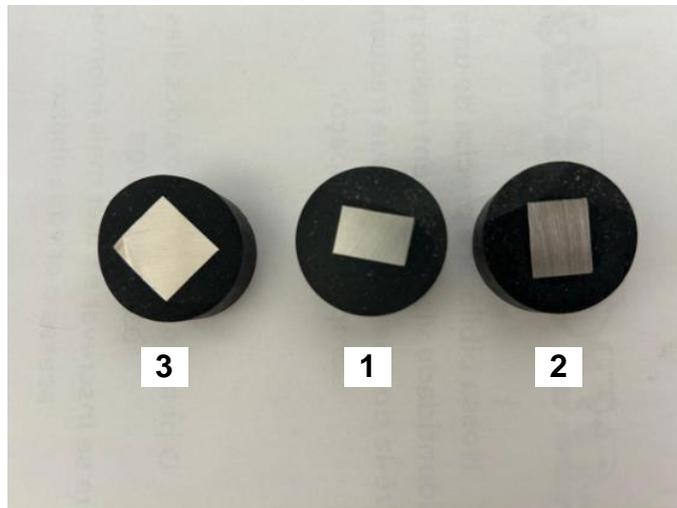
As amostras destinadas à análise microestrutural foram preparadas por meio de embutimento em baquelite, utilizando uma embutidora de fabricação própria da instituição FATEC Itaquera, sob pressão de 150 kgf/cm<sup>2</sup> durante 12 minutos conforme Figura 31. Após o embutimento, das três (3) amostras, sendo amostra um (1) superior ao corpo de prova, amostra dois (2) central ao corpo de prova e amostra três (3) inferior ao corpo de prova todas retiradas transversalmente ao sentido deposição (Figura 32), foram resfriadas com água e submetidas ao lixamento sequencial com lixas d'água de granulometria 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500 mesh, utilizando uma lixadeira / politriz da marca Fortel modelo PLF (Figura 33). Entre as trocas de lixa, as amostras foram giradas perpendicularmente para evitar marcas de lixamento. Em seguida, as superfícies foram polidas com pasta de diamante de 3 µm e 1 µm e lavadas com álcool isopropílico antes de secar.

**Figura 31** - Embutidora Fatec Itaquera



Fonte: Autores (2024)

**Figura 32** - Amostra (1) superior ao corpo de prova, amostra dois (2) central ao corpo de prova e amostra três (3) inferior ao corpo de prova todas retiradas transversalmente



Fonte: Autores (2024)

**Figura 33** - Lixadeira / Politriz Fortel



Fonte: Autores (2024)

### 3.13.2. Ataque químico

Para revelar a microestrutura, as amostras foram submetidas ao ataque químico com solução reagente de Kalling que é composta por 5gr  $\text{CuCl}_2$  + 100ml  $\text{HCl}$  + 100ml álcool etílico (Figura 34). Diversos tempos de ataque foram testados, iniciando com 5 segundos, 15 segundos e finalizando com 12 minutos de ataque pela técnica de esfregamento e após cada etapa, as amostras foram novamente limpas e comprovadas no microscópio óptico para avaliar a revelação da microestrutura.

**Figura 34** - Solução reagente Kalling



Fonte: ES Laboratory LLC

### 3.13.3. Análise microestrutural

As análises foram realizadas utilizando microscópio óptico (marca ZEISS modelo AXION 10) antes do ataque químico, imagens preliminares foram capturadas para avaliação da porosidade e inclusões das amostras utilizando o software dedicado do equipamento AXION VISION SE 64 e o ImageJ, minimizando interferências causadas por ataque químico. Para complementar, foi realizada análise de composição química das amostras

utilizando espectrometria de descarga de massa (EDS), com equipamento Shimadzu EDX-720 (Figura 35). O espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva da marca Shimadzu modelo EDX-720 permite a análise qualitativa e quantitativa de elementos com pesos atômicos entre o Na e o urânio. Este equipamento possui um tubo de raios-X com ânodo de Rh que opera entre 5-50 kV e 1-1.000 mA. Permite a análise de amostras sólidas, líquidas ou em pó. Os tamanhos máximos das amostras permitidas são 300 mm de diâmetro e 150 mm de altura.

**Figura 35** - Espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva



Fonte: Autores (2024)

#### **3.13.4. Análise macroestrutural**

A macrografia é um método de análise que envolve o exame de uma amostra metálica em uma seção plana, previamente preparada e submetida a um ataque químico com reagente adequado. Essa observação pode ser realizada a olho

nu ou com o auxílio de uma lupa. O resultado obtido é denominado macroestrutura. Essa técnica permite identificar a heterogeneidade química presente na estrutura de solidificação, além de alterações ocasionadas por tratamentos subsequentes.

A avaliação macroestrutural foi conduzida por inspeção visual e a captura de imagens digitais das amostras, via estereoscópico ZEISS modelo AXION, conforme Figura 36 destacando a homogeneidade e a distribuição das camadas depositadas durante o processo MADA. Essas análises visaram identificar possíveis erros como porosidade, trincas, inclusões de escoria ou descontinuidades geradas durante a deposição.

**Figura 36** - Estereoscópico ZEISS modelo AXION



Fonte: Autores (2024)

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração mostraram que as amostras ficaram muito próximos às especificações mínimas da norma AWS A5.9 para o material ER 316 L, com resistência à tração superior a 520 MPa, limite de escoamento em torno de 149 MPa e valores de alongamento acima de 30%. Esses dados indicam a adequação do material para aplicações que exigem boa ductilidade e resistência mecânica.

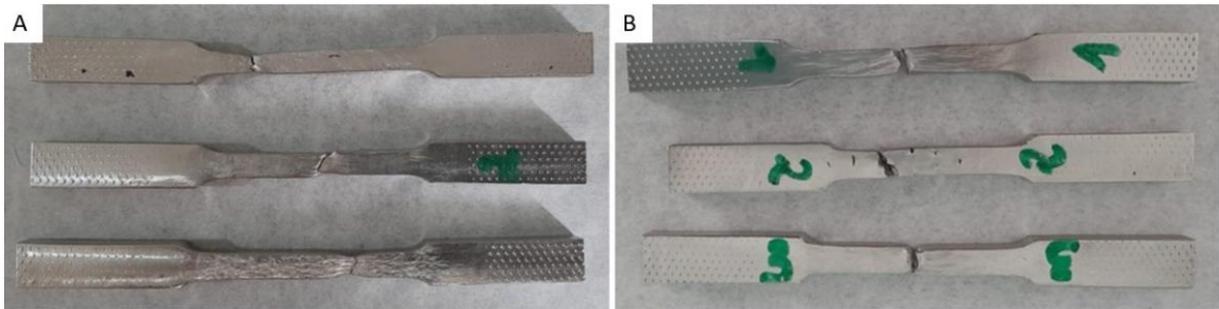
Foi observada uma diferença significativa nas propriedades mecânicas entre os corpos de prova orientados longitudinalmente e transversalmente em relação ao sentido de posição. Os corpos longitudinais apresentaram resistência muito superior devido à orientação dos grãos e à anisotropia, característica do processo MADA, causada pelos ciclos térmicos e pelo padrão de solidificação em camadas.

Embora os valores de alongamento tenham ficado abaixo do esperado para o aço ER 316 L em sua forma convencional, esse comportamento foi associado à presença de ferrita delta, resultando em ciclos rápidos de resfriamento no processo MADA. A ferrita delta, embora aumente a resistência, reduz a ductilidade do material.

Os resultados estão em concordância com estudos como o de Jeong *et al.* (2021), que destacam o impacto dos parâmetros de processo e da solidificação rápida nas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis fabricados por MADA. Ajustes nas configurações de deposição, como redução do transporte térmico ou controle mais específico dos ciclos de aquecimento, podem melhorar essas propriedades.

Os resultados nas Tabelas 9 e 10 reforçam o potencial do processo MADA para produzir peças com propriedades adequadas, mas apontam para a necessidade de ajustes na configuração para melhorar a uniformidade e ductilidade, nas Figura 37 detalhe A e B mostram os corpos de provas ensaiados.

Tais aprimoramentos podem ser explorados em trabalhos futuros, ampliando as aplicações do aço ER 316 L na manufatura aditiva.

**Figura 37** - Corpos de prova do ensaio de tração rompidos

Fonte: Autores (2024)

**Tabela 9** - Resultados dos ensaios de tração das amostras de aço ER 316 L fabricadas por MADA - CP Longitudinais

<b>RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO – CPS LONGITUDINAIS</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Resultados</b>		
	<b>CP 01</b>	<b>CP 02</b>	<b>CP 03</b>
<b>Limite de Tensão a Ruptura (MPa)</b>	520	527	503
<b>Limite de Tensão a Escoamento (MPa)</b>	146	148	154
<b>Alongamento (%)</b>	31	32	31

Fonte: Autores (2024)

**Tabela 10** - Resultados dos ensaios de tração das amostras de aço ER 316 L fabricadas por MADA - CP Transversais

<b>RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO – CPS TRANSVERSAIS</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Resultados</b>		
	<b>CP 01</b>	<b>CP 02</b>	<b>CP 03</b>
<b>Limite de Tensão a Ruptura (MPa)</b>	258	303	312
<b>Limite de Tensão a Escoamento (MPa)</b>	87	67	76
<b>Alongamento (%)</b>	10	22	22

Fonte: Autores (2024)

#### 4.2. Ensaio Charpy

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados em corpos de prova (CPs) produzidos com arame ER 316 L pelo processo MADA, seguindo a norma ASTM E23 para critério de preparação. As amostras foram retiradas em duas orientações: longitudinal e transversal em relação ao sentido de deposição. Os resultados

indicaram uma anisotropia significativa no material, com a maior energia absorvida observada nos CPs retirados no sentido longitudinal, possivelmente devido à orientação favorável da microestrutura em relação ao sentido de deposição (carregamento). Os CPs no sentido transversal apresentaram os menores valores de energia absorvida, o que pode estar relacionado à presença de precipitados intermetálicos e descontinuidades entre as camadas depositadas. Já os CPs longitudinais exibiram valores intermediários. Esses resultados estão conforme Tabelas 11 e 12, destacam a influência do processo de manufatura aditiva na tenacidade ao impacto do material, evidenciando a necessidade de estudos complementares para mitigar os efeitos da anisotropia em aplicações críticas.

**Tabela 11 - Resultados do ensaio de Charpy CPs Transversais**

<b>ENSAIO DE CHARPY (T <i>ambiente</i>) – ASTM E 23 (2023) CPS TRANSVERSAIS</b>	
<b>Disposição</b>	<b>Resultados (J)</b>
<b>CP 1</b>	60
<b>CP 2</b>	58
<b>CP 3</b>	58
<b>Média Transversal</b>	58,67

Fonte: Autores (2024)

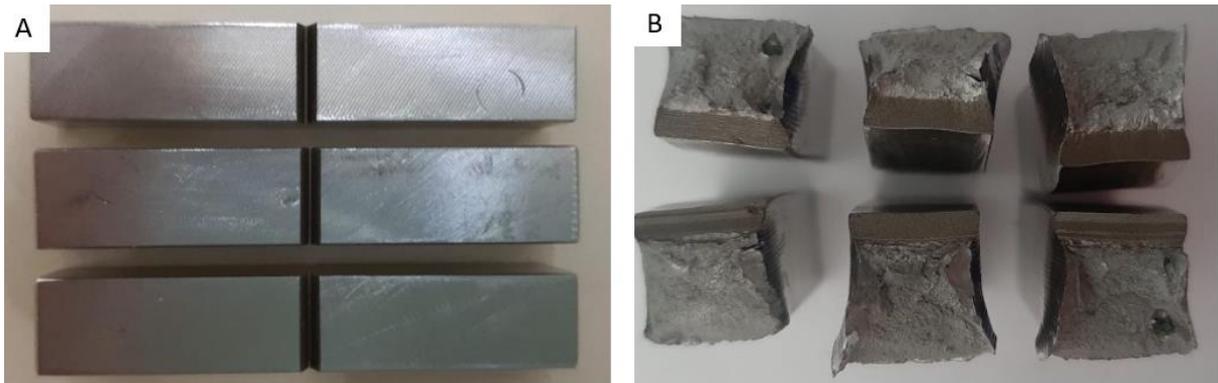
**Tabela 12 - Resultados de ensaio de Charpy CPs Longitudinais**

<b>ENSAIO DE CHARPY (T <i>ambiente</i>) – ASTM E 23 (2023) CPS LONGITUDINAIS</b>	
<b>Disposição</b>	<b>Resultados (J)</b>
<b>CP 1</b>	96
<b>CP 2</b>	106
<b>CP 3</b>	92
<b>Média Longitudinal</b>	98

Fonte: Autores (2024)

O ensaio de Charpy revelou uma fratura dúctil em ambos os sentidos de amostras longitudinais e transversais com valores na longitudinal com valor médio de 98 J e na transversal com valor médio de 58 J, as Figura 38 detalhe A e B mostram os CPs longitudinais e transversais rompidos.

**Figura 38** - Corpos de prova Charpy rompido



Fonte: Autores (2024)

#### 4.3. Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento guiado foi realizado para avaliar a ductilidade das amostras de aço inoxidável ER 316 L produzidas por MADA. As amostras foram submetidas a uma deformação por flexão em uma máquina universal de ensaios. Espera-se que os resultados sejam satisfatórios e que atendam os critérios mínimos da norma ASTM E190 (2021).

Os resultados encontrados foram conforme o esperado de acordo com a Figura 39.

**Figura 39** - Corpo de prova após ensaio de dobramento



Fonte: Autores (2024)

#### 4.4. Ensaio de dureza

Os valores de dureza HV obtidos do corpo de prova removido da parte central e transversal ao sentido de deposição variam de 268 HV a 341 HV, com uma média de aproximadamente 307,42 HV. Essa variação pode ser interpretada conforme a distribuição das regiões.

A Tabela 13 apresenta os valores de dureza HV por pontos obtidos nas diferentes regiões e a Figura 40 evidencia os pontos ensaiados.

**Tabela 13** - Resultados de ensaio de dureza Vickers

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Dureza HV	309	308	268	326	338	316	341	292	301	307	287	296	307,42

Fonte: Autores (2024)

**Figura 40** - Imagem representativa de uma marca de dureza Vickers



**Fonte:** Autores (2024)

Consistência e desvio: a maior parte dos valores está próxima da média, indicando uma consistência razoável na dureza ao longo da amostra, com alguns pontos de leve variação que podem ser atribuídos a diferenças microestruturais na junta.

- Variações por ponto:

Os valores mais baixos de 268 HV (ponto 3) e mais altos de 341 HV (ponto 7) sugerem heterogeneidade típica nas regiões de transição da junta soldada, possivelmente influenciada pela composição química ou pelo processo térmico da soldagem.

- Média de dureza:

A média de 307,42 HV indica uma dureza intermediária para o material, que deve estar adequada para aplicações onde é necessária uma boa combinação entre resistência ao desgaste e capacidade de deformação.

A dureza na zona fundida está dentro dos limites estabelecidos pela ASTM E 384 (2022) está entre 240 e 600 HV conforme Tabela 14 para aços de resistência moderada, indicando que a junta soldada atende às exigências estruturais e de resistência.

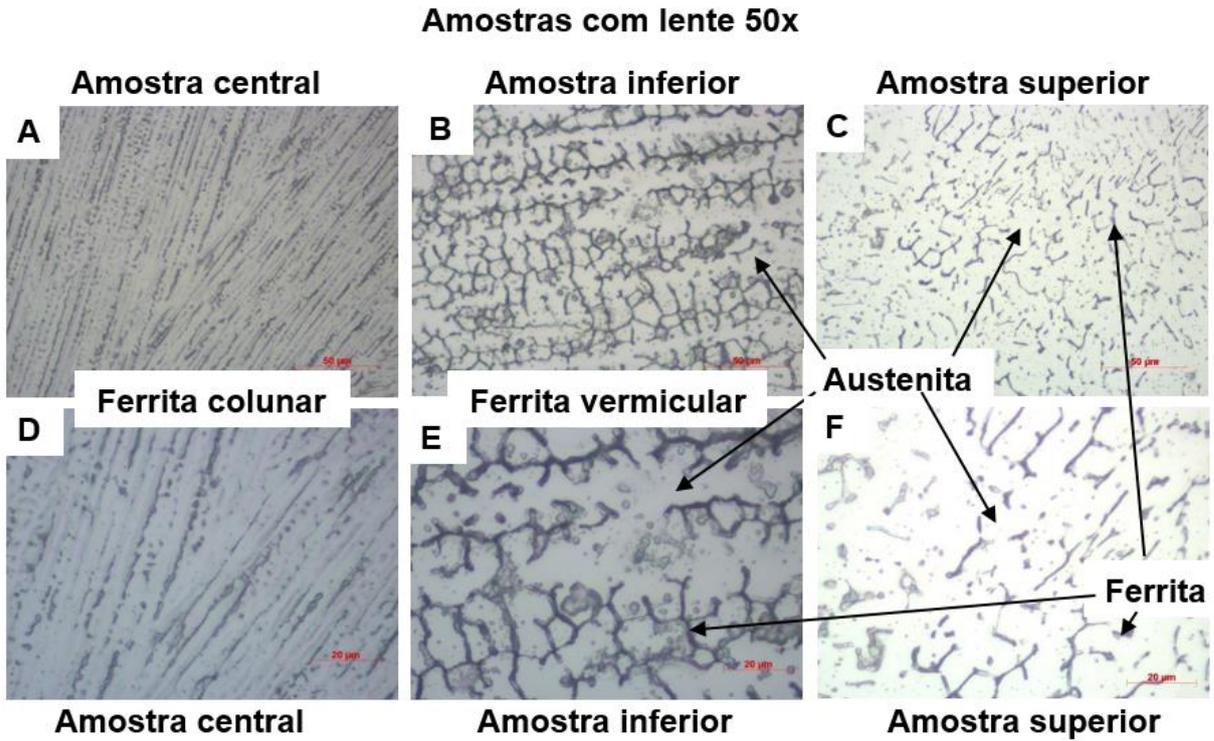
**Tabela 14** - Comparação de valores normativo com o do corpo de prova

<b>FAIXAS DE DUREZA USADAS PARA VERIFICAÇÃO PERIÓDICA</b>		
<b>Faixa</b>	<b>Norma ASTM E 384 (Vickers – HV)</b>	<b>Corpo de prova (Vickers – HV)</b>
<b>Baixa</b>	< 240	Média de 307,42
<b>Média</b>	240 - 600	
<b>Alta</b>	> 600	

**Fonte:** Adaptado ASTM E 384 (2022)

No presente trabalho conforme as imagens na Figura 41, ficou evidenciado o crescimento de algumas estruturas típicas, conforme detalhe de A, B, C, D, E e F, dadas as taxas de resfriamento e gradiente de temperatura, visto o grande aporte térmico imposto por um grande número de passes depositados temos conforme Figura 43-B ferrita vermicular de acordo com o que vamos subindo as camadas depositadas e simultaneamente diminuísse a taxa de resfriamento temos uma estrutura conforme Figura 42-A ferrita colunar e por fim nas ultimas camadas depositadas temos uma estrutura conforme Figura 44-C onde evidenciasse ferrita primaria e austenita.

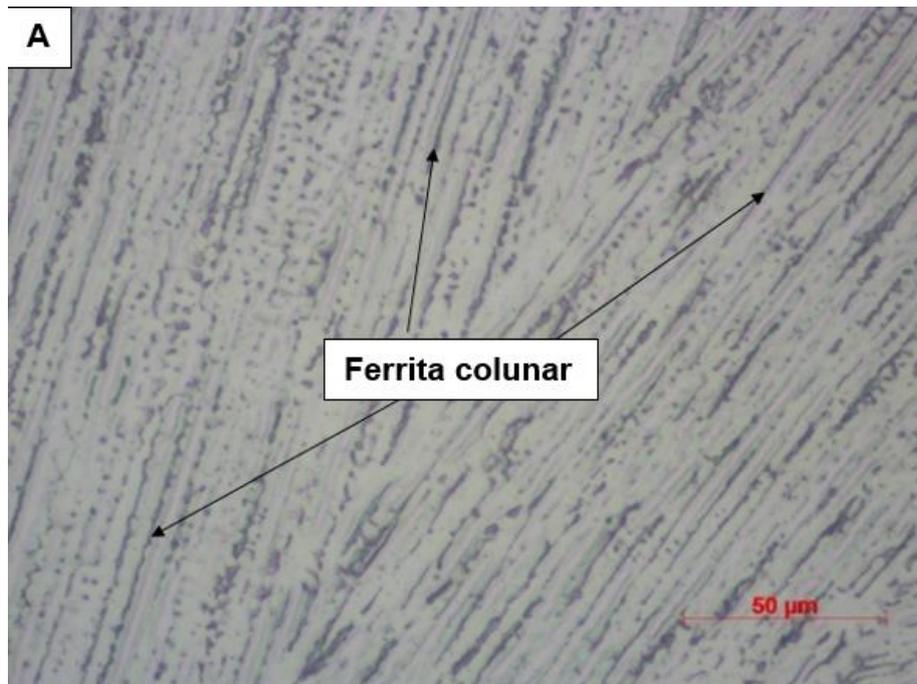
**Figura 41 - Estrutura de solidificação**



**Amostras com lente 100x**

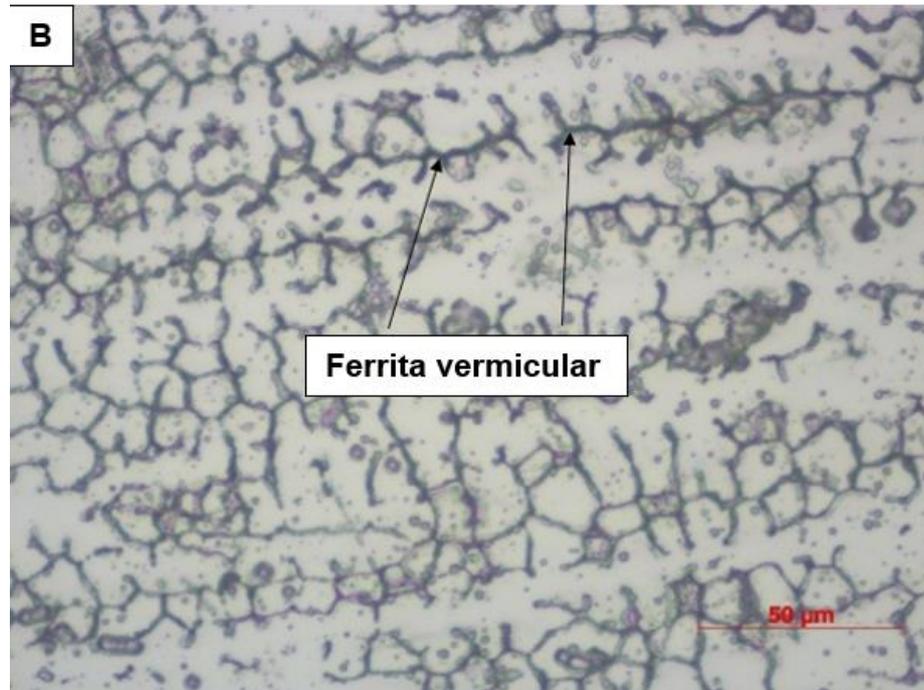
Fonte: Autores (2024)

**Figura 42 - Amostra central (ferrita colunar)**



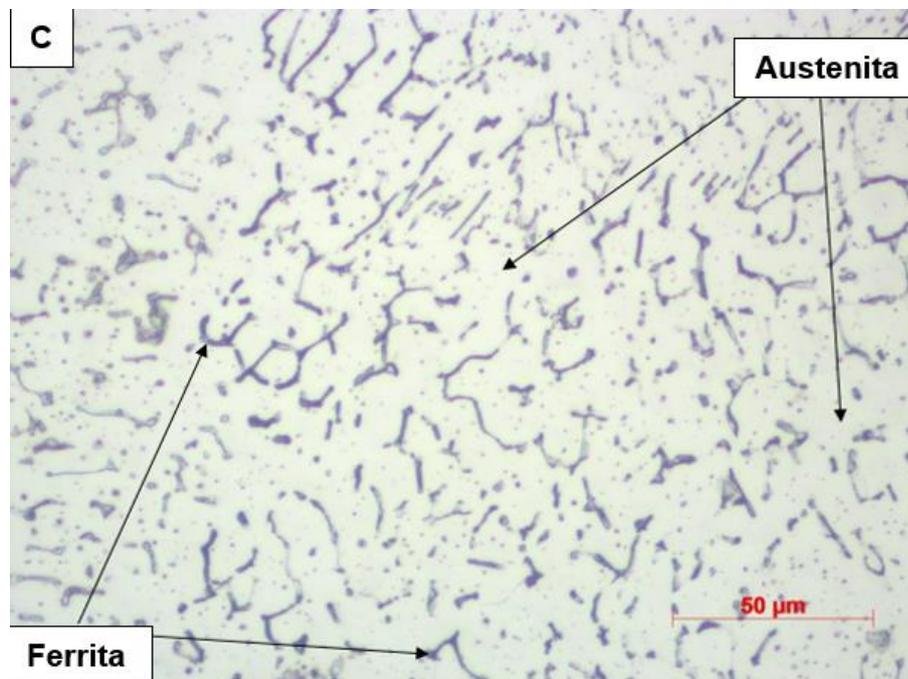
Fonte: Autores (2024)

**Figura 43 - Amostra inferior (ferrita vermicular)**



Fonte: Autores (2024)

**Figura 44 - Amostra superior (ferrita e austenita)**



Fonte: Autores (2024)

Para o complemento das análises micrográficas foi realizado um ensaio de EDS – Espectrometria de fluorescência de raio X por energia dispersiva, este equipamento foi utilizado tubo de raio X com anodo de Rh que opera entre 5 – 50 kV e 1 – 1000 mA, o que nos possibilitou garantir a composição química conforme Tabela 15 abaixo.

**Tabela 15** - Tabela de composição química via EDS

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA CONFORME ENSAIO DE EDS</b>	
<b>Análise</b>	<b>Resultado (% Peso)</b>
<b>P</b>	0,081
<b>S</b>	2,105
<b>Cr</b>	17,859
<b>Mn</b>	4,103
<b>Ni</b>	10,843
<b>Cu</b>	0,110
<b>Mo</b>	2,979
<b>Fe</b>	61,921

Fonte: Autores (2024)

Ainda é possível que tenhamos elementos residuais, pois qualquer elemento com peso atômico abaixo do Na (sódio) não é captado por esse tipo de ensaio, podemos notar também a ausência do elemento C (carbono) que pode se incluir nessa regra acima citada devido ao consumível utilizado para a fabricação do corpo de prova ER 316 L onde a letra “L” significa carbono controlado em até 0,03 % em peso.

#### **4.4.1. Macrografia**

No presente estudo foi verificado uma macrografia apresentada nas imagens a seguir, observa-se que as camadas depositadas pelo processo de soldagem, utilizando o material de adição ER 316 L via manufatura aditiva por deposição a arco, apresentam uma conformidade estrutural satisfatória. Não foram identificadas inclusões, trincas ou descontinuidades significativas ao longo das camadas conforme Figura 45, indicando a eficiência do processo de deposição e técnica de tecimento de cordões conforme Figura 46 amostra central análise macrográfica.

Além disso, é evidente a disposição das camadas transpassadas, refletindo a alternância do sentido de deposição durante o processo, que ocorreu da direita para a esquerda e da esquerda para a direita. Esse padrão é característico do método utilizado, garantindo sobreposição e uma fusão adequada entre as camadas subsequentes.

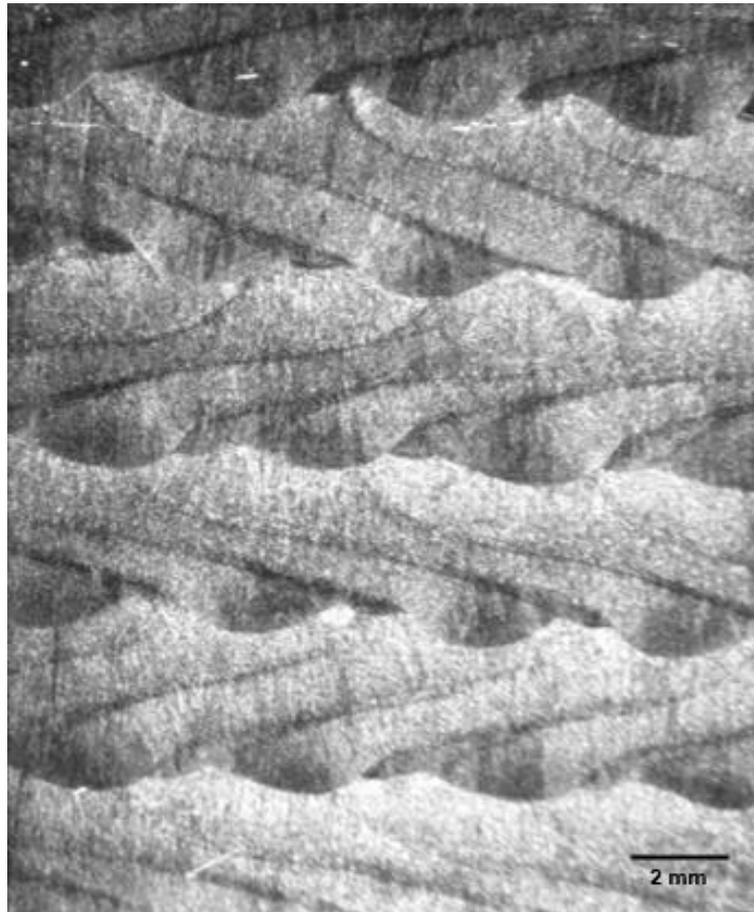
As imagens a seguir ilustram as camadas depositadas, permitindo a observação da qualidade da deposição e corroborando a ausência de defeitos críticos, alinhando-se com os requisitos esperados para aplicações industriais do material.

**Figura 45** - Amostra central (análise de inclusões)



**Fonte:** Autores (2024)

**Figura 46** - Amostra central (análise macrográfica)



**Fonte:** Autores (2024)

## 5. CONCLUSÕES

Mediante os resultados encontrados nesse trabalho percebe-se que a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), utilizando o aço inoxidável ER 316 L, apresenta vantagens significativas em termos de redução de desperdício, economia de material e flexibilidade na fabricação de peças complexas. As análises revelaram que as peças produzidas possuem uma microestrutura ferrítica-austenítica, o que proporciona alta dureza e resistência ao escoamento nos corpos de prova longitudinais, embora a ductilidade seja prejudicada devido à anisotropia e à variabilidade estrutural nos corpos de prova de ensaio de tração transversal. Apesar do potencial econômico e sustentável do processo, desafios como o controle rigoroso dos ciclos térmicos e a otimização das variáveis de fabricação permanecem essenciais para melhorar as propriedades mecânicas e garantir a uniformidade das peças. Assim, o MADA se consolida como uma tecnologia promissora, desde que acompanhada de avanços no controle e na compreensão detalhada dos parâmetros do processo.

Os ensaios mecânicos e metalúrgicos apresentaram os seguintes resultados:

- Tração: As peças atingiram resistência à tração e limite de escoamento dentro dos padrões normativos, mas evidenciaram limitações na deformação antes da ruptura, confirmando a redução da ductilidade.

- Charpy: O ensaio de impacto revelou variações significativas de resistência entre diferentes orientações, reforçando os efeitos da anisotropia na estrutura.

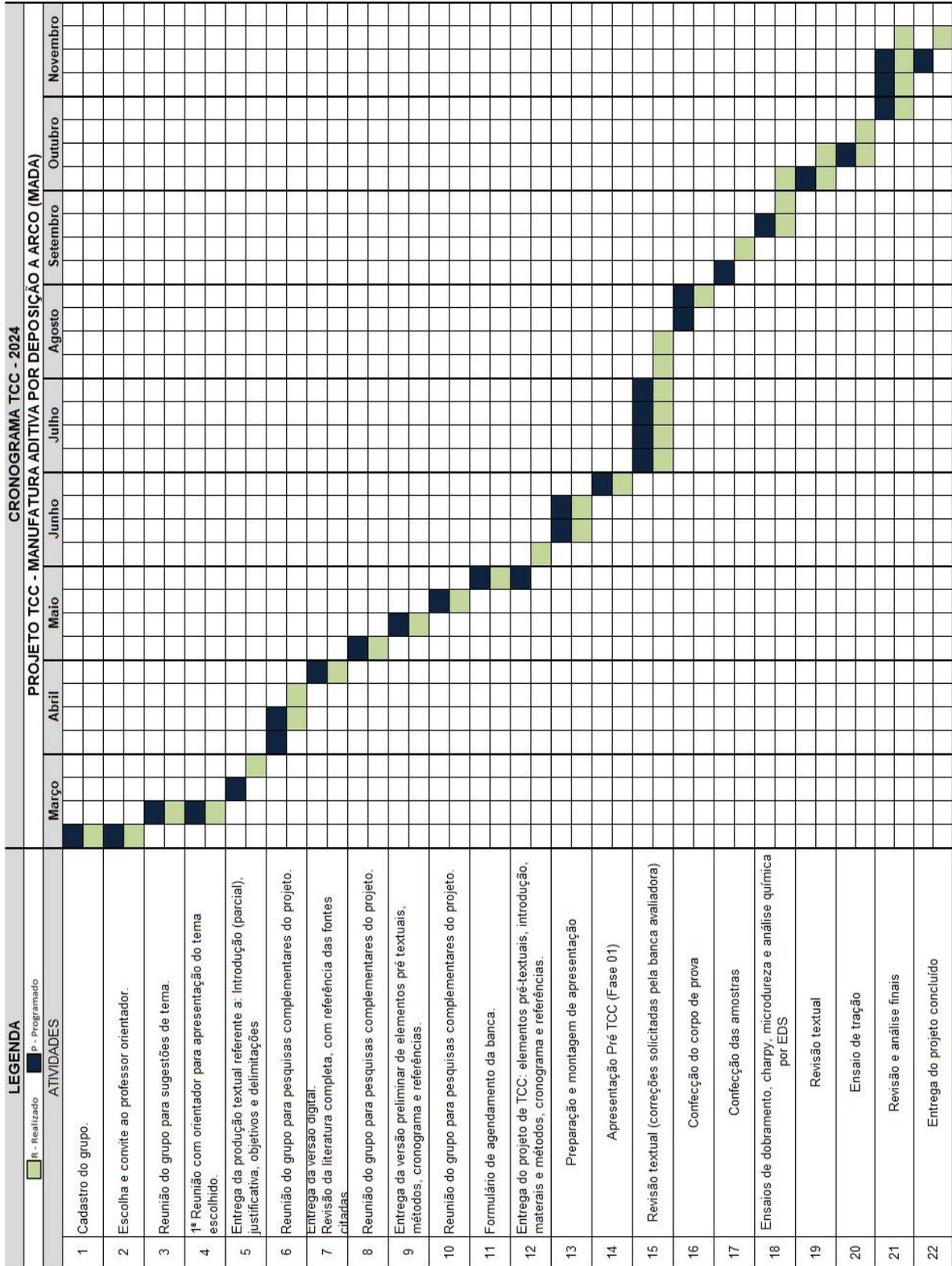
- Dobramento: Os corpos de prova exibiram desempenho satisfatório, com a deformação adequada.

- Dureza: Foi constatada alta microdureza nas amostras devido à formação de microestruturas mais finas, embora essa característica também contribua para a menor ductilidade.

Além disso, as caracterizações química, macroestrutural e microestrutural corroboraram a influência dos ciclos térmicos no processo. A análise química revelou conformidade com os padrões esperados, enquanto as observações micro e macroestruturais destacaram a presença de ferrita com diferentes morfologias, resultante do modo de solidificação. Esses fatores confirmam que a variabilidade microestrutural é uma variável crítica no desempenho final das peças.

O processo MADA apresenta alto potencial para a fabricação de peças complexas e de alta performance. No entanto, para superar desafios como a anisotropia e otimizar as propriedades mecânicas, é indispensável avançar no controle dos ciclos térmicos e na uniformidade da deposição. Com essas melhorias, o MADA se consolida como uma solução sustentável e eficiente para aplicações industriais exigentes.

## 6. CRONOGRAMA



Fonte: Autores (2024)

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de tratamentos térmicos de solubilização e alívio de tensão nas amostras, de modo a analisar suas influências na resistência à tração e no comportamento de corrosão do material.
- Aquisição de imagens de microscopia com maiores detalhes e acurácia, por meio de microscópio eletrônico de varredura.
- A influência do gradiente térmico e resfriamento na solidificação das estruturas cristalinas.
- Avaliar a anisotropia de deposição do processo de soldagem.

## 8. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR ISO 6507-1: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. NBR ISO 6507-2: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. NBR ISO 6507-4: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 4: Tabelas dos valores de dureza.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. NBR 11568: **Materiais metálicos – Determinação do Tamanho de Grão.** Agosto, 2016. ABNT.

Aimara, C. I. **Caracterização Microestrutural, Mecânica E Eletroquímica De Aços Inoxidáveis Austeníticos Utilizados No Acondicionamento De Rejeitos Radioativos De Alto Nível.**, 2000, 103f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Alamr, A., Bahr, D.F., Jacroux, M. (2006). **Efeitos da composição da liga e da química da solução na fratura de filmes passivos em aço inoxidável austenítico.** Corrosion Science, 48, 925-936.

Alberti, E. A.; Bueno, B. M. P.; D'oliveira, A. S. C. M. **Processamento De Ligas De Níquel Com Técnica De Manufatura Aditiva Utilizando Plasma Por Arco Transferido.** Soldagem e Inspecao, v. 20, n. 2, p. 137–147, 2015.  
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.02>

Alberti, E. A.; Silva, L. J. Da; D'oliveira, A. S. C. M. **Manufatura Aditiva: O Papel Da Soldagem Nesta Janela De Oportunidade.** Soldagem & Inspeção, v. 19, n. 2, p. 190–198, 2014.  
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>

Amol B. Kale, Byung-Kyu Kim, Dong-Ik Kim, E.G. Castle, M. Reece, Shi-Hoon Choi, **An investigation of the corrosion behavior of 316L stainless steel fabricated by SLM and SPS te KALE chniques**, *Materials Characterization*, Volume 163, 2020, 110204, ISSN 1044-5803.

<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110204>.

Aref Yadollahi, Nima Shamsaei, Scott M. Thompson, Denver W. Seely, **Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel**, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 644, 2015, Pages 171-183, ISSN 0921-5093,

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.056>

Armao, Frank et al. Gas metal arc welding: **Product and procedure selection**. Cleveland: Lincoln global Inc, 2014.

Astafurov, S.; Astafurova, E. **Phase Composition of Austenitic Stainless Steels in Additive Manufacturing: A Review**. *Metals* 2021, 11, 1052.

<https://doi.org/10.3390/met11071052>

ASTM E23-23 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM E23-23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

ASTM E190-21 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM E190-21: Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

ASTM E290-22 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM E290-22: Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM E384-22 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM A240-02a **ASTM INTERNATIONAL. ASTM A240/A240M-02a: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.

ASME BPVC.II.C-2023 **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessel Code: Section II, Part C, Specification for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals.** New York, NY: ASME, 2023.

ASTM A370-06 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM A370-06: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.

ASTM E08-22 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM E08-22: Standard Terminology for Fatigue and Fracture Testing.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM E92-17 **ASTM INTERNATIONAL. ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM Standard E-1382-97: **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis.** ASTM International, West Conshohocken, PA, EUA (2015) Disponível em: DOI: 10.1520/E1382-97R15.

ASTM Standard E-112. **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken:** ASTM International, 2013.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: an Introduction** (Vol. 9, pp. 96–98). 2018.

Cunningham, C. R.; Wikshåland, S.; Xu, F.; Kemakolam, N.; Shokrani, A.;

Dhokia, V.; Newman, S. T. **Cost Modelling and Sensitivity Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing**. Procedia Manufacturing, [S. l.], v. 11, n. June 2017, p. 650–657, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.163>

Costa M. V.; **Análise da Tenacidade de uma junta soldada de um aço resistente à abrasão da série 450 HB**, 2014.

Duarte A. S.; **Metodologia básica para a produção de materiais de referência para a calibração indireta de máquinas pendulares de impacto Charpy**, 2006

AWS A5.9 - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods**. Miami, FL: AWS, 2023.

Barbedo, J. G. A. (2011). **Soldagem industrial: fundamentos e processos**.

Bellezze et al. (2008). **Melhoria da resistência à corrosão por pites do aço inoxidável AISI 444 para torná-lo uma possível substituição para AISI 304L e 316L em águas naturais quentes**.

Cardoso, Jorge Luiz. (2011). **Avaliação e comparação da resistência à corrosão por pites do aço super austenítico AL 6XN PLUSTM e dos aços inoxidáveis austeníticos da série AISI 304L, 316L e 317L**. Dissertação (Mestrado), UFC, Fortaleza. Cardoso, Jorge Luiz; Silva Nunes Cavalcante, Alfredo Leão; Araujo Vieira, Regina Coeli; de Lima-Neto, Pedro; Gomes da Silva, Marcelo. (2016).

Cary, H. B. **Modern Welding Technology**. 4ª edição, Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA, 1998, 736p.

Chiaverini, V. (2005). **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed., ABM.4o

Davis, J.R. (1999). **Stainless Steels**. ASM International.

Debroy, T.; Wei, H. L.; Zubacyk, J. S.; Mukherjee, T.; Elmer, J. W.; Milewski, J.O.; Beese, A. M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W. **Additive Manufacturing of Metallic**

**Components – Process, Structure and Properties. Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.

Desu, RK; Nitin Krishnamurthy, H.; Balu, A.; Gupta, AK; Singh, SK **Propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico 304L e 316L em temperaturas elevadas**. J. Mater. Res. Tecnologia. **2016**, 5, 13–20.

Drapinski, J. **Elementos de Soldagem**. Mc Graw-Hill, São Paulo, 1978, 280p.

Farshidianfar, M. H.; Khajepour, A.; Gerlich, A. P. **Journal of Materials Processing Technology Effect of Real-Time Cooling Rate on Microstructure In Laser Additive Manufacturing**. Journal of Materials Processing Tech., v. 231, p. 468–478, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.017>

FEDELE, Eng Ricardo. **Corrosão intergranular em juntas soldadas-parte III**. Revista soldagem & inspeção, v. 6, n. 5, p. 6, 2004.

Ferioti, Marco Aurélio; Marcelino, Davi de Medeiros; Pohlmann, Mayara Neves; Martino Neto, José; Rosa, Jorge Luiz. **Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos**. Brazilian Journal of Production Engineering, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 199–218, 2021.

DOI: 10.47456/bjpe.v7i3.34567.

Franco, D. **Impactos da manufatura aditiva no modelo de negócio**. 280.f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2019.

Gonzales, G. et al. – **Controle de usinabilidade do aço AISI 416**. Critérios metalúrgicos e de produção. Metalurgia – ABM, v. 38, n. 300, p.659-663, novembro de 1982.

Hermans, M. J. M.; Den Ouden, G. (1999). **Process behavior and stability in short circuiting gas metal arc welding. Welding Journal**, 137-141.

Jefferson Segundo de Lima. **Análise e seleção de parâmetros para manufatura aditiva por deposição a arco do aço AISI 316LSI utilizando a técnica de curto circuito controlado** – 2023. 124 f.: il., fig. e tab.

Jeong, J.; Lee, Y.; Park, J. M.; Lee, D. J.; Jeon, I.; Sohn, H.; Kim, H. S.; Nam, T.; Sung, H.; Seol, J. G.; Kim, J. G. **Metastable  $\delta$ -Ferrite And Twinning-Induced Plasticity On The Strain Hardening Behavior of Directed Energy Deposition-Processed 304L Austenitic Stainless Steel. Additive Manufacturing**, v. 47, p. 102363, 2021.

Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860421005170?via%3Dihub>

John C. Lippold, Damian J. Kotecki, pp. Wiley-VCH, **Metalurgia de soldagem e soldabilidade de aços inoxidáveis**, março de 2005.

Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005wmws.book.....L/abstract>

Kah, Paul; Suoranta, Raimo; Martikainen, J. **Advanced gas metal arc welding processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, p. 655-674, 2013.

Kou, S. **Welding Metallurgy**. 2003, 466 p

<https://doi.org/10.1002/0471434027>.

Lancaster, J. F. **"The Physics of Welding"**. Pergamon Press, 1986.

Laprosolda; **Laboratório da UFU imprime peças de metal na água. UFU – Universidade Federal de Uberlândia**

Disponível:

<https://comunica.ufu.br/noticias/2020/08/laboratorio-da-ufu-imprime-pecas-de-metal-na-agua>

Li, Y.; Su, C.; Zhu, J. **Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system**, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in Engineering*, v. 13, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>

Lippold, J.C. (2005). **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. John Wiley & Sons.

Machado, A. R. (1996). **Soldagem: fundamentos e tecnologia**.

Machado (2006). **Efeito da temperatura no nível de corrosão causada por petróleo pesado em aço inoxidável austenítico AISI 304 e AISI 444**.

Marques, P. V. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005, 362p.

Miller Electric - **Welding and the World of Metals**. Miller Electric Manufacturing Company, Appleton, USA, 1969, 31p.

Modenesi, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

Mohd Aslam, Chinmaya Kumar Sahoo,

**Numerical and experimental investigation for the cladding of AISI 304 stainless steel on mild steel substrate using Gas Metal Arc Welding**,

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.02.017>

Nadzam, J. et al. **Gas Metal Arc Welding - Product and Procedure Selection**. Lincoln Global Inc.: Cleveland, OH, USA, p. C4, 2014.

NBR 13284: **Preparação de Corpos de Prova para Análise Metalográfica**. Abril, 1995.

Neris, Manoel Messias. Soldagem. Eixo Tecnológico: **Controle e Processos Industriais**. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2012.

Nikolaev G., Olshansky, N. **Advanced Welding Processes**. MIR Publishers, Moscou, 1977, 245p.

Okumura, T., Taniguchi, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, 1982, 461p. QUITES, A. M. Introdução à Soldagem a Arco Voltáico. Soldasof, Florianópolis, 2002, 352p.

Oliveira, C.C.F. (2022). **ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DE PEÇAS IMPRESSAS DE ARAME ER70S-6 OBTIDAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA PROCESSO GMAW-CMT**. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.

Pessanha, E. C. **Quantificação da ferrita delta e avaliação da relação microestrutura/propriedades de um aço inoxidável austenítico 347 soldado** [dissertação de mestrado]. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011

**Pitting corrosion resistance of austenitic and superaustenitic stainless steels in aqueous medium of NaCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**. Journal of Materials Research, 31(12).

Raut, L.P., Taiwade, R, V. 2020. **“Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions”**. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 30 p. 7.

<https://doi.org/10.1007/s11665-021-05871-5>

Rackley, S. A. Power Generation Fundamentals. In: **Carbon Capture and Storage**. Cambridge: Elsevier, 2010. p. 29–64.

Ribeiro, Henrique Vilela et al. Manufatura aditiva: **Encurtar a cadeia logística, fornecendo peças de reposição automotivas**. 2022. 90 f. Trabalho de Conclusão

de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) - Fundação Dom Cabral; Instituto de Transporte e Logística, São Paulo, 2022

Saboori, A.; Aversa, A.; Marchese, G.; Biamino, S.; Lombardi, M.; Fino, P. **Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316L Produced by Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing: A Review.** Appl. <https://doi.org/10.3390/app10093310>

Santos, Givanildo Alves dos. **Tecnologias Mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada.** São Paulo. Érica, 2021.

Schwab, Klaus. **A Quarta revolução industrial.** Tradução: Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016

Saluja, Moeed (2012). **O destaque das transformações de fase e dos constituintes de liga na susceptibilidade à fissuração a quente de soldas de aço inoxidável austenítico tipo 304L e 316L.**

Sedriks, A.J. (1996). **Corrosion of Stainless Steels.** John Wiley & Sons.

Selvi, S., Vishvaksenan, K., & Rajasekar, R. (2018). **Cold Metal Transfer Welding Process.** A Review. Journal of Materials Engineering and Performance, 27(2), 643-654.

Silva, B. H. S; **Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA),** 2020. 102 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

Silva, Gabriel Beires; Da Silva, Luis Henrique Pereira. **Prototipagem de uma impressora 3d de baixo custo.** 2023.

Sourmail et al. (2001). **Precipitação em aços inoxidáveis austeníticos resistentes à fluência.**

Sourmail et al. (2003). **Sensibilização e evolução de zonas empobrecidas em cromo em sistemas FeCr-Ni-C.**

Souza, Adriel Magalhães. **Pós-processamento de peças metálicas produzidas por manufatura aditiva.** 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Suutala, N., Takalo, T. & Moio, T. **Modo de solidificação ferrítico-austenítico em soldas de aço inoxidável austenítico.** Metall Trans A 11, 717–725 (1980).

<https://doi.org/10.1007/BF02661201>

Vídeo explicativo: "**Modos de transferência de metal na soldagem GMAW**". <https://labsolda.ufsc.br/videos/videos-tecnicos/mig-mag/video/soldagem-mig-mag-modo-de-transferencia-globular>

Vieira, L. A. (2006). **Avaliação da tenacidade pós tratamento térmico de alívio de tensões em soldas produzidas com arames tubulares rútilicos que contenham níquel.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.

Villani, D. (2006). Soldagem: **Fundamentos e tecnologia.**

Volpato, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da Manufatura Aditiva.** São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 2017

Wainer, E. **Soldagem, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais,** São Paulo, 1979, 720p.

Wang, C.; Liu, T. G.; Zhu, P.; Lu, Y. H.; Shoji, T. **Study On Microstructure And Tensile Properties Of 316L Stainless Steel Fabricated By CMT Wire And Arc Additive Manufacturing.** Materials Science And Engineering A, v. 796, n. July, 2020.

Wu, B.; Ding, D.; Pan, Z.; Cui, D.; Li, H.; Han, J.; Fei, Z. **Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V.** Journal of Materials Processing Technology, v. 250, p. 304–312, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>

Wu, W.; Xue, J.; Wang, L.; Zhang, Z.; Hu, Y.; Dong, C. **Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing.** *Metals*, v. 9, n. 1, 2019 a. <https://doi.org/10.3390/met9010109>

Xie et al. (2000). **Orientação da transformação  $\gamma$  para  $\alpha$  em aço inoxidável austenítico 304 implantado com Xe.**

Yang, Dongqing; Wang, Gang; Zhang, Guangjun. **Thermal analysis for single-pass multilayer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography.** *Journal Of Materials Processing. Technology*, [S.L.], v. 244, p. 215-224, jun. 2017. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>