



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO 2**

# **ESTUDO DA GEOMETRIA DE PEÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL 410NiMo OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT**

**Matheus André de Araújo Soares**

**Brasília-DF, 27 de setembro de 2022**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

# ESTUDO DA GEOMETRIA DE PEÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL 410NiMo OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT

POR,

**Matheus André de Araújo Soares**

Projeto de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora**

Prof. Dr. Maksym Ziberov, ENM/FT-UnB (*Orientador*)

Profa. Dra. Déborah de Oliveira, ENM/FT-UnB (*Examinadora interna*)

Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho, ENM/FT-UnB (*Examinador interno*)

Profa. Dra. Palloma Vieira Muterlle, ENM/FT-UnB (*Examinadora interna*)

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS676e Soares, Matheus  
ESTUDO DA GEOMETRIA DE PEÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL 410NiMo  
OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT  
/ Matheus Soares; orientador Maksym Ziberov. -- Brasília,  
2022.  
77 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Mecânica) --  
Universidade de Brasília, 2022.

1. Manufatura aditiva. 2. CMT. 3. WAAM. 4. Aço  
inoxidável. 5. 410 NiMo. I. Ziberov, Maksym, orient. II.  
Título.

## **Agradecimentos**

*Agradeço acima de tudo a Deus pela saúde e força durante o período de graduação e por todos os livramentos durante minha vida que me permitiram chegar até aqui. Agradeço também a meu pai e mãe por terem me educado e ensinado os valores primordiais da vida, além de todo apoio que necessitei. Também sou grato pela minha namorada Ana Carolina, por ter ajudado em momentos difíceis e me motivado a dar meu melhor. E sou extremamente grato ao Prof. Dr. Maksym Ziberov por ter primeiramente me aceitado como orientando, por todas as horas gastas, inclusive finais de semana e feriados, ensinando a melhor forma de se escrever e conduzir este trabalho e também por todas as conversas construtivas, muitas vezes não relacionadas ao trabalho, que com certeza me fizeram crescer e desenvolver, não só como engenheiro, mas principalmente como pessoa. Agradeço ainda a minha colega de curso Catarina Fernandes por ter me apresentado ao professor e pelo apoio e motivação durante o desenvolvimento do trabalho, assim como o mestrando André Novelino, por todo tempo disponibilizado para me ajudar, tanto na escrita quanto nas deposições. Aos servidores Rafael do SG9, Ivan, Prof. Dr. Guilherme Caribé, e Profa. Dra. Paloma Vieira por ajudar no desenvolvimento ou correção do trabalho. Agradeço à Prof. Dr. Déborah de Oliveira pelo auxílio no desenvolvimento do artigo relacionado a microusinagem. Minha mais sincera gratidão a todos que me auxiliaram e contribuíram de alguma forma nessa minha formação.*

*Matheus André de Araújo Soares*

---

## RESUMO

A manufatura aditiva se tornou um ponto de pesquisa mundial por conta da maior possibilidade em relação a produção de geometrias complexas e com a possibilidade de manufatura de maneira remota para se desenvolver e produzir peças. Uma das formas de manufatura aditiva de metais é a por deposição a arco que utiliza de equipamentos de soldagem (fontes, gases de proteção, alimentadores de arame) a fim de se obter o produto final. Dentro desse método encontra-se o *Cold Metal Transfer* (CMT), desenvolvido para se utilizar uma menor energia no processo de deposição do material, melhorando a qualidade da peça através de maior controle dos parâmetros, quando comparados com processos convencionais. A liga 410 NiMo apresenta propriedades que a torna requerida por indústrias como a naval, a automotiva e a aeroespacial, em especial por sua qualidade de resistência a cavitação, corrosão e abrasão. Com isso o objetivo deste trabalho é analisar e obter parâmetros de deposição, sobretudo a velocidade de deslocamento da tocha e de alimentação do arame, que tornem possível a obtenção de peças com maior altura e área efetiva, juntamente com menor largura, gerando maior aproveitamento do material depositado quando comparado com processos convencionais de deposição a arco. Ressalta-se que foi efetuada a comparação de eficiência de processos convencionais e o CMT. Para tal foram depositados 7 cordões simples, analisando sua geometria e ângulo de molhamento, assim como a presença de descontinuidades; e com as melhores características foram utilizados os mesmos parâmetros nas paredes de 5 camadas, analisando novamente de maneira visual a presença de descontinuidades, e geometria, porém priorizando o cordão com maior altura e menor largura, ou seja, com maior área efetiva e conseqüente maior aproveitamento de material. Em seguida foram depositados 2 paredes de 15 camadas, para também se obter a maior área efetiva, depositando então as paredes de 30 camadas, sendo essas divididas em blocos (deposição de 15 camadas, aguardando o resfriamento da peça, e depositando mais 15 camadas) a fim de se analisar o efeito da temperatura reduzida naquela camada, em relação a geometria final, a outra parede de 30 camadas foi depositada de forma contínua, sem interrupção do arco e, por fim, foi depositada uma parede de 30 camadas com temperatura de interpasse controlada, entre 45°C e 55°C, para se estudar o efeito na geometria, decorrente do menor aporte térmico entre camadas depositadas. Observou-se com isso que nenhuma das deposições apresentaram descontinuidades/defeitos superficiais que pudessem ser analisados de forma visual; nos cordões houve o efeito de *humping* no intervalo de velocidades de alimentação do arame entre 1,7 m/min e 3 m/min, aliados a 5 mm/s de velocidade de deslocamento da tocha. O cordão escolhido com os melhores parâmetros, sendo 3 mm/s de velocidade de deslocamento e 1,8 m/min de velocidade de alimentação do arame, obteve ângulo de molhamento próximo de 90°, com altura média 25% maior que os outros cordões. Com as deposições de paredes com 5 camadas, a velocidade de deslocamento da tocha em 6 mm/s, resultou em redução de até 22% na largura das deposições, assim como a subida entre passes de 2 mm ao invés de 1 mm, reduziu em até 27% o efeito de borda, aumentando a área efetiva em todo o comprimento da parede. Nas paredes de 15 camadas, a distância de subida entre passes foi crucial para a obtenção de paredes lineares sem angulação das bordas, tendo um melhor aproveitamento de material. Nas deposições de 30 camadas, a parede depositadas em blocos apresentou um aumento de 1,5% na altura e 2,5% na área efetiva quando comparada a parede depositada de forma contínua, já a deposição com controle de temperatura interpasse teve um aumento de 24% na altura média e redução de 31% na largura média, quando comparada com a parede depositada em blocos, significando uma melhora de 6% na área efetiva da deposição. Além disso, a deposição por CMT convencional utilizou 37% menos energia que o GMAW convencional.

**Palavras-chaves:** Manufatura aditiva, CMT, WAAM, aço inoxidável, 410NiMo.

---

## ABSTRACT

Additive manufacturing has become a worldwide research point because of the greater possibility in relation to the production of complex geometries and the possibility of manufacturing remotely to develop and produce parts. One of the forms of additive manufacturing of metals is the arc deposition that uses welding equipment (sources, shielding gases, wire feeders) in order to obtain the final product. Within this method there is the Cold Metal Transfer (CMT), developed to use less energy in the material deposition process, improves the quality of the part through greater control of parameters when compared to conventional processes. Alloy 410 NiMo has properties that make it required by industries such as naval, automotive and aerospace due to its qualities such as resistance to cavitation, corrosion and abrasion. Thus, the objective of this work is to analyze and obtain deposition parameters, in particular the torch travel speed and wire feed, which make it possible to obtain parts with greater height and effective area, together with smaller width, generating greater use of the material deposited when compared with conventional arc deposition processes, in addition, the efficiency comparison of conventional processes and the CMT was made. For this, 7 simple beads were deposited, analyzing their geometry and wetting angle, as well as the presence of discontinuities, and with the best characteristics, the same parameters were used in the 5-layer walls, analyzing again in a visual way the presence of discontinuities, and geometry, but prioritizing the cord with greater height and less width, that is, with greater effective area, and consequent greater use and material. Then, 2 walls of 15 layers were deposited, to also obtain the largest effective area, then depositing the walls of 30 layers, these were divided into blocks (deposition of 15 layers, waiting for the part to cool, and then depositing 15 more layers) In order to analyze the effect of the reduced temperature in that layer, in relation to the final geometry, the other wall of 30 layers was deposited continuously, without interruption of the arc and finally a wall of 30 layers with controlled interpass temperature was deposited. , between 45 °C and 55 °C, to study the effect on the geometry, resulting from the lower heat input between deposited layers. It was seen with this that none of the depositions presented discontinuities/surface defects that could be analyzed visually, in the strands there was a humping effect in the range of wire feed speeds between 1.7 m/min and 3 m/min combined with 5 mm/s torch travel speed. The bead chosen with the best parameters, being 3 mm/s of displacement speed and 1.8 m/min of wire feed speed, obtained a wetting angle close to 90°, with an average height 25% greater than the other beads. With the 5-layer wall depositions, the torch travel speed at 6 mm/s resulted in a reduction of up to 22% in the width of the depositions, as well as the rise between passes of 2 mm instead of 1 mm, reduced in up to 27% the edge effect, increasing the effective area along the entire length of the wall. In the 15-layer walls, the rise distance between passes was crucial to obtain linear walls without edge angulation, having a better use of material. In the depositions of 30 layers, the wall deposited in blocks presented an increase of 1.5% in height and 2.5% in the effective area when compared to the wall deposited continuously, whereas the one with interpass temperature control had an increase of 24 % in the average height and 31% reduction in the average width, when compared to the wall deposited in blocks, meaning a 6% improvement in the effective deposition area. In addition, conventional CMT deposition used 37% less energy than conventional GMAW.

**Keywords:** Additive manufacturing, CMT, WAAM, stainless steel, 410NiMo.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	3
1.2	JUSTIFICATIVA .....	3
1.3	OBJETIVO.....	3
1.4	NOTAS DO AUTOR.....	Erro! Indicador não definido.
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1	PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	4
2.1.1	PROCESSOS MIG/MAG .....	5
2.1.1.1	PROCESSO MIG/MAG PULSADO .....	6
2.1.1.2	PROCESSO CMT .....	8
2.2	SOLDABILIDADE DOS METAIS.....	9
2.2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS.....	9
2.2.2	SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS .....	10
2.2.3	DIFERENÇA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.....	12
2.3	MANUFATURA ADITIVA.....	14
2.3.1	MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO.....	17
2.3.2	MANUFATURA ADITIVA DE AÇOS INOXIDÁVEIS .....	20
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO .....	23
2.5	DEFEITOS EM AÇOS INOXIDÁVEIS PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO .....	26
<b>3</b>	<b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.1	TRABALHOS BASE.....	30
3.2	METODOLOGIA.....	31
3.3	MÉTODO DE DEPOSIÇÃO.....	34
3.4	MEDIÇÕES .....	34
3.5	EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS .....	34
3.6	NORMAS .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>36</b>
4.1	ANÁLISE DOS CORDÕES DEPOSITADOS.....	36
4.2	ANÁLISE DAS PEÇAS DE 5 CAMADAS .....	42
4.3	ANÁLISE DAS PAREDES DE 15 CAMADAS.....	45
4.4	ANÁLISE DAS PEÇAS DE 30 CAMADAS .....	48
4.4.1	Parede De 30 Camadas Sem Arco Interrompido .....	48
4.4.2	Parede De 30 Camadas Com Arco Interrompido.....	51
4.5	ANÁLISE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS DEPOSIÇÕES.....	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>57</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	57
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>
	Apêndice A.....	Erro! Indicador não definido.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de geometrias complexas depositadas (SPARTACUS3D, 2020).....	1
Figura 2 - Impressora 3D, próteses prontas e modelagem odontológica (FORMLABS, 2019).....	2
Figura 3 - Principais processos de soldagem (NERIS, 2012, p. 6).....	4
Figura 4 - Equipamentos para soldagem MIG/MAG (ESAB, 2022).....	5
Figura 5 - Ilustração da soldagem por transferência globular híbrida com laser (SHUANGYU et.al, 2018).....	6
Figura 6 - Modos de transferência metálica, spray (SCOTTI et. al, 2012).....	6
Figura 7 - Sinal de pulso, corrente e tensão de formato de onda (FUJIWARA et.al, 2020).....	7
Figura 8 - Quantidade e tamanho dos respingos de acordo com o gás utilizado (ZHAO et.al, 2018).....	7
Figura 9 - Ciclo elétrico CMT (PICKIN e YOUNG, 2006).....	8
Figura 10 - Ciclo elétrico CMT com imagens (MEZRAG et al., 2018).....	9
Figura 11 - Propriedades físicas do cobre e DSS (SHOKRI et al., 2017).....	10
Figura 12 - Imagens dos cortes transversais: soldagem feita com uma passagem (a), duas passagens (b) e dois pontos de solda (c). (TOMASHCHUK et al., 2015).....	11
Figura 13 - Representação esquemática mostrando a soldagem híbrida laser-arco (RAMKUMAR et al., 2019).....	13
Figura 14 - Efeitos dos gases de proteção em diferentes zonas das junções da soldagem (ZHANG et al., 2017).....	13
Figura 15 - Princípios dos processos de MA de etapa única e multi-etapas (adaptado de ISO, 2015)..	14
Figura 16 - Princípios dos processos de MA de etapa única para metais (ISO, 2015).....	15
Figura 17 - Visão geral dos princípios do processamento de etapa única para cerâmicas (ISO, 2015)	15
Figura 18 - Visão geral dos princípios do processamento de etapa única para polímeros (ISO, 2015)	16
Figura 19 - Visão geral dos princípios do processamento multi-etapas para metais, cerâmicas e compósitos (ISO, 2015).....	16
Figura 20 - Sistema de MADA robotizado (adaptado de DING et al., 2015).....	17
Figura 21 - (a) Turbina fabricada, (b) montagem em máquina de usinagem, (c) peça final, após usinagem (NAGAMATSU et al., 2020).....	18
Figura 22 - Diferentes formatos de exemplares depositados (CHEN et al., 2018).....	19
Figura 23 - superfície das camadas depositadas (a) e estrutura das paredes em corte transversal (ALI et al., 2019).....	19
Figura 24 - a) Porosidade do material como fabricado (AF) e após tratamento térmico (HT), com o método de spray frio (CS) e SLS. b) resistência a tração e alongamento das mesmas peças. (YIN et al., 2019).....	20
Figura 25 - Dimensões da deposição em paralelo e deposição oscilatória (CABALLERO et al., 2019).....	21
Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos por simulação e de forma experimental, a) pontos	



de 0 a 1s e b) até 60s. (adaptado de LEE, 2020).....	22
Figura 27 -(a) Locais de retirada de amostra. (b) dimensão da amostra para teste de tração. (WANG et al., 2019) .....	23
Figura 28 -(a) Diagrama da montagem experimental e (b) formato da deposição. (PARK e LEE, 2021) .....	24
Figura 29 - Distribuição de temperatura de diversas camadas depositadas, (a) terceira camada, (b) sexta camada, (c) nona camada, (d) décima camada. (PARK e LEE, 2021) .....	24
Figura 30 - Comparação entre o modelo em CAD e a geometria obtida (ROY et al., 2021).....	25
Figura 31 - Representação esquemática da distribuição dos furos e a camada de deposição (adaptado de RAMALHO et al., 2021) .....	26
Figura 32 - Deposição a arco com uma direção e alturas distintas a) e b) com duas direções e altura nivelada (HOSSEINI et al., 2019) .....	27
Figura 33 - Face transversa fadigada, ambas apresentando porosidade de gases externos, indicando início de trinca. (a) 0,8x-(b) 4x-(c) 0,8x-(d) poro aumentado em 4x. (SALES et al., 2021) .....	28
Figura 34 - Microestrutura e fractografia do (c) como depositado, (d) LA, (e) FA e (f) HT. (ZHU et al., 2020) .....	29
Figura 35 - Macroestrutura e geometrias das amostras de acordo com a temperatura de interpasse e a temperatura de pré-aquecimento, vistas do microscópio (SANTOS, 2018).....	31
Figura 36 - Estratégia de deposição da peça (BRUNO, 2019) .....	32
Figura 37 - Medidas analisadas no cordão de solda “a)” e na parede “b)” (NOVELINO, 2021) .....	34
Figura 38 – Fluxograma dos ensaios.....	35
Figura 39 - TransPulse Synergic 5000 CMT (HBT-WELD, 2022).....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de ligas de aço (SAE/AISI, 2012) .....	10
Tabela 2 - Propriedades físicas do cobre e DSS (adaptado de SHOKRI et al., 2017).....	10
Tabela 3 - Composição química do arame (adaptado de ESAB, 2019).....	34
Tabela 4 - Parâmetros médios de deposições dos cordões simples. ....	35
Tabela 5 - Medidas de altura e largura do Cordão 1.....	36
Tabela 6 - Medidas de altura e largura do Cordão 2.....	36
Tabela 7 - Medidas de altura e largura do Cordão 3.....	37
Tabela 8 - Medidas de altura e largura do Cordão 4.....	38
Tabela 9 - Medidas de altura e largura do Cordão 5.....	38
Tabela 10 - Medidas de altura e largura do Cordão 6.....	39
Tabela 11 - Medidas de altura e largura do Cordão 7.....	39
Tabela 12 - Dados médios das deposições das paredes com 5 camadas.....	41
Tabela 13 - Medidas de altura e largura do Parede 5.1.....	42
Tabela 14 - Medidas de altura e largura do Parede 5.2.....	42
Tabela 15 - Medidas de altura e largura do Parede 5.3.....	43
Tabela 16 - Medidas de altura e largura do Parede 5.4.....	43
Tabela 17 - Dados médios das deposições das paredes com 15 camadas.....	45
Tabela 18 - Medidas de altura e largura do Parede 15.1.....	45
Tabela 19 - Medidas de altura e largura do Parede 15.2.....	46
Tabela 20 - Dados médios das deposições das paredes com 30 camadas.....	47
Tabela 21 - Medidas de altura e largura do Parede 30.1.....	48
Tabela 22 - Medidas de altura e largura do Parede 30.2.....	49
Tabela 23 - Média da energia de soldagem por deposição CMT e GMAW.....	51
Tabela 24 - Medidas de altura e largura da parede com temperatura de interpasse controlada.....	52
Tabela 25 - Imagens e valores das seções transversais dos cordões simples.....	53
Tabela 26 - Imagens e valores das seções transversais das paredes com 5 camadas.....	53
Tabela 27 - Imagens e valores das seções transversais das paredes com 15 camadas.....	54
Tabela 28 - Imagens e valores das seções transversais das paredes com 30 camadas.....	54

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Gregos

$\delta$  Delta

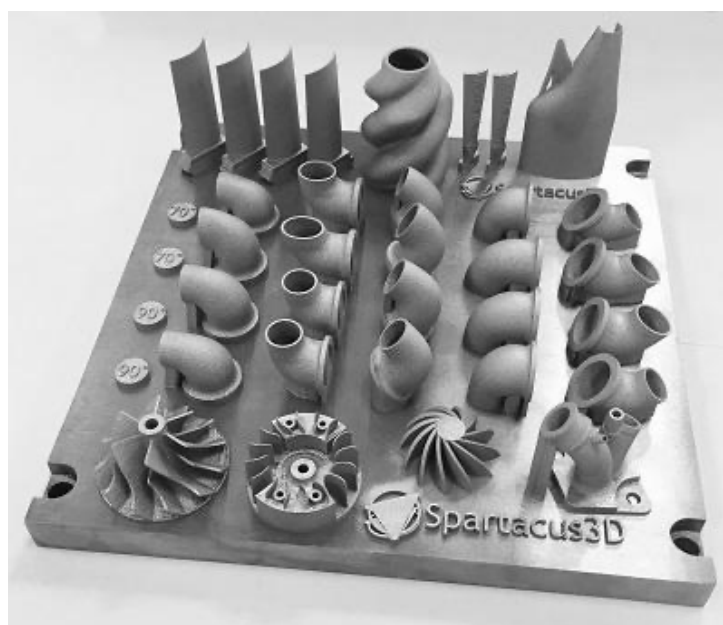
## Nomenclaturas

### Siglas

A-TIG	<i>Active Tungsten Inert Gas</i>
AISI	<i>American Iron And Steel Institute</i>
AMS	<i>American Welding Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	Controle Numérico por Computador
DMLS	Sinterização a laser direta de metal
DSS	<i>Duplex Stainlees Steel</i>
EBM	Fusão por feixe de elétrons
FCAW	<i>Flux-cored Arc Welding</i>
FDM	Modelagem por Deposição Fundida
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
IJP	Impressão 3D a jato de tinta
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LOM	Manufatura de objetos laminados
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MAG	<i>Metal active gas</i>
MIG	<i>Metal inert gas</i>
MJP	Impressão <i>multi-jet</i>
PJP	Impressão 3D <i>polyjet</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

# 1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) é o processo de se criar um objeto com três dimensões, baseado em um *design* pré-estabelecido em um *software* de modelagem, através da deposição de camadas de materiais, podendo formar geometrias complexas de forma precisa e até remota, como utilizadas em diversas indústrias, tais como as bases de petróleo (TOTVS, 2020). Esse processo vem ganhando cada vez mais espaço nos últimos anos, devido a melhoria na qualidade dos equipamentos utilizados e, conseqüente, melhora no produto final. Algumas vantagens dessa forma de manufatura foram estudadas por Paolini et al. (2019), citando alguns exemplos como a alta mecanização, diminuindo consideravelmente a necessidade de mão de obra, reduzindo custos, possibilidade de funcionar em ambientes desfavoráveis como em locais de desastre natural ou até mesmo em outros planetas, além da liberdade de *design*, sendo possível produzir peças com geometrias internas complexas e com um peso reduzido. Essa vantagem de produzir peças complexas pode ser vista na Figura 1, sendo a MA utilizada para manufaturar hélices de turbinas, que necessitariam de diversos processos até a finalização, já com a MA a peça pode ser feita no formato final, gerando uma peça complexa com alta resistência e menor massa (Spartacus3D, 2020).



**Figura 1-** Exemplos de geometrias complexas depositadas (SPARTACUS3D, 2020)

As infinitas possibilidades e aplicações geram interesse de diversas áreas, como exemplo a naval, que já utiliza do processo para produzir propulsores de embarcações. A indústria aeroespacial também utiliza da MA visto a necessidade de extrema precisão e qualidade dos componentes das máquinas criadas. Um exemplo de aperfeiçoamento em sua produção foi na empresa Airbus, que utilizou a deposição para produzir peças para satélites, utilizando metade do tempo convencional (AIRBUS, 2021). Já para a indústria automotiva, foi utilizado esse método de impressão de peças para automóveis de alta performance, como na fórmula 1, que produziu, por exemplo, freios com formas extremamente complexas, os quais foram possíveis de ser fabricados de forma eficiente somente com a MA. Outro tipo de indústria que está aumentando a utilização da MA é a médica e odontológica, produzindo desde moldes para ossos, próteses e dentes como pode ser verificado na Figura 2, até produtos finais menores, como modelos vasculares para estudos e futuras aplicações em humanos.



**Figura 2-** Impressora 3D, próteses prontas e modelagem odontológica (FORMLABS, 2019)

Javaid et al. (2019) analisando os tipos de MA, explicitou alguns métodos utilizados como:

- Estereliotografia (SLA) utiliza materiais poliméricos sensíveis a luzes ultravioletas tendo uma variedade de materiais limitada vista esta condição, porém tem o benefício de se ter uma superfície melhor acabada e menor desperdício de material.

- Sinterização seletiva a laser (SLS) utiliza um raio de laser o material base em pó é sinterizado.

- Modelagem por deposição fundida (FDM) similar ao processo de manufatura por adição o material geralmente termo plástico é aquecido até a fusão e adicionado camada por camada a fim de se ter a peça final podendo ter a utilização de diversos materiais ao mesmo tempo com a utilização de mais de um bico.

- Sinterização a laser direta de metal (DMLS) também utiliza processo camada por camada, porém com o metal de material base, que utilizando laser funde o metal até um ponto definido, tendo assim alta precisão e melhores propriedades mecânicas, quando comparado com processos similares.

- Impressão 3D polyjet (PJP) assim como a SLA, este método utiliza luz ultravioleta para formar as partes o material acrílico plástico, podendo utilizar diversos tipos de materiais.

- Impressão 3D a jato de tinta (IJP) utiliza o método camada por camada para formar a peça final, utilizando diferentes fluídos como soluções poliméricas, sendo os mesmos depositados para se atingir o formato final.

- Manufatura de objetos laminados (LOM) utiliza lâminas do material, para fabricar modelos 3D que serão cortados a laser e utilizados adesivos para combinar as camadas produzidas.

- Fusão por feixe de elétrons (EBM) onde um feixe de elétrons é utilizado para produzir a peça camada por camada, utilizando o metal base em pó para se obter a exata geometria do modelo CAD. Sendo feito sobre vácuo o material cru é armazenado e fundido por um feixe de elétrons.

- Impressão multi-jet (MJP) é o processo pelo qual a base metálica ou cerâmica em pó recebe um spray de líquido que irá ligar o material para criar uma fina camada sendo necessário sinterizar o material no forno para aumentar a resistência do mesmo.

Um dos processos mais utilizados para deposição de metais é a deposição a arco que, de acordo com Fronius (2022), é a fusão de um arame, que torna o processo mais rápido que os de leito de pó, utilizando de métodos de soldagem já existentes, possibilitando manufaturar uma gama ampla de metais, com deposições de até 4 kg por hora. Esse processo é utilizado na fabricação de ventiladores industriais, indústria aeronáutica, naval e na indústria automotiva.

De acordo com TWI (2022), a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) se baseia na deposição de material utilizando como fonte de calor, o arco elétrico com a possibilidade de produzir peças próximas da geometria final sem a utilização de moldes, ferramentas complexas (visto que utiliza de fontes e ferramentas usuais para métodos de soldagem) e matrizes, além de ser um processo automatizado. Essas características auxiliam para uma redução no custo e tempo de produção, inclusive com a possibilidade de peças sob demanda.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Com a chegada da tecnologia da manufatura aditiva na indústria, com sua ampla gama de utilizações, o interesse por esse processo e seu funcionamento vem aumentando, dada a possibilidade de substituir ou auxiliar o processo de manufatura utilizado atualmente (Duvoisin, 2018). Por ser uma tecnologia recente, faz-se necessário uma integração maior entre as pesquisas em universidades e a indústria, com a finalidade de se superar as dificuldades em relação a MA, como problemas em padronização, heterogeneidade do material, além da necessidade de ser um processo vantajoso economicamente e seguro (Butt, 2020). Portanto a motivação desse trabalho é contribuir com os estudos que vêm sendo realizados na área no meio acadêmico, além de fornecer parâmetros e dados obtidos para futuras pesquisas e para indústrias que procuram implementar o método em sua produção.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do interesse na manufatura aditiva pela indústria e a escassez de informações que ainda se tem no meio acadêmico, com menos estudo ainda quando relacionado a liga estudada com o método de deposição a arco *Cold Metal Transfer* (CMT), é gerada uma ampla e importante área de estudo, analisando e definindo parâmetros de utilização desse processo, a fim de facilitar e acelerar a implementação desse tipo de produção de peças na indústria e nas universidades.

A liga de aço inoxidável 410NiMo foi escolhida por conta de suas propriedades mecânicas e de revestimento, sendo resistente a corrosão, cavitação, abrasão e desgaste por fricção, utilizada em geral, por conta dessas propriedades, na fabricação de rotores e carcaças de bombas, pás de turbinas hidroelétricas e para revestimento de tubos e válvulas, o que denota como a necessidade e as aplicações dessa liga são amplas.

## 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi obter os parâmetros que permitiram depositar paredes livres de descontinuidades/defeitos externos, que puderam ser analisadas por ensaio visual, para a liga de aço inoxidável 410 NiMo utilizando do CMT convencional. Tendo como objetivos específicos verificar:

- Características geométricas de cada deposição, como altura, largura e qualidade superficial;
- Influência da velocidade de deslocamento da tocha e subida interpasse na geometria da deposição;
- Análise visual da geometria e presença de descontinuidades/defeitos nas deposições de cordões simples e paredes com 5, 15 e 30 camadas;
- Influência da deposição contínua, em blocos (15 + 15 camadas) e com temperatura de interpasse controlada na geometria final da parede de 30 camadas;
- A comparação do aporte energético em deposições utilizando CMT convencional e GMAW convencional;
- A área efetiva, largura e altura total e efetiva, e altura e largura do reforço, assim como ângulo de molhabilidade nos cordões simples;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

De acordo com Machado (1996, p. 2), os tipos mais usados de união de peças são a brasagem, rebites, colagem, pulverização térmica e soldagem. Dentro de soldagem têm-se diversos processos, como a soldagem em fase sólida, a qual é dividida em alguns subprocessos, como forjamento, por pressão a quente ou frio, explosão, entre outros, sendo que cada método desses tem uma utilidade e especificidade. Além disso, a soldagem pode ser dividida de acordo com a fonte de energia utilizada, sendo quatro principais: Energia mecânica, química, elétrica e radiante. A soldagem a arco elétrico como o próprio nome já diz, utiliza energia elétrica para aquecer o material e realizar a soldagem. Na figura 3 é possível verificar alguns dos diferentes processos e subprocessos de soldagem existentes.

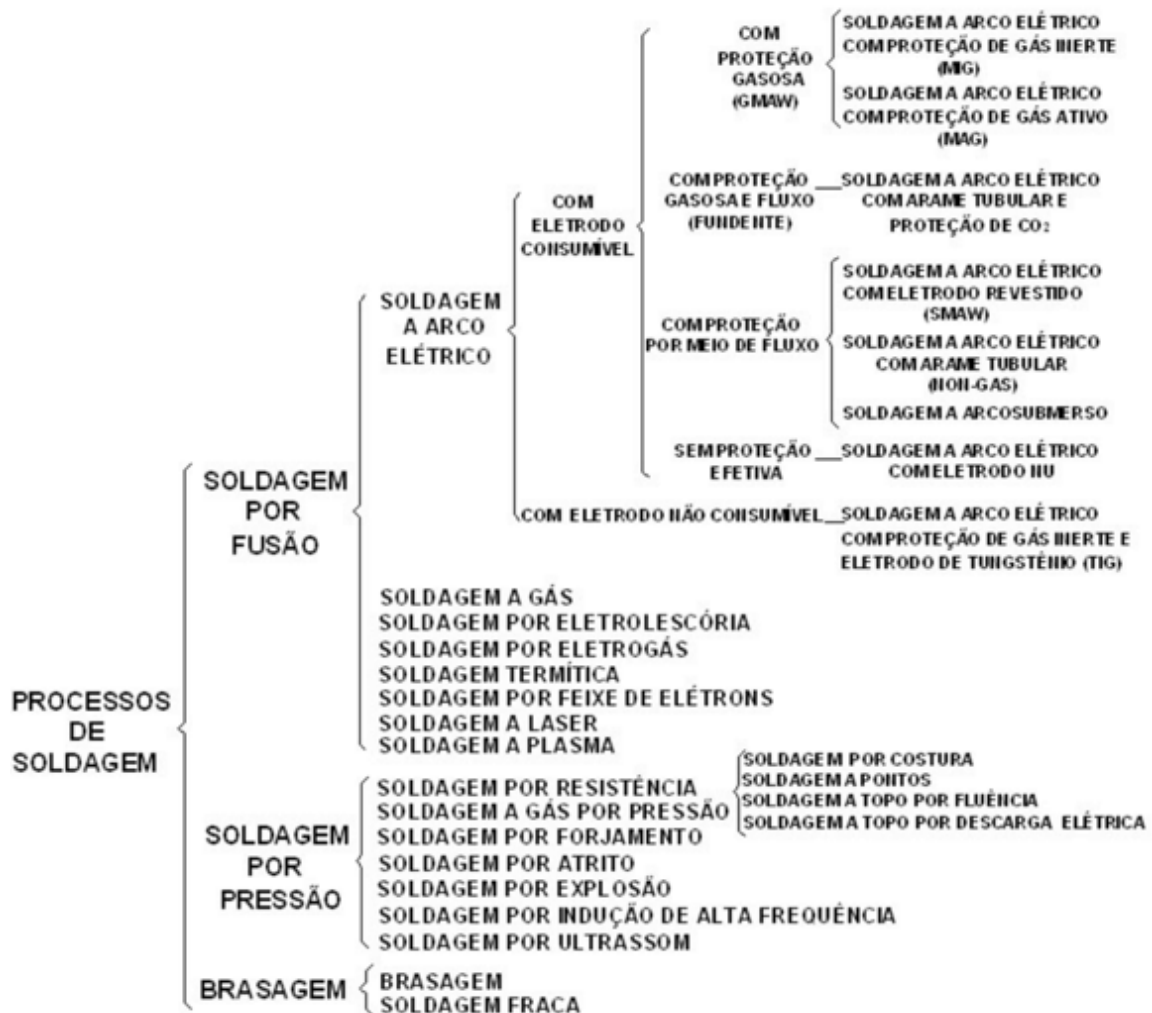


Figura 3- Principais processos de soldagem (NERIS, 2012, p. 6)

A descrição feita por Jenney e O'brien (2007) sobre a deposição a arco é que o termo é aplicado para uma grande variedade de processos de soldagem que utilizam o arco elétrico como fonte de calor. Já para Kah et. al (2014), a soldagem a arco pode ser descrita como um condutor de gás que transforma energia elétrica em calor, sendo também vista como um corpo gasoso com formato cilíndrico confinado pelo gradiente de temperatura.

### 2.1.1 PROCESSOS MIG/MAG

Os processos de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) são processos normalmente semiautomáticos, em que a alimentação de arame-eletrodo é feita de forma mecânica, através de um alimentador, sendo o soldador responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além do controle de movimento da tocha ao longo da junta (Marques et al., 2009, p. 234). Ainda de acordo com esses autores, o processo MIG/MAG funciona com a alimentação contínua do arame-eletrodo, que é coordenado pelo próprio sistema de alimentação. Na Figura 4 é possível observar a ilustração dos componentes que fazem parte do processo MIG/MAG.

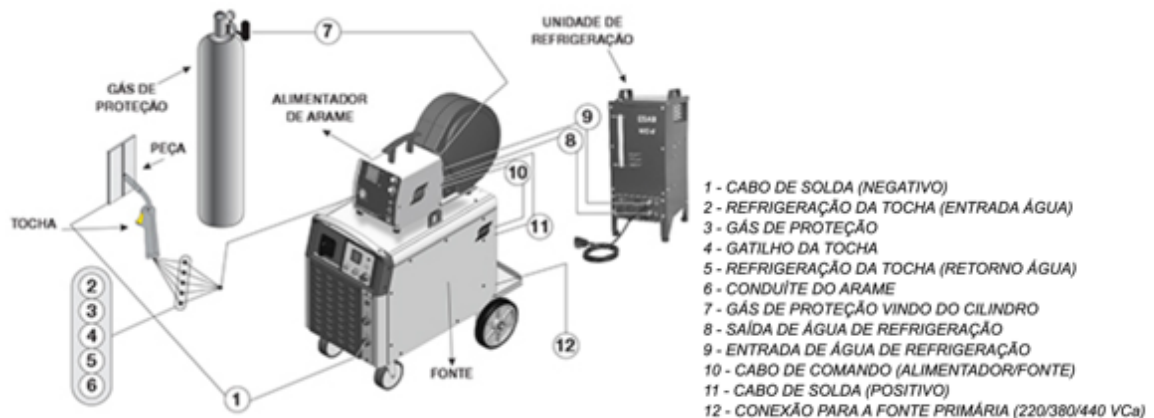


Figura 4- Equipamentos para soldagem MIG/MAG (ESAB, 2022)

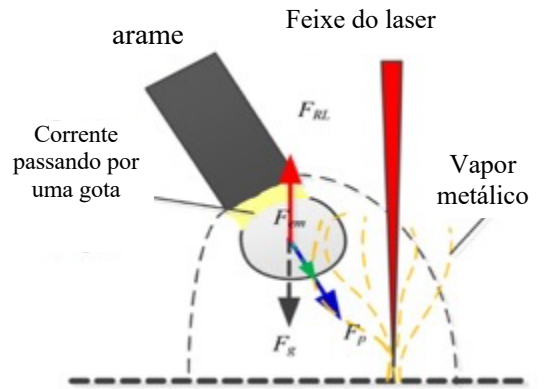
De acordo com a definição de Zhang et. al (2020), nos processos MIG/MAG é estabelecido um arco elétrico entre o arame do eletrodo e do metal base, com a utilização de um gás de proteção externa. O calor gerado pelo arco elétrico funde o arame e parte do metal base, formando o cordão de solda. Esses gases de proteção são utilizados para evitar a contaminação atmosférica da poça de solda, melhorando a qualidade e evitando defeitos na peça. Para Marques et. al (2009, p. 235) algumas vantagens desse tipo de soldagem, são:

- A ampla gama de materiais que podem ser soldados, incluindo aços carbono, aço inoxidável e alumínio;
- A variedade de espessuras em que podem ser aplicados;
- Não necessita de remoção de escória e/ou limpeza;
- Exige menos habilidade do soldador quando comparado com outros processos de soldagem;
- Fácil automação, gerando uma produção de alto fluxo e eficiência.

Como alguns defeitos citados por Marques et al. (2009, p. 235), destacam-se a alta sensibilidade a mudanças no circuito elétrico, o qual é ligado com a qualidade do cordão de solda, assim como o custo do equipamento e da manutenção do mesmo, quando comparado com o eletrodo revestido e uma menor variedade de materiais consumíveis em relação ao eletrodo revestido.

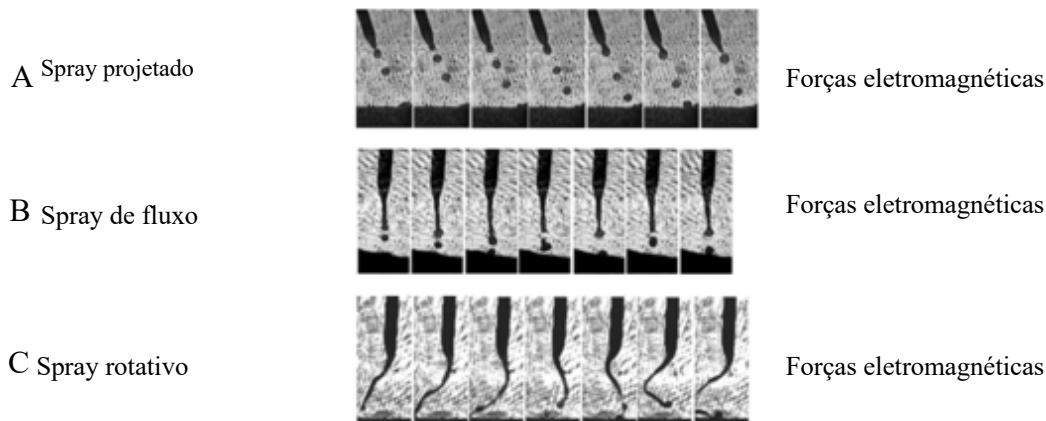
A soldagem MIG/MAG por transferência globular, baseia-se na formação de uma transferência metálica, desde a fundição do arame até o momento em que a força gravitacional seja maior que a tensão superficial, transferindo então a gota para a poça de fusão, sendo eficiente, porém esse processo gera altos níveis de respingos e a possível presença de partículas indesejadas pela falta de continuidade do cordão. Esse tipo de solda pode ser acompanhado por um laser no caminho, a fim de melhorar a soldagem (híbrida), como pode ser visto na Figura 5, essa melhora foi estudada por Shuangyu et. al (2018), que encontraram o valor máximo de 180 A para a transferência globular para os eletrodos utilizados, sendo que após esse valor ocorre o MIG/MAG spray. Além do estudo das forças do laser sobre a transferência metálica, foram analisados parâmetros para a soldagem híbrida, definindo a distância de 3 mm entre o laser e o glóbulo para evitar as forças do vapor metálico no pingo de solda.





**Figura 5-** Ilustração da soldagem por transferência globular híbrida com laser (adaptado de SHUANGYU et.al, 2018)

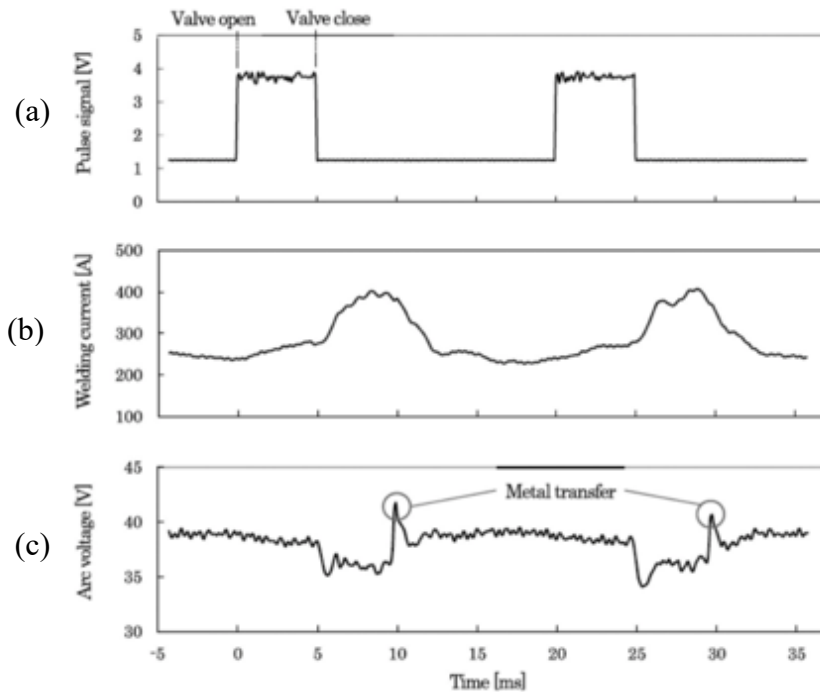
Outro método mais eficiente é o spray, que de acordo com Scotti et. al (2012) é dividido em spray projetado (Figura 6 A), de fluxo (Figura 6 B) e o rotativo (Figura 6 C). O spray projetado e o de fluxo se baseiam na formação de pequenas gotas despejadas no caminho de solda em alta velocidade e ambos necessitam de altos níveis de corrente, ocasionando alto aporte térmico para ocorrer, o que gerará uma elevada força eletromagnética que leva a transferência metálica ocorrer de forma controlada. A diferença entre os dois é que no de fluxo é possível trabalhar em mais posições fora a plana, já no spray projetado não se tem essa possibilidade, por conta do alto volume despejado do arame fundido. Apesar do volume e da técnica de soldagem, esse método gera pouco respingo, com uma qualidade elevada de solda nesse aspecto. Para o spray rotativo é necessária uma corrente e calor mais elevados que os processos anteriores, gerando um fluxo mais alto de arame fundido. Essa maior corrente gera uma força eletromagnética ainda maior, fazendo com que esse fluxo se funda, formando uma espiral.



**Figura 6-** Modos de transferência metálica, spray (adaptado de SCOTTI et. al, 2012)

### 2.1.1.1 PROCESSO MIG/MAG PULSADO

O processo de soldagem MIG/MAG pulsado, como descrito por Fujiwara et. al (2020) consiste em um pulso que envia um sinal, como pode ser verificado na Figura 7 (a) (sinal de pulso), para ser liberada a corrente que irá passar pelo eletrodo, Figura 7 (b) (corrente de soldagem), fazendo a fusão do material de solda, produzindo o arco e transferência metálica, gráfico “tensão do arco” da Figura 7 (c).

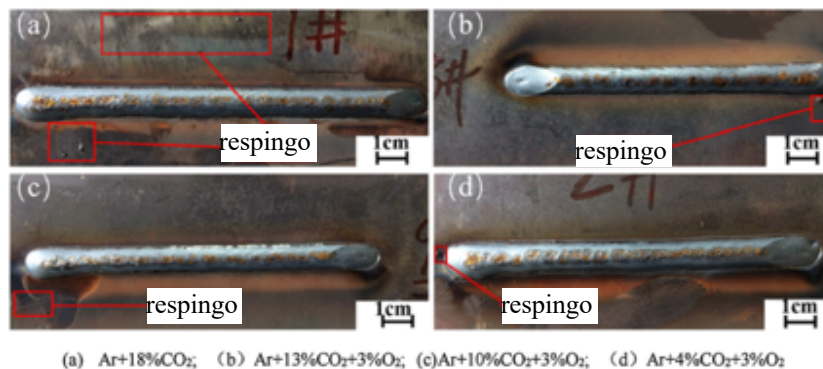


Tradução: Arc voltage: Tensão do arco, Welding current: Corrente de soldagem; Pulse signal: sinal de pulso; valve open (close): Válvula abre (fecha); Metal transfer: transferência metálica

**Figura 7-** Sinal de pulso, corrente e tensão de formato de onda (Adaptado de FUJIWARA et.al, 2020)

Já para Souza et. al (2011) no método do MIG/MAG pulsado a transferência de metal se dá basicamente por tensão superficial, quando a gota toca o metal líquido do caminho de solda, produzindo uma poça de fusão pequena, com rápida solidificação, indicados para soldagem de seções finas ou em posições não planas.

A qualidade da soldagem está ligada diretamente com a redução de discontinuidades/defeitos presentes no cordão de solda, por isso diversos estudos são realizados para se ter a melhor combinação de materiais, gases, formatos e corrente utilizados no processo de soldagem, a depender da aplicação, com o consequente aumento da qualidade da solda. Assim como fez Zhao et.al (2018) que estudaram a utilização de 4 gases diferentes, analisando a microestrutura e morfologia do cordão de solda no método de spray pulsado em aços carbonos. Para isso, utilizou câmeras de alta velocidade para analisar o formato da transferência metálica, além de analisar a quantidade e disposição de respingos no término do processo de soldagem, a fim de diminuir os defeitos causados por esse tipo de problema e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da soldagem. Como pode ser visto na Figura 8, tendo todos, exceto a Figura 6 (b), quase nenhum respingo. Após isso, observou-se a microestrutura do material soldado, com cada tipo de gás utilizado, e obteve-se uma maior quantidade de ferrita, com o aumento do dióxido de carbono na mistura dos gases.



**Figura 8-** Quantidade e tamanho dos respingos de acordo com o gás utilizado (adaptado de ZHAO et.al, 2018)

O método do spray pulsado é o método mais utilizado de soldagem, sendo eficiente para diversas ligas, como de alumínio, aço carbono e aços inoxidáveis, sendo o último estudado por Guilherme (2020), que diferente de Zhao et. al (2018) que estudaram os efeitos em liga de alumínio, estudou as microestruturas obtidas pela soldagem, através do método de spray pulsado, da liga do aço inoxidável 316L. Utilizando uma placa desse material para ser a base e um arame da mesma liga para ser fundido, variaram-se as quantidades de passagem do eletrodo, gerando diferentes alturas e espessura da soldagem. Esse experimento gerou importantes resultados da porcentagem de cada fase presente no cordão de solda final, auxiliando na escolha da quantidade de passagens necessárias para cada aplicação, dependendo da resistência necessária, da dureza ou do ambiente em que será utilizado. Essa forma de variação da corrente em pulsos, deu origem ao processo CMT.

### 2.1.1.2 PROCESSO CMT

O CMT, é uma modificação do processo de soldagem MIG baseado em processos de transferências curto-circuitados, desenvolvido por Fronius da Áustria em 2004. Esse processo difere dos processos MIG/MAG simplesmente pelo método de corte mecânico das gotas, não encontrado previamente (Furukaua, 2006). Já os autores Cornachial et. al (2021) caracterizam o mesmo processo como uma evolução do MIG/MAG a fim de atingir uma maior estabilidade no processo, reprodutibilidade e eficiência-custo.

O ciclo elétrico do método CMT consiste em duas fases para Pickin e Young (2006), autores que estudaram o CMT para ligas de alumínio, a fim de formar o arco, onde um pulso rápido e de alta intensidade é utilizado para fundir o eletrodo e o arame (fase do arco na Figura 9) e a segunda fase baseada no curto-circuito, explicitado na Figura 9 como “S/C phase”, a fim da gota se separar do eletrodo e cair no caminho da solda, para que isso aconteça o eletrodo se retrai, empurrando a gota de solda, repetindo-se para formar o caminho todo.

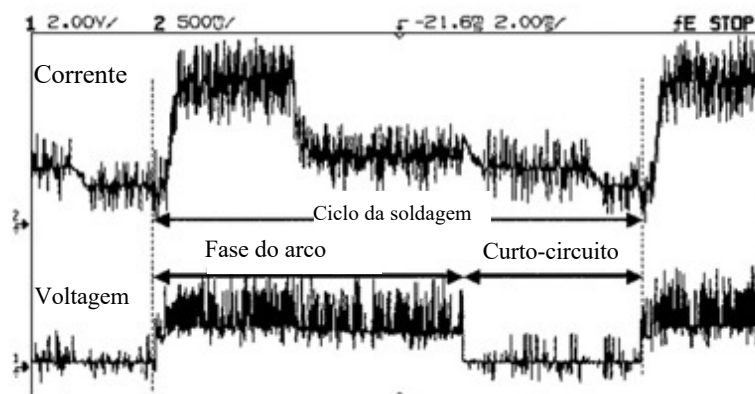
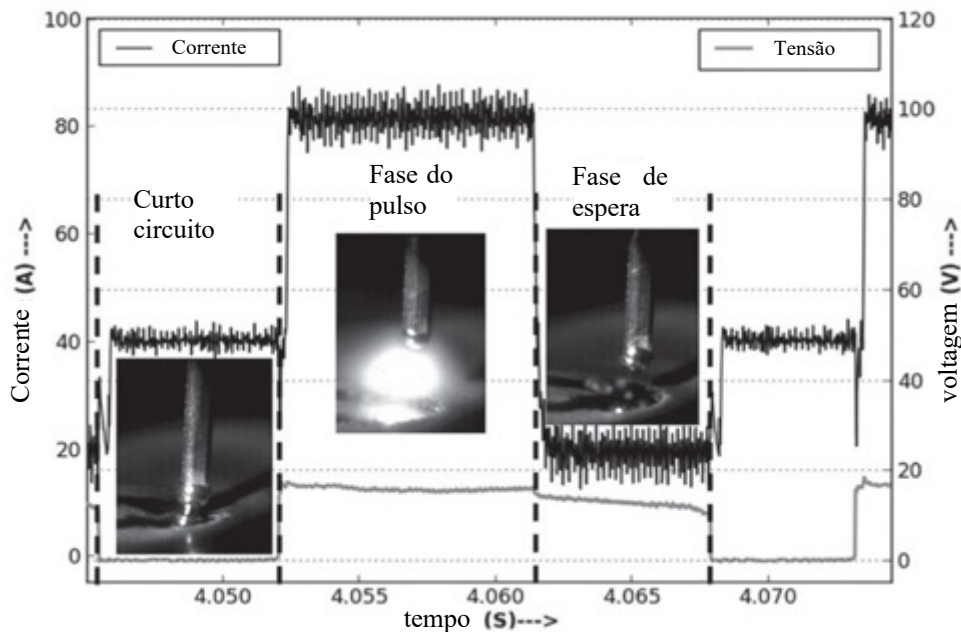


Figura 9- Ciclo elétrico CMT (adaptado de PICKIN e YOUNG, 2006)

Para Oliveira (2021), o processo CMT, apesar de parecido com os processos MIG/MAG, não necessita de um campo magnético para que o arame fundido caia no cordão de solda, gerando menos, ou quase nenhum respingo, além de menor necessidade energética para funcionar. Essa vantagem permite a soldagem de placas mais finas ainda, sem alterar sua microestrutura (Furukaua, 2006). Alguns autores dividem em três ou quatro partes esse mesmo processo, assim como fizeram Mezrag et.al (2018), dividindo em curto circuito, fase do pulso e a fase de espera, para a gota cair e recomeçar o ciclo, processo descrito com a mesma sequência na Figura 10, com imagens de cada fase.



**Figura 10-** Ciclo elétrico CMT com imagens (adaptado de MEZRAG et al., 2018)

## 2.2 SOLDABILIDADE DOS METAIS

Para a *American Welding Society* (AWS), soldabilidade é definida como a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica, projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço.

### 2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Antes de se estudar a soldabilidade dos aços é preciso, primeiramente classificá-los. Para Modenesi (2012) os aços são divididos em:

- Aço carbono, os quais apresentam apenas carbono e elementos derivados da fabricação do mesmo. Nesses aços, de maneira geral, quanto maior o teor de carbono, menor será sua soldabilidade e maior será sua resistência mecânica.
- Aço carbono-manganês são como aços carbono com baixo teor de carbono, porém com manganês em grande parte de sua composição. Esse tipo de aço é utilizado em estruturas soldadas após ser laminado a quente.
- Os aços micro ligados (aços de alta resistência e baixa liga), têm composição similar aos dos aços anteriores, porém com adição de alumínio, vanádio, titânio ou nióbio. A resistência mecânica desses aços é ainda melhor que os já citados anteriormente, devido ao reduzido tamanho de grão e precipitação na sua fabricação.
- Aços liga são divididos em aço baixa liga (até 5% de elemento de liga), aço média liga (entre 5% e 10% de elemento de liga) e aços alta liga (acima de 10% de adição), esse último não é utilizado para soldagem devido às suas propriedades mecânicas.

Para a *American Iron And Steel Institute* (AISI) e a *Society of Automotive Engineers* (SAE), a classificação dos aços é dada de acordo com a Tabela 1 onde o primeiro número corresponde à categoria geral do aço e os outros valores representam a concentração de elementos de liga e carbono.

Designação SAE	Tipos
1xxx	Aço carbono
2xxx	Aço níquel
3xxx	Aço níquel-cromo
4xxx	Aço molibdênio
5xxx	Aço cromo
6xxx	Aço cromo-vanádio
7xxx	Aço tungstênio
8xxx	Aço níquel-cromo-molibdênio
9xxx	Aço silício mangânes

**Tabela 1-** Classificação de ligas de aço (adaptado de SAE/AISI, 2012)

## 2.2.2 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

De acordo com o experimento feito por Sachin et al. (2020), o qual visava soldar uma chapa de alumínio A5086 com uma chapa de aço inoxidável IS2062, foi utilizada a soldagem MIG com parâmetros obtidos de forma experimental. Como resultado dessa junção as duas chapas foram soldadas com dois materiais diferentes de eletrodos, um de alumínio e o outro de aço inoxidável. Como já era esperado pelos autores foi vista a presença de defeitos como porosidade e fusão incompleta, devido a diferença de temperatura de fusão entre os materiais.

Por conta da grande variedade de utilizações do aço inoxidável, Aldaca et al. (2020) verificaram a soldabilidade do aço inoxidável duplex (DSS) em ambientes marinhos corrosivos. Esse estudo teve como objetivo diminuir as perdas de propriedades mecânica localizadas nas áreas de solda, consequência das mudanças de fase decorrentes do calor gerado, para se evitar a corrosão do material soldado. Como resultado para uma melhora na resistência do material, deve-se utilizar a menor quantidade de calor possível na solda, para que se tenha o mínimo de dano aos elementos de proteção e a menor formação de ferrita, a qual enfraquece a solda e a zona termicamente afetada, por conta de ser uma fase com menor resistência mecânica.

A junção de metais com a finalidade de se obter os melhores aspectos de cada material é muito desejada, porém devido as diferenças em suas propriedades, essa soldagem se torna muito difícil. Com isso Shokri et al. (2017) analisaram a soldagem de uma liga de cobre e de aço inoxidável duplex, materiais com propriedades físicas muito diferentes como mostra a Tabela 2.

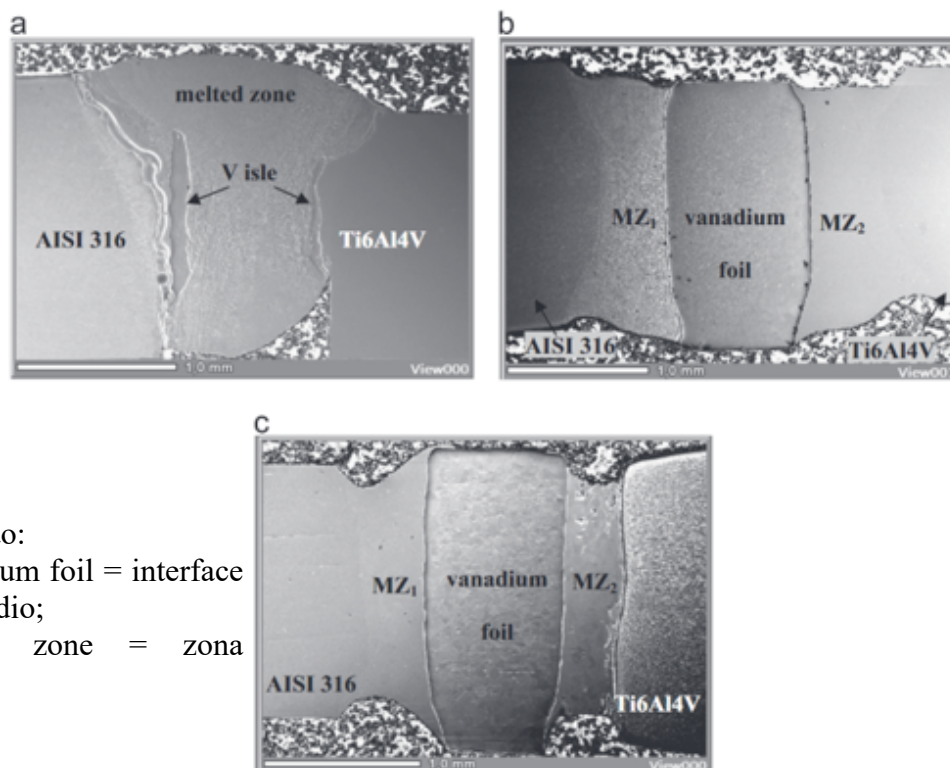
	Ponto de fusão	Condutividade térmica	Coefficiente de expansão linear	Capacidade térmica	UTS
unidade	°K	W/m °K	1/°K	J/Kg °K	MPa
DSS	1723	17	$1.48 \times 10^{-5}$	350	520
Liga-Cu	1290	378	$1.66 \times 10^{-5}$	380	300

**Tabela 2-** Propriedades físicas do cobre e DSS (adaptado de SHOKRI et al., 2017)

Para realizar a soldagem foi utilizado o método da fricção e para se evitar defeitos, foram estabelecidos e estudados os parâmetros que deveriam ser utilizados, como velocidade de avanço e temperatura de trabalho, o qual gera fases muito frágeis quando muito elevado. Após o estudo de cada uma das variáveis (velocidade de rotação, velocidade de avanço e deslocamento da ferramenta), descobriu-se que na fase onde ocorreu a solda, foi obtida uma alta concentração de fase sigma intermetálica, que é extremamente frágil e dura pois sua concentração é dependente do calor embutido nessa fase. Como resultado final, a soldagem com baixo calor presente nessa fase, é uma solda defeituosa, com pouca mistura das fases, no entanto, se for aplicado muito calor a solda se torna mecanicamente fragilizada, por conta da fase sigma já citada.

Devido à crescente utilização dos aços inoxidáveis, novas funções estão sendo exploradas, como a utilização de chapas finas desse aço para membrana de bombas de combustível, chapas bipolares e que distribuem gases reativos. Por conta de todas as vantagens mecânicas do material, unir várias membranas finas é de extrema utilidade, portanto Pakmanesh et al. (2018) realizaram o estudo de solda através de laser dessas chapas, visto que em sua maior parte são juntas apenas com adesivos, que se desgastam rapidamente, sendo a solda a laser mais eficaz econômica e mecanicamente. O problema da solda em chapas muito finas é o risco do calor ser muito baixo e não realizar a solda ou o calor ser muito elevado e acabar atravessando o material. Variando os parâmetros do laser (potência, duração do pulso, velocidade da soldagem, foco da lente, etc.) encontrou-se uma condição ótima de funcionamento. Com a potência do laser se mostrando o parâmetro mais significativo na qualidade das peças, sendo responsável por 64% dos defeitos, seguido pela duração e frequência do pulso.

Assim como o cobre, a soldagem entre titânio e aço inoxidável gera diversas vantagens mecânicas utilizadas na indústria aeronáutica, química e nuclear, portanto é de grande interesse a junção desses materiais. Para isso Tomashchuk et al. (2015) investigaram a soldagem dos dois materiais utilizando uma interface de vanádio puro entre os dois, porém esse material é instável a gases como hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, sendo, portanto, necessário a utilização de um gás de proteção inerte. Nesse caso foi utilizado argônio para se reduzir os possíveis defeitos causados por essa instabilidade. Foram feitos testes com um passe de solda (a), duas passagens (b) e dois pontos de solda (c), explicitados na Figura 11. Como conclusão o melhor método para se soldar a liga de titânio com aço inoxidável utilizando vanádio como interface, foi com duas passagens de solda, tendo a menor quantidade de defeitos e a melhor resistência mecânica.



Tradução:

- Vanadium foil = interface de vanádio;
- Melted zone = zona fundida.

**Figura 11-** Cortes transversais: soldagem feita com uma passagem (a), duas passagens (b) e dois pontos de solda (c). (TOMASHCHUK et al., 2015).

Outro tipo de soldagem é o TIG, também utilizada com aços inoxidáveis, que por suas propriedades são parte vital da indústria farmacêutica e alimentícia, além de gás e petróleo, na soldagem de tubulações. Para melhorar esse método de soldagem, foi criado o método A-TIG, que utiliza uma fina camada de fluxo, melhorando a penetração, além de diminuir o consumo de energia. Por isso, Dramicanin et al. (2019), utilizaram um fluxo baseado em nano partículas de dióxido de Titânio

analisando seu efeito na soldagem TIG de placas de paredes grossas feitas de aço inoxidável, obtendo uma penetração 100% maior nos exemplares com o fluxo, quando comparado com as peças sem o fluxo ativo, além de alcançar 94% da resistência a tração do metal base.

A área de desenvolvimento de novos aços inoxidáveis também gera interesse para indústria e uma das principais é a automotiva, por isso a General Motors desenvolveu um estudo que resultou na criação dos aços avançados de alta resistência nos anos 70. Recentemente um grupo chamado Outukumpu, produziu um aço inoxidável austenítico sem níquel H1000, com a possibilidade de ser utilizado para reduzir o peso da estrutura dos automóveis. Esse novo material abriu caminho para se estudar sua soldabilidade, por isso Feng et al. (2019) analisaram a resistência da solda desse material. Foi encontrado que é necessário uma corrente elétrica maior e um tempo mais prolongado para produzir a mesma solda em um aço inoxidável de menor dureza, outro aspecto causado pela alta resistência elétrica e baixa condutividade térmica do material foi a formação de trincas a frio e vazios durante a solidificação do cordão de solda. Outra propriedade alterada foi a diminuição da resistência mecânica em 20% quando comparado com o metal base, causado pela formação de grãos colunares mais grossos, além de se perder o tratamento térmico feito anteriormente.

Silva (2017) em seu estudo sobre o efeito da temperatura de revenimento na microestrutura de metais de solda utilizando o aço 410NiMo, como arame tubular com fluxo não metálico, verificou que o aumento da temperatura de revenimento elevou a concentração de martensita revestida, do material adicionado. Esse efeito foi intensificado quando o tempo de tratamento foi aumentando, apresentando uma microestrutura típica de martensita revenida com tratamento por 8 horas a 600°C. Foi visto que a concentração de austenita retida nas mesmas condições, foi de 5% do volume, quando realizado o tratamento de revenimento duplo, a concentração aumentou para 17%.

Realizando uma comparação entre o reparo por soldagem dos aços inoxidáveis AISI 410 e o CA-6NM, Pereira et al. (2001) verificaram que o aço 410 respondeu bem ao revenido ocasionado pelos passes posteriores, apresentando uma redução de dureza de até 150 HV, esse resultado possibilita a utilização da dupla-camada de solda, que geram valores de tenacidade próximos do previsto para o metal de base. Para isso foi realizado o teste de Hignuchi com 3 níveis de energia e método MIG pulsado, com eletrodo de aço 410NiMo, soldando juntas em meio-V, anguladas em 45°.

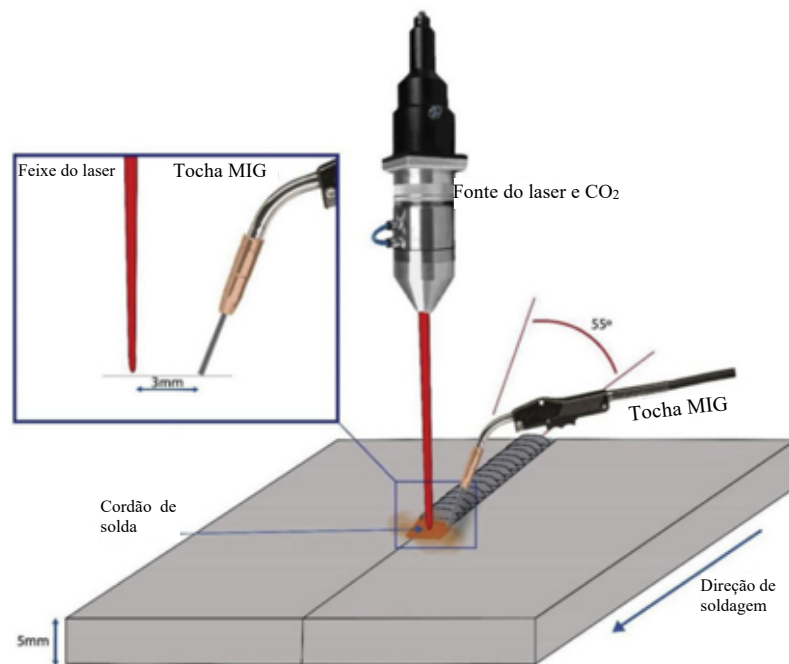
Para se analisar os parâmetros de soldagem e suas propriedades mecânicas, no concerto de turbinas nas plantas nucleares de energia, Divya et al. (2011) realizaram a caracterização das propriedades mecânicas, juntamente com a análise da influência da temperatura e tempo, no tratamento térmico pós soldagem de arames da liga 410 NiMo. Foi utilizado o método GMAW, com arames de 0,8 mm de diâmetro, com a base sendo pré-aquecida a 250°C, monitorando a temperatura da poça de fusão. O tratamento térmico em dois estágios foi dividido em uma etapa a 600°C por 2 horas, resfriado a temperatura ambiente, seguido de aquecimento a 650°C por 4 horas e resfriado a temperatura ambiente. Com isso foi visto que o reparo, seguido do tratamento térmico, gerou um conserto da turbina com boa qualidade, tendo suficiente limite de escoamento, ductilidade e dureza, sem apresentar anisotropias. A boa dureza é correlacionada com a presença de finas austenitas retidas no metal soldado.

### 2.2.3 DIFERENÇA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Uma das ligas de aço inoxidável, muito utilizada para produtos culinários, devido a suas propriedades mecânicas e econômicas favoráveis a esse tipo de mercado, é a liga 200. Por isso Chuaiphan e Srijaroenpramong (2020) definiram os melhores parâmetros de soldagem TIG entre a liga 205 e 216, encontrando a melhor velocidade de avanço da ferramenta de solda, que no caso estudado foi de 3.5 mm/s, o nível de 6 vol.% de hidrogênio na mistura do gás de proteção podendo-se aumentar a velocidade de soldagem para 5.2 mm/s, visto que o gás aumenta o calor na zona de transferência metálica. Esse aumento de velocidade é vantajoso, pois de acordo com os testes de resistência mecânica do material, quanto menos tempo de soldagem era necessária, maior era sua resistência, já que não tinha tempo suficiente para formar uma área rica em crômio, que enfraquece a solda.

Outra liga dos aços inoxidáveis é a liga 400, que é majoritariamente martensítica, o que melhora sua usinabilidade, no entanto é pior para soldagem quando comparada com os aços austeníticos, suas características são vantajosas para indústrias como a aeroespacial e automotiva. Com o objetivo de estudar sua soldabilidade, Ramkumar et al. (2019) realizaram experimentos de soldagem com a liga

AISI 416, utilizando a soldagem híbrida com laser e MIG e para o preenchimento da transferência metálica, o eletrodo de ERNiCrMo-4, utilizando o esquema na Figura 12.



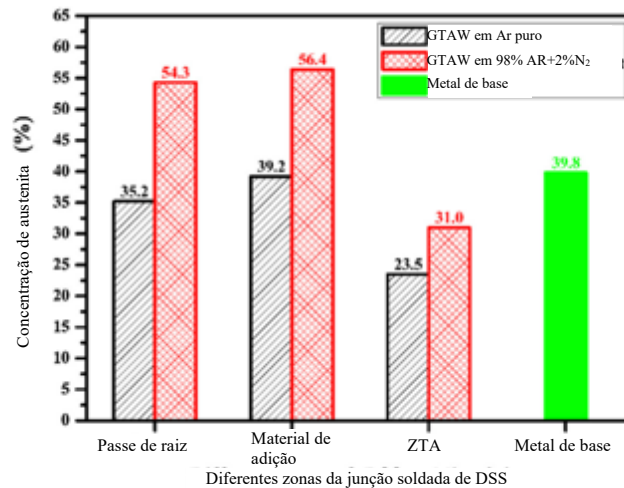
**Figura 12-** Representação esquemática mostrando a soldagem híbrida laser-arco (adaptado de RAMKUMAR et al., 2019)

Como resultado foi primeiramente estabelecido que é possível soldar de forma confiável a liga 416 usando a técnica híbrida, com o laser sendo o guia e a soldagem MIG acompanhando-o, além de que a resistência mecânica da área soldada aumentou, devido a formação de martensita enriquecida de carbono, tendo sido também formada uma área predominantemente austenítica na região da solda.

Uma das ligas de aço inoxidável que vem crescendo no mercado é a duplex, utilizando a soldagem TIG principalmente, porém esse método acaba causando muitas mudanças microestruturais que alteram as propriedades do aço, como por exemplo a formação de fase austenítica, visto na Figura 13. Essa fase aumenta a dureza do material, o que foi comprovado pelo teste de dureza Vickers nas diferentes áreas do cordão de solda.

Zhang et al. (2017) estudaram a adição de nitrogênio no gás de proteção, utilizando diversos tipos de microscópios (óptico, eletrônico, de potencial de circuito aberto) para análise microestrutural, os testes resultaram na facilitação da formação de austenita primária, quando utilizado o  $N_2$ . Esse mesmo elemento foi responsável por aumentar a dureza, de forma significativa do metal no cordão de solda, outra vantagem obtida da adição de  $N_2$  ao gás de proteção foi a melhoria da resistência a corrosão nas zonas afetadas termicamente e formadas pela soldagem.





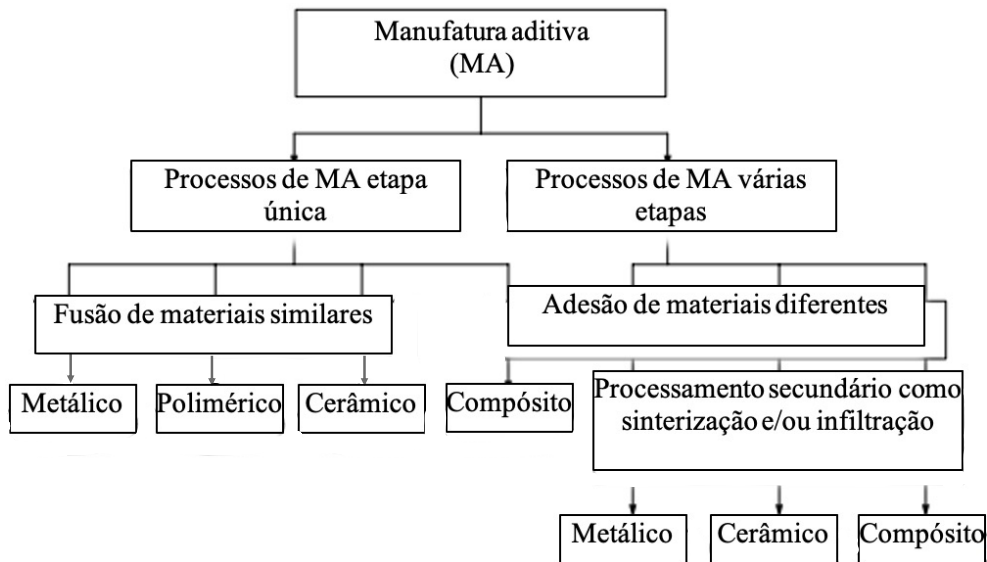
**Figura 13-** Efeitos dos gases de proteção em diferentes zonas das junções da soldagem (adaptado de ZHANG et al., 2017)

### 2.3 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva é a obtenção de peças e objetos através da impressão tridimensional sendo empregada em setores diversos, como descrito por Lopes et al. (2018). Já para Abdulhameed et al. (2018) a manufatura aditiva pode ser caracterizada pela mistura de materiais, seja por fusão, ligação ou solidificando resinas, sendo muito precisas, porém com um tempo de produção elevado, ainda mais se utilizado os planos de orientação errados no projeto. De acordo com a definição da norma ISO/ASTM 52900 (ISO, 2015) a manufatura aditiva é o conceito geral para tecnologias que, baseadas em representações geométricas, criam objetos a partir de sucessivas adições de material.

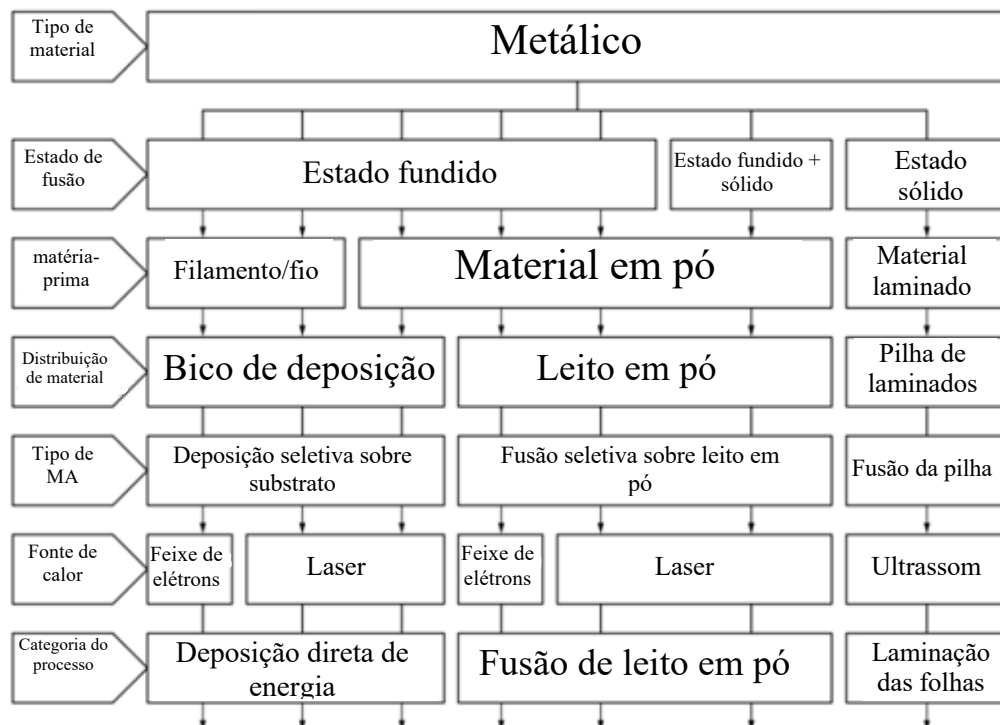
Quando comparado com outros métodos de manufaturas de peças, como feito por Tofail (2017) a MA se difere dos métodos de manufatura por subtração ou formação, pois ela produz as peças por um processo camada por camada, sem ter um molde ou ter que retirar material de uma peça para chegar no produto final. A norma ISO/ASTM 52900 (ISO, 2015) explica cada um desses métodos de manufatura, o processo por subtração obtém o *design* final através da retirada de material em pontos específicos até se alcançar o objeto final. Já o método de formação consiste na aplicação de pressão a um corpo de material “cru” para se obter a forma desejada, como por exemplo, a injeção em molde, entre outros.

Ainda de acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO, 2015) a manufatura aditiva pode ser dividida em processos de várias etapas e de etapa única, apesar de geralmente serem necessários mais de um tipo de processo. Pode-se dividir em processos únicos de fusão de metais similares em: Fusão de materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos e de materiais diferentes que serão os compósitos. Essa adesão é parte do processo de várias etapas da MA, tendo uma etapa a mais que a manufatura de etapa única, sendo elas o processamento secundário como a sinterização ou infiltração, podendo gerar materiais metálicos, cerâmicos e/ou compósitos. Esse esquema é representado na Figura 14



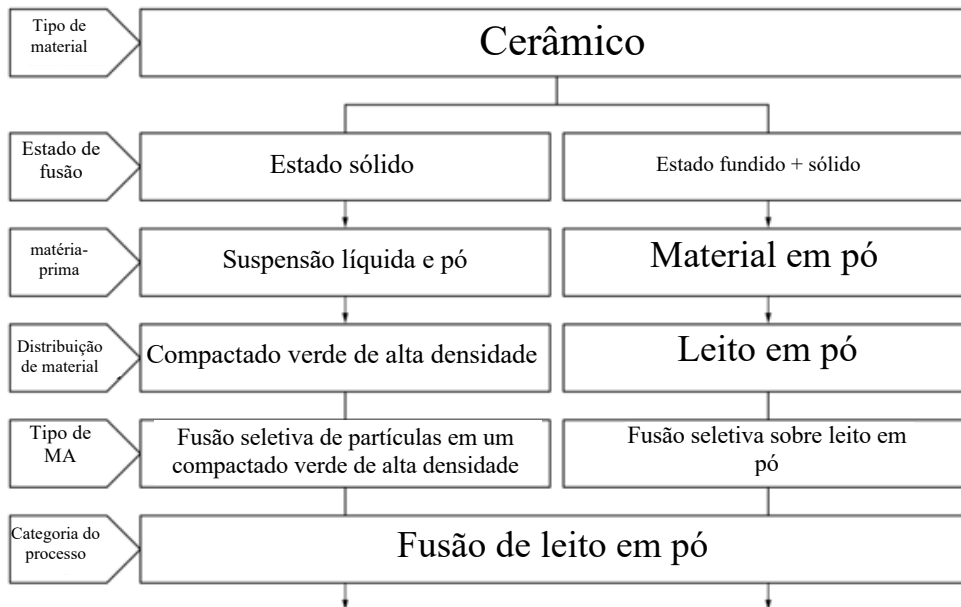
**Figura 14-** Princípios dos processos de MA de etapa única e multi etapas (adaptado de ISO, 2015)

Além disso, a norma ainda separa o diagrama de processos de etapa única e de várias etapas. Nas de etapa única, o diagrama é separado para cada tipo de material, já na de várias etapas por serem obtidos através de diversos processos, têm-se apenas um diagrama, como pode ser visto na Figura 15, onde é definido o processo de materiais metálicos.



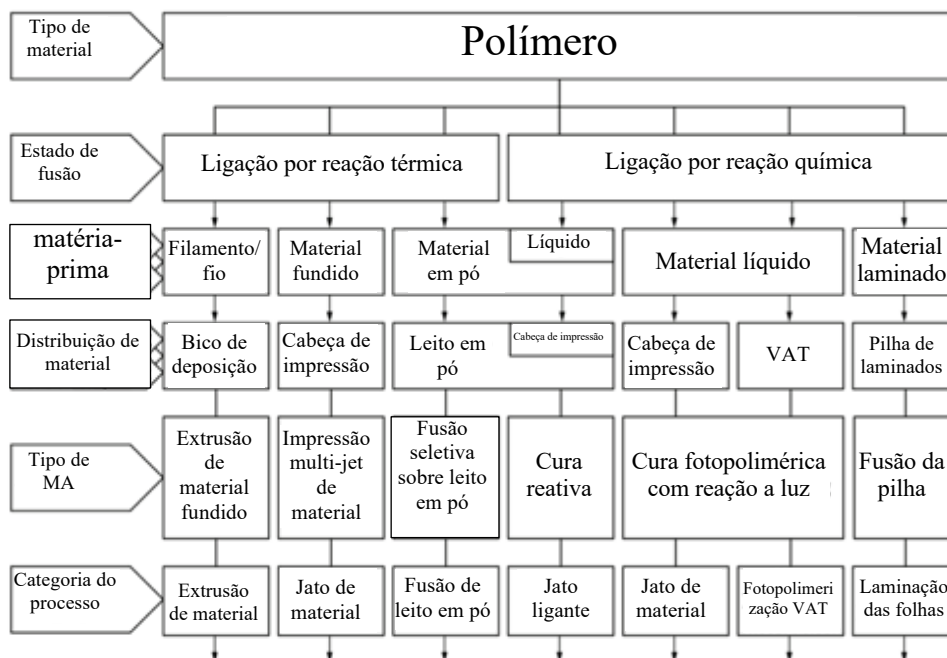
**Figura 15-** Princípios dos processos de MA de etapa única para metais (adaptado de ISO, 2015)

Já na Figura 16 têm-se as mesmas informações, porém para materiais cerâmicos.



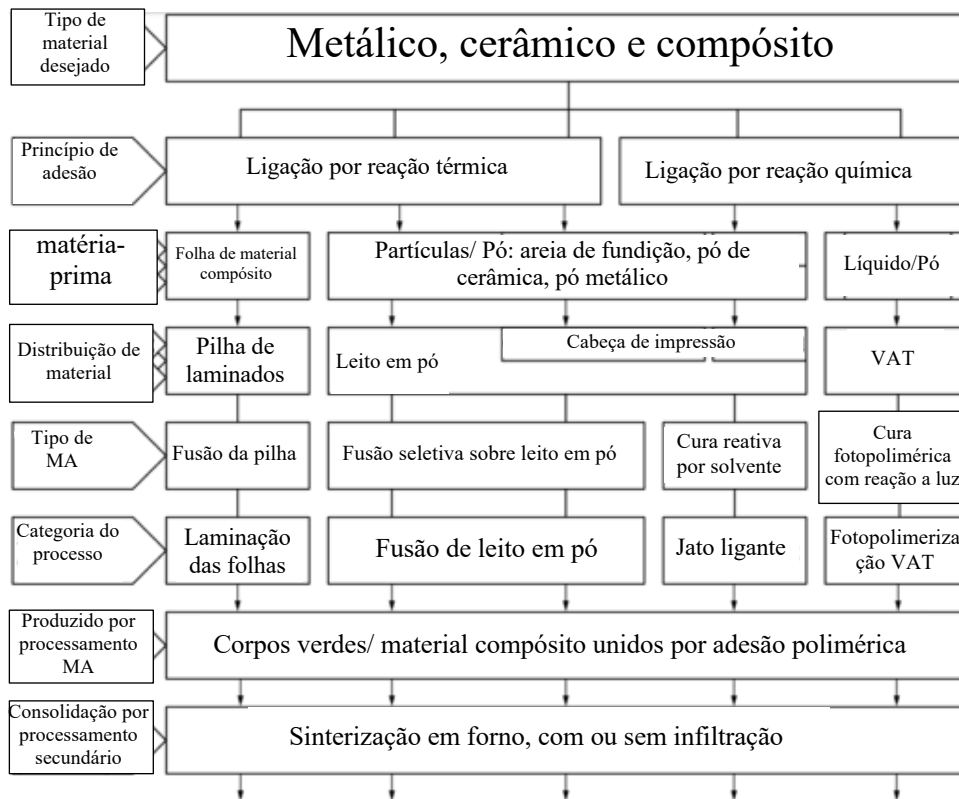
**Figura 16-** Visão geral dos princípios do processamento de etapa única para cerâmicas (adaptado de ISO, 2015)

Seguindo a mesma dinâmica, foi feito o diagrama para materiais poliméricos, visto na Figura 17.



**Figura 17-** Visão geral dos princípios do processamento de etapa única para polímeros (ISO, 2015)

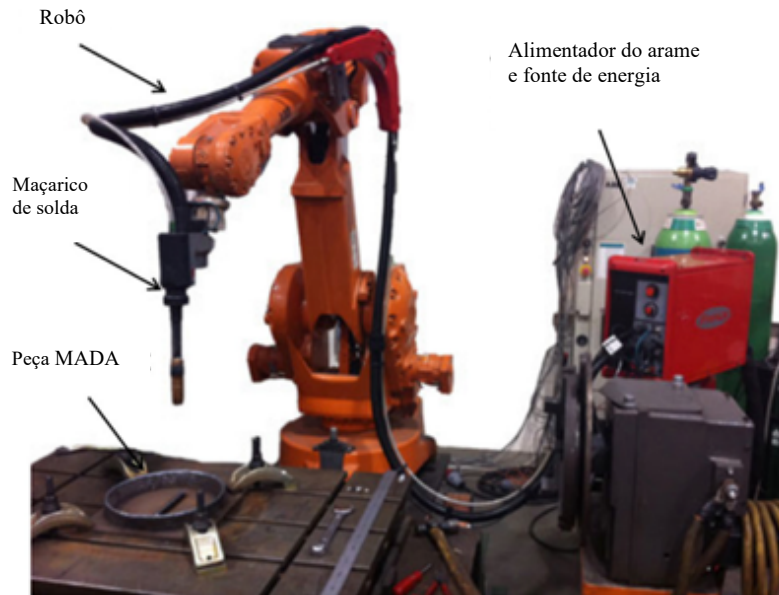
Como pode ser feita uma junção desses materiais, também foi desenvolvido o diagrama para matérias, metálicos, cerâmicos e compósitos, e suas respectivas características, mostrado na Figura 18.



**Figura 18-** Visão geral dos princípios do processamento multi-etapas para metais, cerâmicas e compósitos (adaptado de ISO, 2015)

### 2.3.1 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

Outro método utilizado na MA é a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) que de acordo com Silva (2020), utiliza métodos convencionais de soldagem como TIG, plasma, MIG/MAG, entre outros, para fundir os materiais e montar a peça final. A MADA utiliza desses processos para diversos tipos de materiais e diâmetros de arame. Esses métodos de manufatura se destacam em relação ao que utiliza laser, pela maior produtividade e menor custo de produção (SILVA, 2020). Um exemplo da montagem desse tipo de manufatura aditiva pode ser visto na Figura 19.

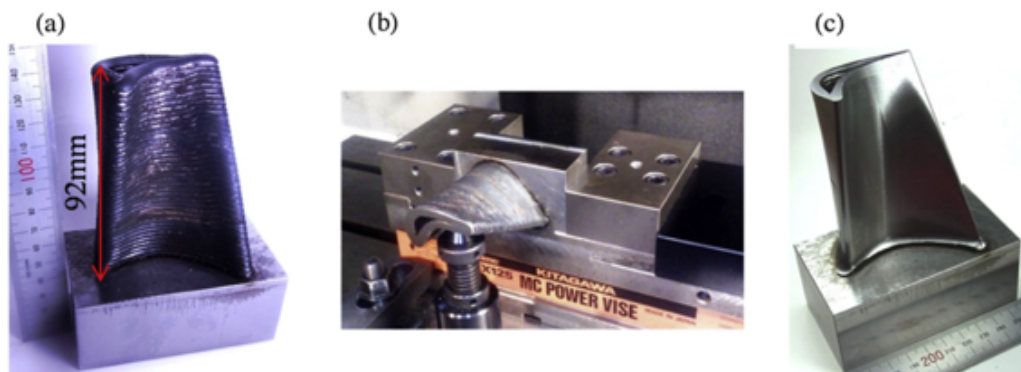


**Figura 19-** Sistema de MADA robotizado (adaptado de DING et al., 2015)

O processo de MADA tem algumas vantagens quando comparado com a MA com laser em leito de pó, como o significativo menor custo das máquinas e facilidade de configuração, a variedade de metais que podem ser fundidos, devido a utilização dos processos MIG/MAG e também sua eficiência energética que varia de 75%-90% dependendo do metal soldado e do gás de proteção utilizado. Já com a utilização da sinterização a laser, a eficiência é de 30% a 50% (NAGAMATSU, 2020).

Para Jiang et al. (2021) as vantagens do MADA são o baixo custo de equipamentos e a produção em alta escala, já quando se trata da MA a laser, suas vantagens são a precisão e produção de peças complexas e de tamanho reduzido, por sua vez, a utilização do feixe de elétrons é mais indicado para peças com alta pureza e fácil oxidação, visto que é necessário vácuo para acontecer o processo.

Uma das dificuldades do processo MADA é o controle de qualidade da peça fabricada, pois é necessário entender as propriedades metalúrgicas e o desempenho de construção de cada material utilizado, sendo preciso mais que apenas o *design* em CAD. Visto isso, Nagamatsu et al. (2020) demonstraram a melhora na forma final da hélice de uma turbina oca, quando foi utilizado a MADA juntamente com a usinagem, resultando em uma peça final com diferença de apenas 0,32 mm de espessura, depois de usinada, quando comparado com a peça original. Esse processo pode ser visto na Figura 20. Para isso foi utilizado uma peça triangular a fim de se estabelecer os parâmetros de quantidade de fotos necessárias para montar o *design* em CAD, a quantidade de material a ser retirado no processo de usinagem e a espessura da parede da peça.



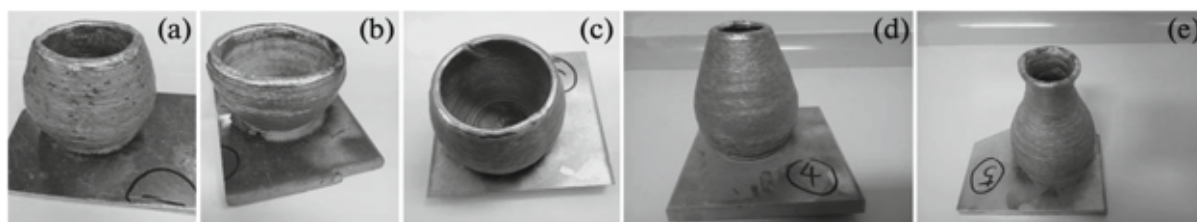
**Figura 20-** (a) Pá de turbina fabricada, (b) montagem em máquina de usinagem, (c) peça final, após usinagem (NAGAMATSU et al., 2020)

Como já citado anteriormente, um dos métodos de soldagem é o MIG acompanhado do laser, sendo também utilizado na manufatura aditiva; e estudado por Zhang et al. (2018), para manufatura de finas

camadas de liga de alumínio. Um dos desafios desse tipo de MA é a estabilidade do arco MIG, fazendo com que a gota do metal fundido escorra e não seja depositada no local certo. Esse defeito piora a cada camada feita, visto que o calor é acumulado da camada anterior para a próxima. Para se evitar essa ocorrência, uma das possibilidades é utilizar o arco pulsado híbrido de laser-MIG com potência baixa. Nesse estudo foi utilizado a liga ER5356 de alumínio de 1,2 mm de diâmetro como material a ser depositado no substrato de alumínio 6061, como gás de proteção foi utilizado argônio (95%) e CO<sub>2</sub> (5%), com uma vazão de 20L/min, bem como analisado a diferença que a potência do laser produzia nas camadas e peça final. Variando, e comparando, de 0 W a 600 W de potência, com aumento de 200 W a cada teste, foram obtidos melhores resultados de qualidade superficial quanto maior a potência do laser, como consequência do aquecimento do laser que acompanha o arco elétrico, que aumenta a fusão do arame. Por esse mesmo motivo, quando o laser estava em 600 W o material depositado foi colapsando para fora da área desejada, portanto, o valor da potência do laser deve ficar entre 200 e 400 W. Outro ponto analisado foi a largura da parede obtida, que também obteve uma menor espessura, propriedade desejada, com 400 W. Por último a maior altura foi obtida, da mesma forma, com o valor de 400 W de potência, denotando que o melhor valor de potência está entre 200 e 400 W para esse tipo de liga e parâmetros analisados.

Como outra forma de MADA pode-se citar a utilização de plasma para que ocorra a transferência metálica. Como analisado por Ríos et al. (2019), que utilizaram diferentes modos de transferência para se obter os melhores parâmetros quando utilizado uma liga de titânio. A utilização do plasma permite uma transferência metálica mais estável quando comparado a utilização apenas de TIG para formar a deposição. Com isso foi encontrado que a tensão do arco é diminuída no momento que o arame entra em contato com o metal fundido. Esse tempo de contato pode ser variado desde sem contato até um contato contínuo. Quando se utilizou um alto fluxo de gases e plasma, a área onde ocorreu a transferência metálica foi muito profunda, podendo gerar condições não favoráveis a qualidade da solda, assim como o arrasto aerodinâmico sofrido pela gota de solda que gerou respingos, reduzindo o tamanho do arame fundido, aumentando a frequência de contato entre as partes, diminuindo a estabilidade do processo.

Um dos processos que gera uma peça final com melhor acabamento superficial é a MADA CMT, utilizando uma menor quantidade de calor para realizar a deposição, diminuindo ou quase extinguindo o defeito de gotas não desejadas (porosidade), arco elétrico estável, alta taxa de deposição e alta precisão na deposição, quando comparado com outros métodos de deposição. Por isso Chen et al. (2018) utilizaram de um *software* para definir os parâmetros de entrada no processo de MA e os movimentos feitos pelo braço robótico, empregando arames de alumínio ER4043, analisando o processo de deposição com o auxílio de uma câmera de alta velocidade e adquirindo detalhes como o formato e tempo da transferência metálica. Foram depositados alguns tipos de estruturas como pode ser visto na Figura 21.

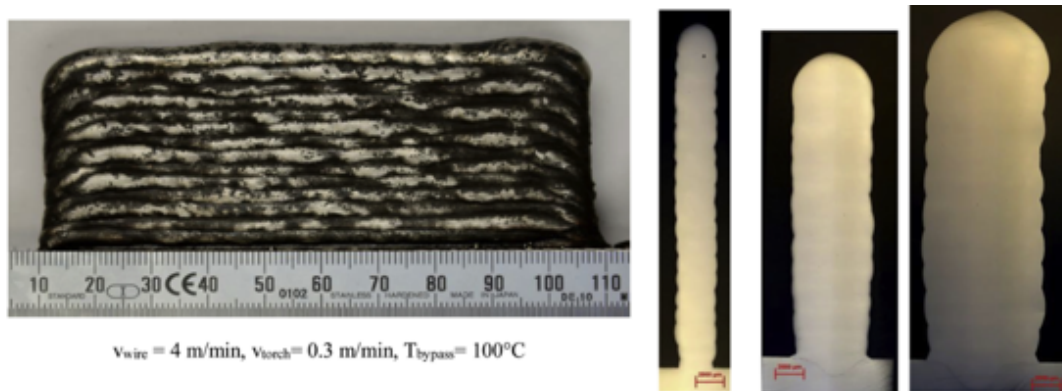


**Figura 21-** Diferentes formatos de exemplares depositados (CHEN et al., 2018)

Como conclusão, os parâmetros de alimentação do arame, comprimento do arco e modo de deposição foram determinantes na média e variância da espessura de cada peça, de modo que o aumento de velocidade na transferência metálica causa instabilidade na geometria e que o comprimento do arco apresentou pouca interferência nessa estabilidade. A geometria da peça também é responsável pela variação na média e variância da espessura, sendo que quanto maior a curvatura, maior a variância, além de afetar de forma negativa a estabilidade do processo.

Para se ter manufatura de peças utilizadas em trabalhos a quente, por MADA, de forma economicamente favorável, é preciso se entender os efeitos dos parâmetros utilizados na sua produção. Por isso, Ali et al. (2019) utilizaram do processo CMT, variando as velocidades de alimentação do arame e a velocidade de avanço da tocha, mantendo constante a vazão de gás (Ar + 18%CO<sub>2</sub>) em 15 l/min, a distância do bico da tocha a peça em 12 mm. Realizando testes de dureza Vickers, análise da microestrutura e análise geométrica das paredes depositadas. Concluíram que é possível a peça final não ter trincas, as larguras podendo variar de 2,7-9,4mm, sendo possível manter um valor constante dessa

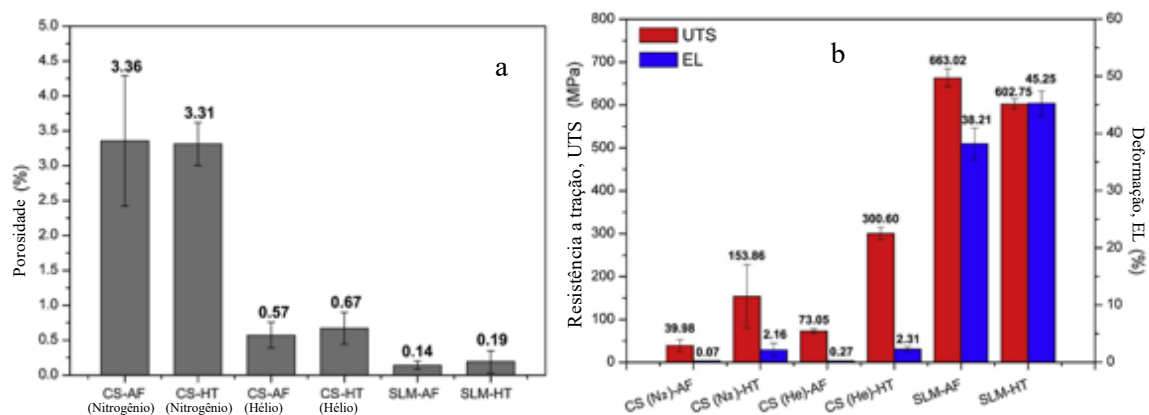
dimensão na geometria final do material depositado. As propriedades mecânicas e microestruturais se mostraram dependentes da quantidade de energia utilizada e do campo de temperaturas obtidos. As paredes depositadas tiveram as características geométricas vistas na Figura 22.



**Figura 22-** Superfície das camadas depositadas (a) e estrutura das paredes em corte transversal (ALI et al., 2019)

### 2.3.2 MANUFATURA ADITIVA DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Um dos métodos de manufatura aditiva utilizado para aços inoxidáveis é a sinterização seletiva a laser (SLS), utilizando uma matriz em pó metálica e o laser para sinterizar esse material e formar a peça. Esse processo é efetivo para produtos com menos detalhes de *design* e alta resolução espacial, proporcionando baixo desperdício dos materiais de produção. Outro processo, já analisado no tópico de soldagem, é o spray frio, que consiste na utilização de gás comprimido em alta temperatura, usado para acelerar partículas de metal em escala microscópica, que impactam o substrato, consolidando o mesmo abaixo da temperatura de fundição do metal, oferecendo vantagens em relação a fusão e resolidificação do material. Entre essas vantagens podem ser explicitadas: não ter mudança de fase, não passar por distorção por causa da temperatura, além de ter uma maior facilidade de restaurar peças defeituosas, porém esse processo apresenta uma menor precisão na peça final. Combinando os dois processos, SLM e spray frio, Yin et al. (2019) analisaram as diferenças e vantagens de cada processo, e melhoras obtidas unindo os dois processos. Com isso foi visto que a parte submetida ao laser tem uma menor porosidade e, conseqüente, maior resistência à tração, como pode ser visto na Figura 23, que relaciona o valor da resistência a tração com a porosidade obtida no processo de MA SLS.



**Figura 23-** a) Porosidade do material como fabricado (AF) e após tratamento térmico (HT), com o método de spray frio (CS) e SLS. b) resistência a tração e alongamento das mesmas peças (adaptado de YIN et al., 2019).

Quando analisado a estrutura dos grãos, a parte obtida com o spray tem a mesma granulometria que o material puro, já com o SLS, os grãos foram afinados e o espaço Inter granular é menor também. O método do spray frio obteve uma microdureza maior que a obtida por laser, visto que ocasionou uma

deformação plástica e endurecimento forçado na hora da deposição, tendo essa microdureza reduzida quando se fez o tratamento térmico, onde ocorre a recristalização e crescimento dos grãos.

O tratamento térmico também pode ser utilizado para melhorar as propriedades mecânicas dos produtos obtidos por todos os métodos de MA. Com isso Chen et al. (2019) analisaram os efeitos do tratamento térmico por 1 hora em diferentes temperaturas, de um exemplar de aço inoxidável 316L obtido através da manufatura aditiva por sinterização a laser. Foram utilizadas diversas temperaturas até 800°C com resfriamento rápido após 1 hora de tratamento. Para essa liga, foi observado que sua resistência mecânica alcançou o seu máximo com o tratamento térmico a 400°C, aumentando 56 MPa na sua resistência quando comparado com a situação da peça sem passar por tratamento térmico, entretanto, quando a temperatura estava em 800°C a resistência ficou menor que sem tratamento. Essas diferenças se dão ao formato dos contornos de grão obtidos em cada tratamento, além da precipitação de silicato, que foi o principal responsável por esse aumento na resistência.

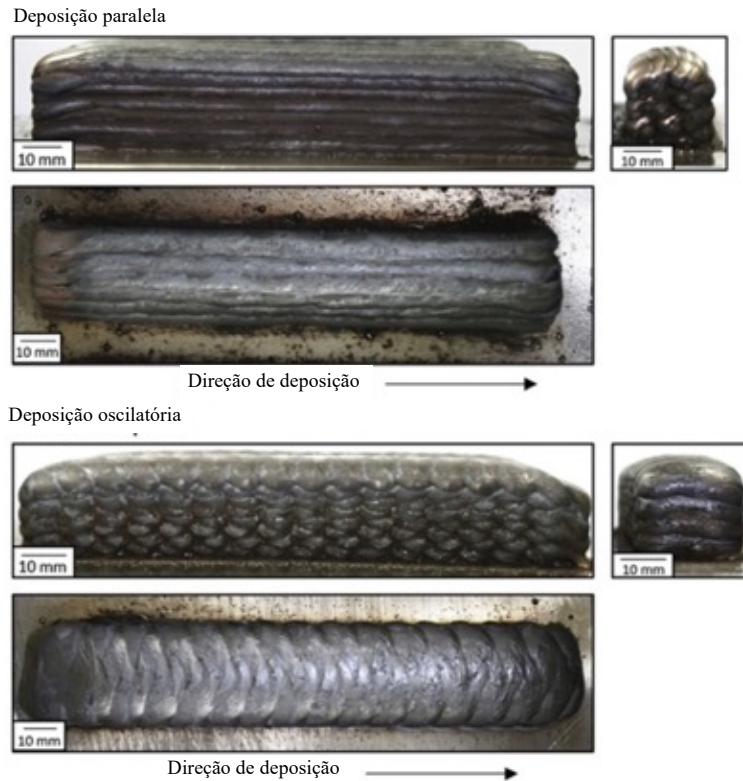
A MADA altera a microestrutura final da peça a depender da temperatura utilizada, tempo entre uma camada e a seguinte, entre os materiais escolhidos, entre outros. Por isso, Caballero et al. (2019) estudaram os efeitos de diferentes condições de processamento na MADA e tratamentos térmicos após, seu uso no aço inoxidável 17-4 PH, em sua microestrutura, dureza e resistência à tração. Para isso foi utilizado o método CMT, com a deposição com uma passagem, múltiplas passagens paralelas e passagem oscilatória, podendo-se observar o produto final na Figura 24.

Para a análise do efeito do gás de proteção utilizado, foram analisados dois tipos de gás, o primeiro contendo 38% He e 2% CO<sub>2</sub> em argônio e o segundo composto de 2,5% CO<sub>2</sub>, também em argônio. Além disso, para o processo de tratamento térmico, cada peça foi submetida a quatro tipos de tratamento, primeiramente sem tratamento algum, utilizando uma solução padrão a 1040°C por 30 minutos, o envelhecimento H900, que é a 480°C por 1 hora e o que utilizou dos dois últimos tratamentos. Feitos os processos em todas as amostras, foram retiradas partes deles para análise de microestrutura e ensaio de dureza e tração. Como conclusão foi visto que o aço assim que depositado tem uma microestrutura dendrítica martensítica- $\delta$  ferrita, com pouca austenita retida, essa estrutura dendrítica apresenta heterogeneidades e micro segregação entre as regiões dendrítica e interdendríticas. Essa segregação foi mínima após o tratamento com solução, gerando uma microestrutura quase inteiramente martensítica. Foi visto também que a austenita é criticamente dependente da taxa de resfriamento e, conseqüentemente, da taxa de calor na deposição. Os parâmetros de deposição adotados, foram irrelevantes para o produto final, após o tratamento de solução e envelhecimento, o que melhorou a ductilidade e a resistência a tração de todas amostras. O estudo também comprovou que apenas o envelhecimento na peça, gerou uma diminuição da ductilidade, de quase 50% quando comparado com a peça sem tratamento algum (CABALLERO et al., 2019).

Um dos desafios da manufatura aditiva por deposição a arco de aço inoxidável é o tempo de fabricação, por conta da temperatura entre camadas, que necessita de certo tempo para diminuir essa energia, e conseqüentemente, alterar a microestrutura e propriedades do material final. Para isso, foi estudado por Knezović et al. (2020) a influência da temperatura entre as camadas depositadas e suas respectivas porosidade, dureza, composição química e a rugosidade superficial. Para obter esses dados foram utilizados arames de aço inoxidável duplex e utilizado os mesmos parâmetros de soldagem para os três exemplares feitos, variando apenas a temperatura entre as camadas de 50, 100 e 150°C, não sendo um valor exato, pois enquanto uma parte estava a 50°C outra podia estar a 48-52°C. Após serem feitos os processos de usinagem e acabamento superficial, foram testados alguns pontos da parede manufaturada para os objetivos já citados.

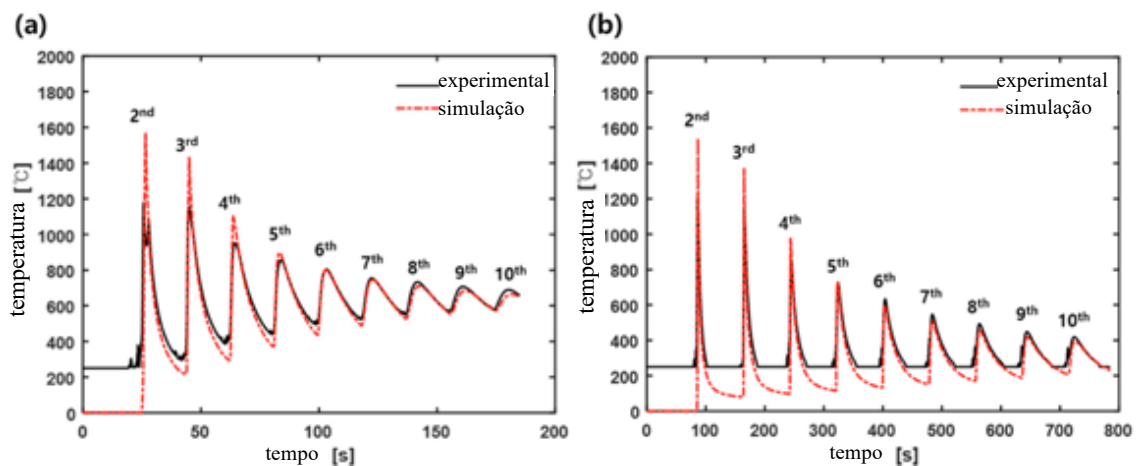
Com isso o resultado foi que os parâmetros utilizados foram suficientes para uma peça final bem acabada e com boas propriedades mecânicas, porém não foi possível evitar a porosidade. Mesmo sendo essa diminuída com os processos de acabamento superficial, internamente ainda apresentavam esses defeitos. A diferença de temperatura entre camadas não alterou a rugosidade superficial de forma alguma entre os exemplares, já a quantidade de ferrita na composição foi maior na menor temperatura utilizada e por não ter tido uma diferença significativa na dureza obtida, é aconselhável utilizar a maior temperatura na manufatura, pois será um menor tempo de produção, sendo duas vezes menor em relação a menor temperatura, com 5% menos ferrita, que a maior temperatura.





**Figura 24-** Dimensões da deposição em paralelo e deposição oscilatória (adaptado de CABALLERO et al., 2019)

A utilização do método MADA-CMT para aços inoxidáveis é de grande interesse visto que causa menos defeitos, como poros, gerando uma peça com maior qualidade, quando comparado com outros tipos de deposição, já em relação a custos, o CMT tem equipamentos mais baratos em comparação aos que utilizam laser ou feixe de elétrons, pois utiliza materiais de soldagem convencionais. Investigando os efeitos da acumulação de calor em depósitos multicamadas utilizando o método, Lee (2020) empregou o aço 316L, verificando o comportamento do arco CMT, sendo utilizados esses dados para a realização de modelagem numérica, a fim de obter os valores de temperaturas estimados em cada camada. Após essas análises, também foi verificada a microestrutura da camada depositada. Quando comparado os resultados da simulação e do experimento, o erro foi baixo, podendo ser utilizado para futuros estudos e ser utilizado com outras ligas e métodos de MA, essa comparação pode ser vista na Figura 25.



**Figura 25-** Comparação dos resultados obtidos por simulação e de forma experimental, a) pontos de 0 a 1s e b) até 60s (adaptado de LEE, 2020).

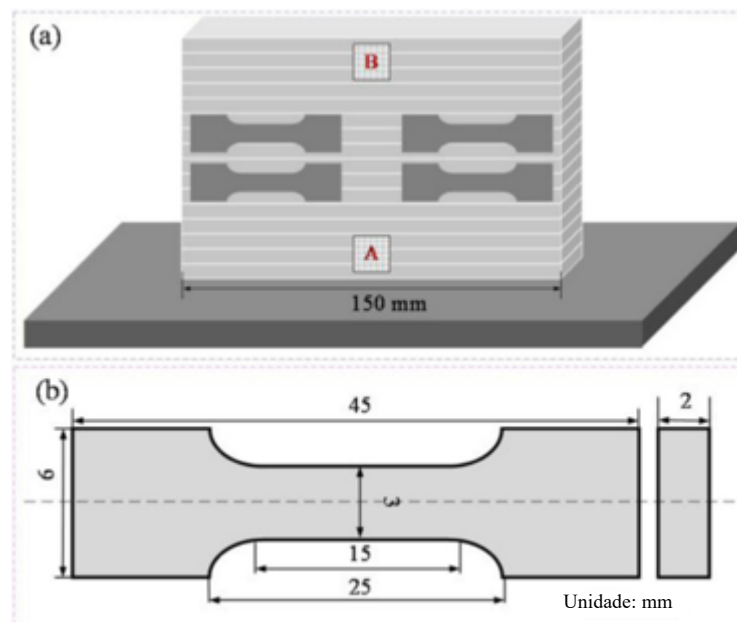
## 2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

Uma das formas utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis produzidos por MADA é o resfriamento da peça da forma mais rápida e eficiente possível. Para isso Cunningham et al. (2021) utilizaram do resfriamento criogênico acompanhando o caminho de solda, do aço 316L, que nesse caso foi utilizado o método de arco pulsado. Foi monitorado a temperatura de cada camada conforme as mesmas iam sendo depositadas e após isso foram testadas as resistências à tração de forma transversal e horizontal, além de serem analisados a microestrutura da parede obtida.

Como resultado, os grãos da amostra resfriada foram mais finos, equiaxiais e com texturas e tamanhos similares ao processo a laser, não a arco. Além disso a resistência à tração teve um aumento de 288 MPa para 314 MPa, juntamente com o valor do módulo de Young que sofreu um aumento de 126% por conta da diminuição da textura dos grãos na direção de deposição.

Wang et al. (2019) utilizaram o mesmo método de MADA para várias amostras, porém com diferentes modos de arco (“*speedarc*” e “*speedpulse*”) e mesmas taxas de deposição. Após a manufatura de todas as amostras, feitas de uma placa de aço 316L transformadas em arames de 1,2 mm, foi feita a análise da microestrutura, retirando partes do centro do componente para se estudar a área transversal da amostra, também foram retiradas amostras para análise das propriedades mecânicas do material obtido, utilizando as áreas e tamanhos especificados na Figura 26, mesmo método utilizado por Cunningham et al. (2021).

Com isso foi estudado que os métodos de *SpeedPulse* e *SpeedArc*, são mais efetivos que o método tradicional, visto que tem um tempo de produção menor, relativa estabilidade e estruturalmente eficiente, sendo uma opção eficiente para a MA em larga escala. Além desses benefícios, a resistência à tração foi de 540 MPa, mais alta que o esperado, com relação aos estudos analisados, com uma falha dúctil na área de fratura no teste de resistência. Quando se compara os dois métodos, o *SpeedArc* tem uma menor taxa de calor e maior taxa de resfriamento, tendo como consequência uma estrutura mais fina na camada superior e inferior da deposição.



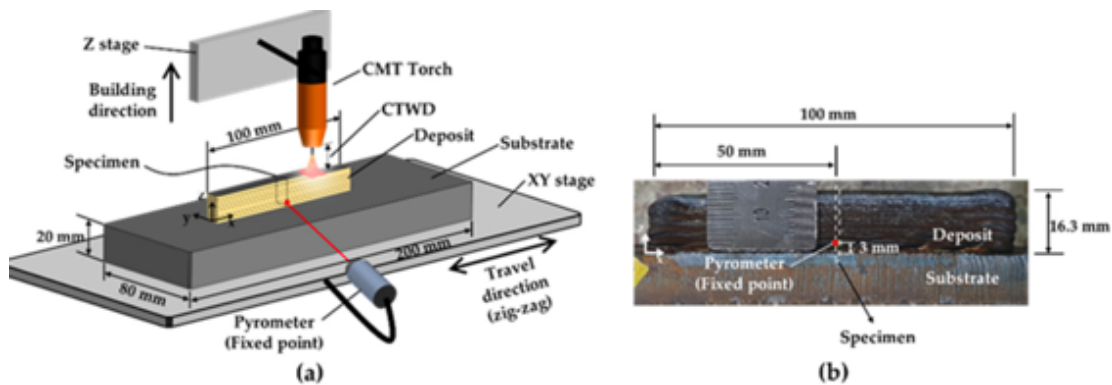
**Figura 26-** (a) Locais de retirada de amostra. (b) dimensão da amostra para teste de tração (adaptado de WANG et al., 2019).

Devido à complexa geometria necessária para a produção de partes dos reatores nucleares, a MA vem sendo cada vez mais estudada e utilizada, visto a possibilidade de criação de partes complexas e perto da usina, não sendo necessário o transporte e outros gastos complementares. Com isso Kannan et al. (2021) estudaram a utilização de aço 316L para revestimento de componentes da indústria nuclear, mesmo componentes a serem produzidos com essa camada, como também para reparo de componentes já utilizados. As camadas de revestimentos foram aplicadas em direções alternadas para evitar defeitos como pontos de início, crateras finais e corcovas iniciais. Após a deposição do revestimento, foi feito

um polimento para uma melhor qualidade de acabamento e obter uma espessura constante. Já os testes de resistência mecânica, também retiraram partes das camadas para se realizar o teste.

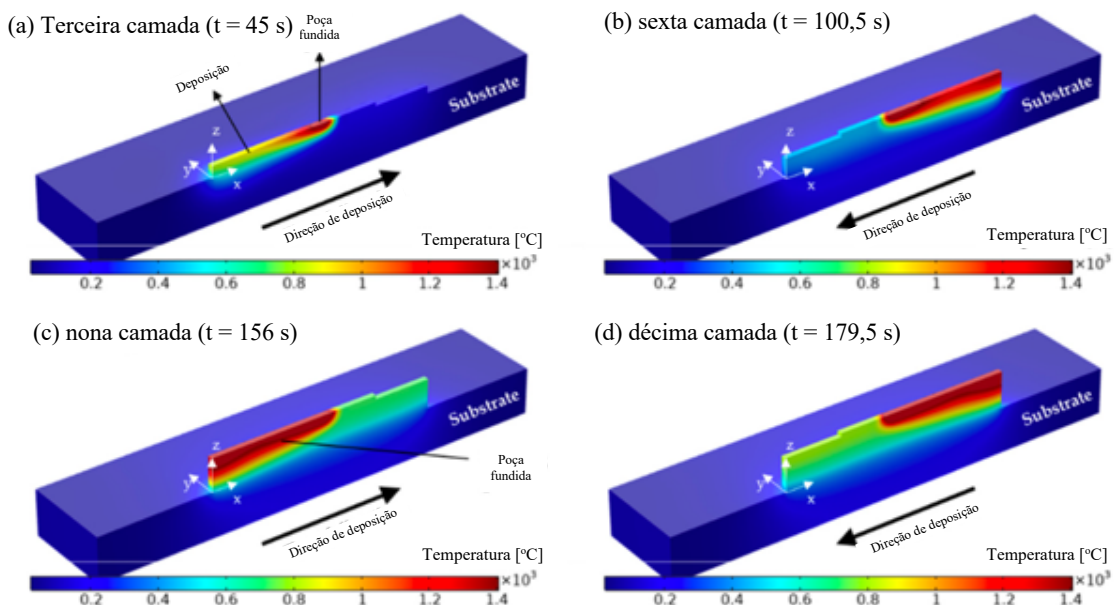
Como resultado foram obtidas microestruturas compostas de dendritas austeníticas e ferrita reticulada, sem haver defeitos aparentes. A MADA para revestimento utilizando o aço 316L se mostrou com uma forte ligação entre as camadas de revestimento, tendo um aumento de 11-14% na resistência a tração do material, porém com uma redução de 17% no alongamento do material quando comparado com o substrato do mesmo aço. A dureza também sofreu um aumento de 159 HV para 225 HV nas regiões de revestimento e para 198HV nas interfaces.

A qualidade da MADA está diretamente ligada a velocidade de resfriamento e quantidade de calor envolvido no processo. Para isso, Park e Lee (2021) analisaram o resultado da mudança dos parâmetros de gradiente de temperatura (G) e a taxa de crescimento (R) para cada camada depositada. Para isso foi utilizada a MADA-CMT, a fim de se encontrar as melhores condições de solidificação para obter a microestrutura desejada. O material estudado foi novamente o aço 316L, devido a suas propriedades mecânicas que favorecem a sua utilização em diversas áreas industriais, como a naval, a aeronáutica e a de petróleo. Foi utilizado um pirômetro em um ponto fixo, como na montagem da Figura 27, simulações de dissipação de calor, como na Figura 28 e também foi avaliada a microestrutura interna e comparado os resultados obtidos experimentalmente e de forma prática.



Legenda: Building Direction = Direção de construção; Specimen = Amostra; Torch= Tocha; Deposit = Material depositado; Substrate = substrato; Stage = Fase; Travel Direction = Direção de deslocamento da tocha; Pyrometer (Fixed point) = Pirômetro (ponto fixo).

**Figura 27-** (a) Diagrama da montagem experimental e (b) formato da deposição (adaptado de PARK e LEE, 2021).



**Figura 28-** Distribuição de temperatura de diversas camadas depositadas, (a) terceira camada, (b) sexta camada, (c) nona camada, (d) décima camada (adaptado de PARK e LEE, 2021).

Como resultado verificou-se que a comparação entre a simulação e a distribuição de temperatura experimental foi quase idêntica com um erro de 4,4%, podendo ser utilizado em produção e estudos futuros. Com a junção do estudo da simulação e da parte experimental, foi possível prever a microestrutura, com o valor de G variando de 68 até 690 °C/s e o valor de R entre 2 e 33 °C/s. além disso foi visto que a morfologia não variou entre as camadas, apenas no topo da décima camada. Por fim o estudo mostrou que é possível obter uma previsão satisfatória com o modelo de simulação, sem a necessidade de depositar material.

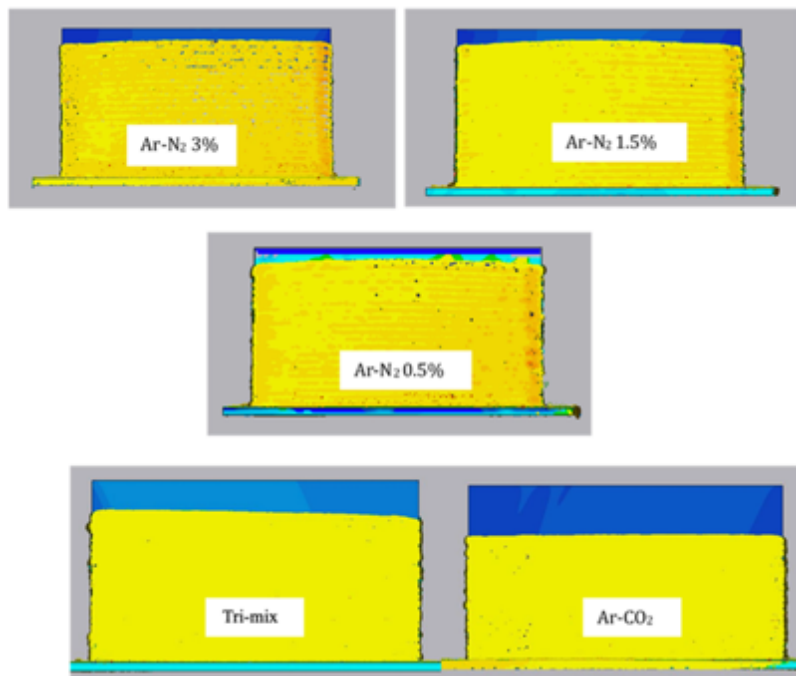
Utilizando a FCWA-MA, Zhang et al. (2021), compararam a microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável duplex com a obtenção por MADA convencional. Para isso foram feitas duas ligas de arame para o FCWA e comparado com o aço E2209, de uso comercial, ambos utilizando o CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

Obteve-se um material depositado com uma concentração de austenita mais elevada que o método comum, chegando a 74% de média, dentro da microestrutura também foram obtidas inclusões de Si-Mn-Ti-O com estrutura complexa e Si-C-O, que atuou como uma nucleação de covas nos testes de tensão e fratura de impacto. Também foram obtidos dois novos componentes que compõe o arame da solda, com Cr em uma maior concentração e Ni com uma diminuição na concentração.

Assim como estudado por Park e Lee (2021), a taxa de resfriamento e a energia necessária para se realizar a MADA se mostram cruciais nesse processo, por isso Long et al. (2021) analisaram os efeitos dos mesmos na MADA CMT. Utilizou-se o aço 316L para as pesquisas, com a energia utilizada de 219 e 590 J/mm, utilizando, assim como já estudado, amostras de diversas áreas do material, tanto transversal como longitudinal, para se aferir todas as propriedades mecânicas com as diversas taxas de resfriamento variando de camada para camada.

Com isso foram obtidos resultados tanto para a microestrutura, quanto para as resistências à tração e por fim em relação a defeitos encontrados nas peças. A microestrutura foi predominantemente formada por ferrita  $\delta$  e dendritas austenítica, também tendo a formação de fases sigma em lenta taxa de resfriamento. Já a resistência à tração das amostras apresentou um valor mais alto, com baixa energia de entrada juntamente com o resfriamento mais rápido, variando de 533 a 573 MPa de acordo com essa taxa. Já com o aumento da energia, as resistências diminuíram, variando de 553 a 521 MPa, contudo o alongamento da peça aumentou nessas condições. E em relação a defeitos, quanto maior a energia de entrada, mais covas profundas foram vistas, tendo seu tamanho diminuído quanto maior a taxa de resfriamento, levando a uma fratura dúctil induzida por vazios.

Roy et al. (2021) analisaram as diferenças nas propriedades mecânicas e microestruturais com a utilização de diversos gases de proteção, na manufatura aditiva do aço inoxidável 410 via larga escala. Foi selecionado o método de deposição GMAW e alguns blends de gases, todos com vazão de 18.8 L/min. Para analisar o efeito na altura da deposição, foi feita uma sobreposição do que se era esperado e do resultado obtido (Figura 29), também foram realizados testes de microdureza, tensão de escoamento, formação de porosidade, além da formação de fases e inclusões na peça final.



**Figura 29-** Comparação entre o modelo em CAD e a geometria obtida (ROY et al., 2021).

Como resultado, constatou-se que a mistura de diferentes gases afeta a precisão na dimensão da peça obtida, sendo que a mistura de Ar-N<sub>2</sub> apresentou a altura mais próxima da esperada, já a mistura tripla dos gases obteve o melhor acabamento superficial. A amostra com maior dureza e tensão de escoamento, combinado com a menor produção de respingos, foi com a utilização da maior concentração de N (3%), sendo a ausência de ferrita delta um dos fatores para tal melhora. Apesar de amplamente utilizado, a mistura dos 3 gases (He-Ar-CO<sub>2</sub>) apresentou baixa tensão de escoamento e alta geração de respingos, sendo, provavelmente, ocasionada pela maior presença de ferrita delta. A maior porosidade foi obtida nas amostras que utilizaram CO<sub>2</sub>, sendo ocasionado ou pela maior quantidade de oxigênio sendo difusa na poça, ou maior umidade retida no gás, sendo aconselhável o monitoramento da umidade quando utilizado esse gás de proteção.

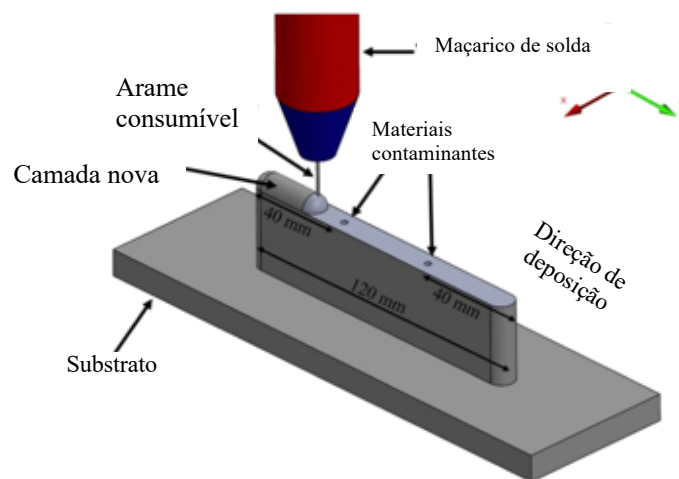
## 2.5 DEFEITOS EM AÇOS INOXIDÁVEIS PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

Apesar das propriedades mecânicas dos componentes fabricados por MADA serem comparáveis, em muitos casos, às partes processadas de forma tradicional, alguns defeitos da MA devem ser levados em conta para aplicações críticas (WU et al., 2018). Alguns desses defeitos estudados pelos autores foram deformação e tensão residual, porosidade, além de rachaduras e delaminação. Esses defeitos devem ser evitados, principalmente para utilização em ambientes extremos. Esses problemas podem ser gerados por diversos aspectos, como solda instável, deformação térmica, problemas de funcionamento da máquina e influências do ambiente.

Novelino e Ziberov (2021) estudaram as causas de defeitos na deposição de materiais em diversas ligas, podendo ser explicitados os problemas em deposição CMT, sendo um dos casos as rachaduras em ligas de Al-Si, que tiveram os defeitos acentuados quanto maior a taxa de deposição, além de que a microestrutura também foi afetada, tendo menores contornos de grão e estabilidade estrutural, a partir de 5,5 m/min. Outro defeito foi a oxidação, que foi maior no método CMT pulsado quando comparado ao processo CMT convencional, isso é dado pela maior necessidade de calor na deposição, além do pulso gerar distúrbios no gás de proteção, sendo necessário um maior fluxo de gás para reduzir a possibilidade de oxidar o material. Outros métodos e ligas também foram estudados, mas como conclusão foi obtido que o processo CMT gera bom acabamento superficial, além de ser menos suscetível a defeitos, dada a menor necessidade de utilização de calor e alta estabilidade do arco. Os processos MADA apresentaram a porosidade como um dos desafios a serem otimizados, sendo necessário melhorar o planejamento do caminho de solda a fim de garantir um fluxo regular de deposição e reduzir a concentração de hidrogênio.

Gordon et al. (2019) também analisaram defeitos na deposição de aço inoxidável por deposição a arco, nesse caso o 304. Foi analisado a porosidade do material, em três partes distintas da peça, no topo esquerdo, topo direito e na base direita, ficando demonstrado que a porosidade é diferente para cada parte estudada, apresentando-se maiores no topo esquerdo quando comparado com os outros pontos. Esse defeito pode ser causado por diversos motivos, os mais comuns são a interação de chumbo e enxofre presente no aço e bolsões de ar durante a deposição. No caso estudado a causa desses defeitos foi atribuída a uma aplicação de energia menor que a necessária, não fundindo todo o aço, conseqüentemente não tendo uma adesão eficiente entre as camadas, além da geração de gases nos processos térmicos.

Outro defeito comum em peças depositadas é a contaminação com substâncias indesejadas, como óleos, areia ou outras impurezas presentes no ambiente, que diferente da MA por cama de pó, na MADA o material não fica contido em um ambiente controlado. Como uma das formas de detectar esse problema Ramalho et al. (2021) desenvolveram um estudo que compara o defeito na hora da deposição com as ondas sonoras emitidas nesse momento, haja vista muitos soldadores experientes confiarem na própria visão e audição para notar erros na solda. Para isso foram feitos furos no metal base, preenchidos com impurezas, como pode ser visto na Figura 30, e utilizados sensores acústicos para detectar a variação nas frequências quando se depositou sobre esses furos.



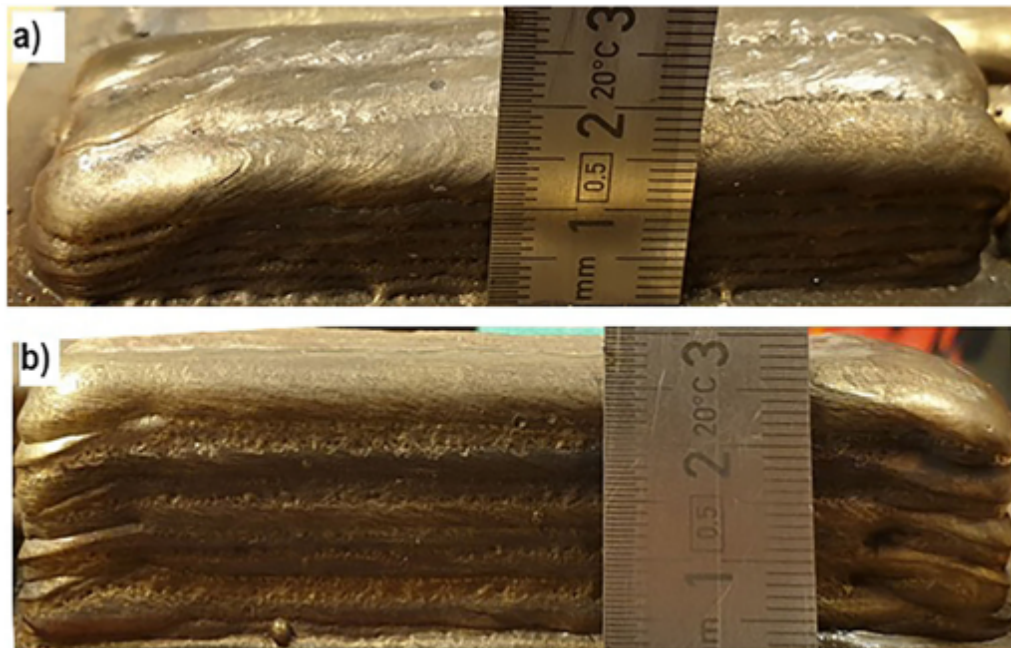
**Figura 30-** Representação esquemática da distribuição dos furos e a camada de deposição (adaptado de RAMALHO et al., 2021).

Apesar de ter sido possível visualizar a diferença sonora, a análise do resultado com base nesse parâmetro fica inviável para indústria pela baixa eficiência, sem aplicação acadêmica, visto a quantidade de processos mais eficientes na análise do mesmo defeito.

Outro problema na deposição a arco é a distribuição de defeitos por conta do reaquecimento e resfriamento cíclico que ocorre por conta da alta temperatura do material fundido. GE et al. (2019) analisaram a evolução da microestrutura e sua correlação com os defeitos internos e a sua distribuição. Depositando uma liga de aço inoxidável 2Cr13 por MADA com CO<sub>2</sub> como gás de proteção, e utilizados 3 exemplares retirados da parte de cima, do meio e de baixo para análise da microestrutura.

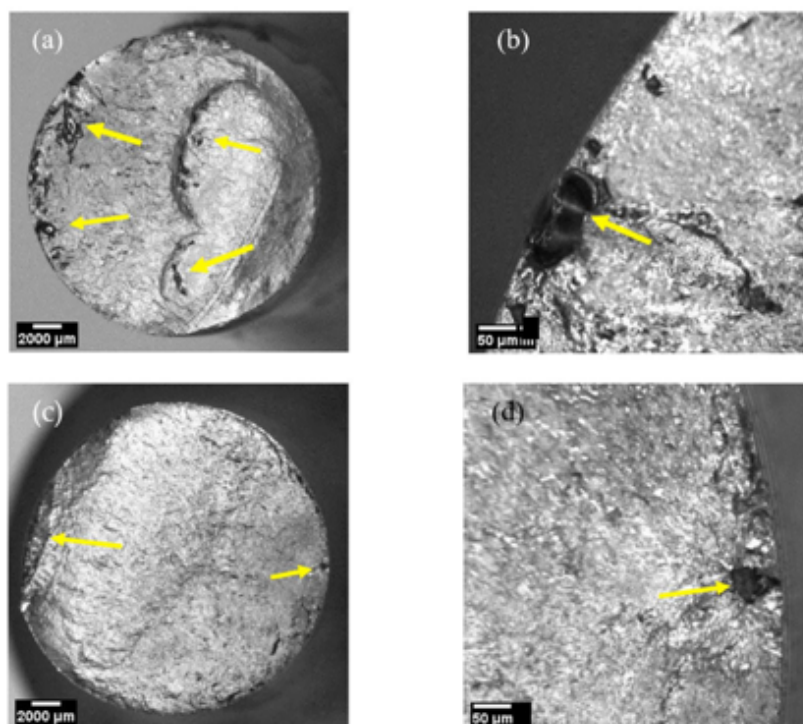
Com isso foi visto que uma porção do material esteve exposta a diversos reaquecimentos, resfriamentos e até fusão parcial, por conta do calor das camadas depositadas em seguida. Com isso também verificou-se que as camadas submetidas à fusão por conta das camadas superiores, apresentaram uma microestrutura mais homogênea e com menores poros. Por fim, esses defeitos podem ser reduzidos ou, até mesmo extintos, caso haja um melhor estudo das variáveis do processo de MADA.

Outro fator importante na qualidade da peça depositada foi a utilização de uma única direção de deposição ou duas direções, ida e volta. Com isso Hosseini et al. (2019) analisaram a diferença no aço inoxidável duplex com mesmos parâmetros de entrada, alterando apenas a deposição na ida do metal, e na ida e volta do mesmo, com isso foi obtido que uma direção apenas causou uma parede mais desigual, quando comparado com as duas direções, ressaltando também que o lado inicial do caminho de deposição ficou mais alto que o final, ocasionado por conta do acúmulo de calor no final da deposição. Essa diferença de altura e comparação dos dois métodos pode ser visto na Figura 31.



**Figura 31-** Deposição a arco com uma direção e alturas distintas a) e b) com duas direções e altura nivelada (HOSSEINI et al., 2019)

Com o objetivo de se analisar a resistência a fadiga em MADA-CMT para aços inoxidáveis *super-duplex*, Sales et al. (2021) utilizaram um arame de liga ER2594 sob esforços cíclicos de frequência de 10 Hz em temperatura ambiente, estudando após a deposição os defeitos na morfologia e os pontos de iniciação de falha. Foi visto que um melhor acabamento superficial não evitou, nem melhorou de forma significativa, a resistência à fadiga dos corpos de prova por conta dos defeitos terem sido iniciados no interior do corpo de prova (Figura 32), em geral por defeitos de porosidade ou rachaduras, sendo mais eficiente um estudo sobre os melhores parâmetros de deposição, diâmetro de arame, taxas de deposição e temperaturas entre camadas, a fim de melhorar essa resistência possibilitando diminuir a chance de descontinuidades/defeitos em grandes quantidades de peças produzidas.



**Figura 32-** Face transversa fadigada, ambas apresentando porosidade de gases externos, indicando início de trinca. (a) 0,8x-(b) 4x-(c) 0,8x-(d) poro aumentado em 4x. (SALES et al., 2021)

Zhu et al. (2020) investigaram os parâmetros apropriados para evitar a precipitação de ferrita delta no aço inoxidável 410, visando melhorar a resistência mecânica do material, sem tratamentos posteriores à deposição. Para isso foi utilizado arame de 1,2 mm de diâmetro, 97,5% de Ar e 2,5% de CO<sub>2</sub> como gás de proteção e 20 L/min como fluxo do mesmo. Após isso foram retirados exemplares do material para estudar sua microestrutura e comparar com resultados utilizando tratamento térmico, alguns corpos de prova foram submetidos a tratamento no forno a 500<sup>o</sup> por 2 horas (LA), 860<sup>o</sup> por 2h, resfriado até 600<sup>o</sup> e resfriado a temperatura ambiente (FA) e 720<sup>o</sup> por 2h seguido de resfriamento em temperatura ambiente (HT).

Como resultado foi obtido que o LA induziu a formações de segregação de carbono na fronteira de grão, nas amostras de FA a completa redução dos estresses residuais causou uma diminuição na dureza e resistência a tração do material, porém a deformação foi maior, inclusive no HT, que também passou pelo tratamento térmico, porém dado a temperatura abaixo da transformação de martensita e fase gama, o exemplar seguiu a microestrutura do corpo sem tratamento térmico, com basicamente as mesmas propriedades mecânicas, tendo uma maior dureza por conta de finas dendritas de martensita. Essas microestruturas podem ser vistas na Figura 33.

Sendo observado que o defeito de precipitação de ferrita delta pode ser evitado utilizando os parâmetros corretos através de MADA CMT, além do que a resistência à tração foi maior por conta do refino do grão, ajudado pela formação de dendritas de martensita distribuídas uniformemente.

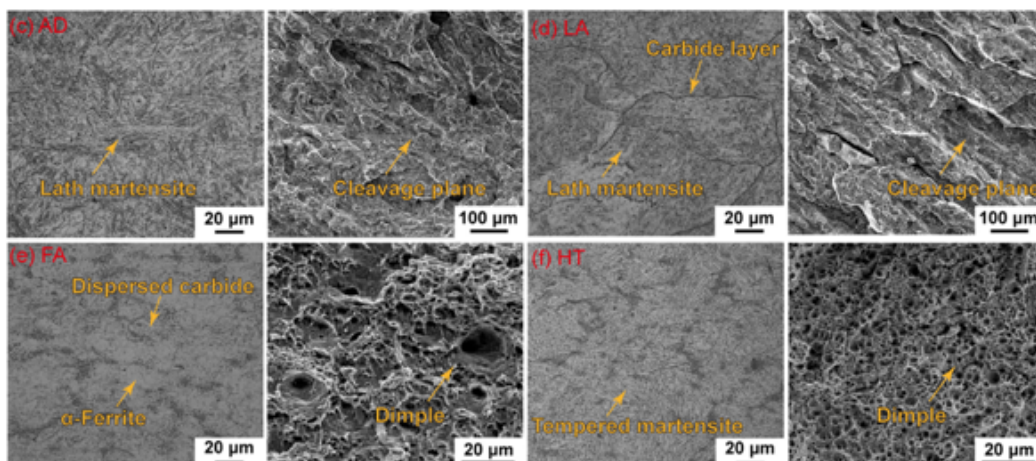
Durante o estudo do aço inoxidável 410, Roy et al. (2020) verificaram defeitos que podem ser encontrados na soldabilidade, afetando diretamente a manufatura aditiva desse material. Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam uma propensão a formação de trincas, sendo comum três tipos delas:

- A trinca por solidificação: causada pela solidificação como austenita, devido a maior concentração de carbono.
- Trinca causada pelo tratamento térmico após a soldagem ou o aquecimento das camadas interpassos: esse problema é maior caso haja a presença de impurezas como fósforo, enxofre, boro e cobre.
- Trinca induzida por hidrogênio: depende de diversos fatores como concentração de hidrogênio, microestrutura. Esse defeito pode ser evitado caso seja feito um tratamento térmico adequado e temperatura de deposição correta, dado a baixa concentração de carbono nessa liga.

Outro defeito muito comum é a variação não controlada das propriedades mecânicas do material, em especial a dureza, que é gerado pelas diversas camadas depositadas e a presença de  $\delta$  ferrita. Esse defeito é eliminado utilizando tratamento térmico para eliminar a presença dessa ferrita e recuperar as propriedades mecânicas.

Tradução:

-Ferrite = ferrita; lath martensite = ripa de martensita; dimple = cavidade; cleavage plane = plano de clivagem; carbide layer = camada de carboneto; Tempered = temperado.



**Figura 33-** Microestrutura e fractografia do (c) como depositado, (d) LA, (e) FA e (f) HT. (ZHU et al., 2020)



## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 TRABALHOS BASE

Como base do planejamento, foram utilizados os estudos feitos por Santos (2013), Santos (2018), Bruno (2019) e Novelino (2021).

Com o objetivo de se obter a emissividade das superfícies soldadas, com diferentes acabamentos e materiais, Santos (2013) realizou seu estudo com o aço ASTM A743 CA6NM e o AWS 410 NiMo como metal de adição. Também foi verificado a influência dos ciclos térmicos na microestrutura dos metais, provenientes da soldagem GMAW em múltiplos passes. Para a soldagem foram verificados os parâmetros que geraram as melhores condições de acabamento, baixa energia de soldagem e geração de faíscas, e dimensões adequadas do cordão. Com a intenção de se obter os parâmetros mais adequados de soldagem, Santos (2013) verificou a influência da velocidade de alimentação do arame, velocidade de deslocamento da tocha, tensão aplicada, distância do bico de contato a peça, vazão do gás, corrente aplicada, espessura do cordão e o incremento na altura. Para se verificar os parâmetros iniciais, foram feitas seis deposições, inicialmente com um passe em diferentes partes da placa (superfície e borda) e diferentes materiais de base, como aço baixo carbono e inoxidável, passando para múltiplos passes.

Com o intuito de se estudar o efeito da temperatura interpasse e de pré-aquecimento, a fim de evitar o tratamento térmico pós soldagem (TTPS), Santos (2018) realizou ensaios de soldagem GMAW múltiplos passes, dos aços ASTM CA6NM e do AWS EC410NiMo, com baixa energia, variando os valores de temperatura, indicando os parâmetros de soldagem utilizados para se obter as melhores condições de reparo das turbinas. Foi realizado juntamente com a deposição, ao monitoramento termográfico infravermelho para se controlar essas variações de temperatura. Verificar a temperatura que geraria o cordão de solda com propriedades mais adequadas ao uso. Foi observado que a temperatura de 150 °C para temperatura de pré-aquecimento (TPA) e 150 °C para temperatura de interpasse (TI), apresentaram os melhores resultados para serem utilizadas no reparo de turbinas. A Figura 35 apresenta a macroestrutura e geometria das amostras obtidas, sendo a amostra 5 (TPA: 200 °C e TI: 200 °C) a com melhor geometria da peça para a manufatura aditiva, visto que sua largura foi a com menor variação com o aumento da altura.

Bruno (2019) com o objetivo de determinar a viabilidade da utilização da liga 410NiMo na produção de peças, obtidas por MADA-CMT, dividiu seu estudo em 3 partes. Para se iniciar e parametrizar de forma preliminar seu estudo, foram realizadas deposições de cordões simples, verificando a influência dos parâmetros de deposição, sendo utilizados em seguida para depositar paredes com geometrias adequadas. Como material do arame, foi utilizado o OK Autrod 410NiMo, fornecido pela ESAB, com 1,2 mm de diâmetro. O substrato consistiu em uma chapa de aço baixo carbono, comprovando a possibilidade de obter uma deposição com qualidade em materiais diferentes de adição e base. Os parâmetros variados foram a taxa de deposição do arame e velocidade da tocha, a corrente e tensão foram escolhidas de modo sinérgico, outros parâmetros que permaneceram constantes foram a distância do bico de contato a peça e a vazão do gás de proteção. Para a escolha das peças aprovadas, foi realizado a inspeção visual após a deposição de cada peça.

Novelino (2021) em seu estudo sobre a geometria de peças metálicas obtidas por MADA, avaliou as geometrias de diferentes cordões e peças, variando os parâmetros de deposição, direções de deposição e deposição de uma parede angulada, avaliando suas características geométricas e qualidade superficial. O método utilizado também foi o CMT, porém com arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, controlando a temperatura entre camadas. Seu ensaio iniciou com a deposição de cordões simples para testes, verificando os melhores parâmetros e utilizando-os na deposição de 5, 10, 20 e 100 camadas. A análise geométrica foi feita com base na largura efetiva, altura, espessura e ângulo de molhamento das peças e cordões obtidos, e a análise visual de trincas para verificar a presença de defeitos/descontinuidades como porosidades ou rechupes. Para melhor visualização dessas medidas, foi feito um corte transversal na peça.

Baseando-se nesses trabalhos, foram utilizadas a metodologia para as deposições do Santos (2013) e do Bruno (2019), já a análise da geometria da peça seguiu a análise feita por Novelino (2021), sendo feita a comparação com os resultados obtidos nos trabalhos passados.

### 3.2 METODOLOGIA

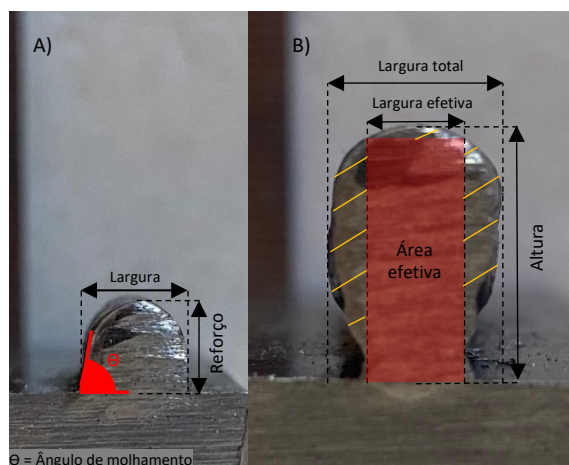
Para realizar os experimentos de forma segura e evitando possíveis desvios no caminho da deposição, foi feita a fixação do material de base na mesa de trabalho. Utilizou-se para isso grampos, evitando que o material se movesse durante o processo de deposição, evitando possíveis descontinuidades/defeitos causados por essa movimentação.

Para se evitar descontinuidades/defeitos causados pelo material de base, é também necessário que o mesmo seja compatível com o material a ser depositado, no caso deste estudo foi utilizado uma base de aço baixo carbono, que de acordo com o estudo de Bruno (2019), é compatível com a liga depositada. Além disso para se garantir uma superfície plana de deposição, foi realizado lixamento e limpeza do substrato, evitando que na deposição haja escorregamento do material fundido sendo depositado.

Após a limpeza do substrato, passou-se a alimentação da máquina com o arame que foi utilizado, gás de proteção e testes iniciais de deposição dos cordões simples, obtendo parâmetros iniciais. O teste consistiu na deposição de cordões simples, variando alguns parâmetros de forma individual, ou seja, foram mantidos constantes os outros parâmetros. Os parâmetros de deposição foram variados de acordo com a curva sinérgica do material, especificado pelo sistema da fonte, sendo necessário especificar a velocidade de alimentação do arame, correção do arco voltaico, que para o estudo foi utilizado o de 5%, como feito por Novelino (2021), modo de operação da tocha e o processo utilizado, sendo o CMT.

Verificados os melhores parâmetros para os cordões simples, foram utilizados os mesmos na deposição de paredes de 5 camadas, sendo variados para se obter os preferíveis para esse tipo de aplicação e foram utilizados na deposição de paredes de 15 camadas, a fim de se ter os parâmetros mais adequados para a mesma. Após a deposição das 15 camadas, foram feitas paredes de 30 camadas, sendo analisada a influência da deposição contínua e com parada (interrupção do arco) após as primeiras 15 camadas depositadas, sendo então depositado mais 15 camadas, quando a primeira atinge 100°C. Esse valor de temperatura foi escolhido para ser feito a comparação com o trabalho de Santos (2018), que utilizou esse valor como uma das temperaturas de interpasso estudadas.

Os melhores parâmetros foram verificados com base na análise visual e geométrica das paredes, e de acordo com a quantidade de camadas, visto que um parâmetro ideal para um cordão simples, pode não ser satisfatório na deposição de camadas. A análise visual buscou encontrar descontinuidades/defeitos aparentes na peça, defeitos que podem causar variações não esperadas nos resultados dado a variação na geometria. Essa análise foi utilizada para aprovar ou reprovar as paredes depositadas, para posterior análise geométrica. Esta foi feita tomando o valor da largura total, largura efetiva e altura da parede depositada, ou largura e reforço do cordão simples (Figura 34), além disso foi medido a razão da área total (largura total x altura total) pela área efetiva, gerando os valores que foram a base de comparação dos parâmetros utilizados, entre as deposições e os trabalhos base. Para se realizar as medições foi necessário realizar um corte transversal no ponto médio do comprimento da parede depositada, para se evitar defeitos causados pela borda. Esse corte foi realizado com uma serra fita, fazendo possível a melhor visualização das características analisadas da parede.



**Figura 34-** Medidas analisadas no cordão de solda “A)” e na parede “B)”.

Para se realizar o teste inicial com os cordões simples, foram depositados 8 cordões de 50 mm de comprimento, sendo utilizado essa dimensão pois foi suficiente para se obter um cordão simples sem

defeitos e podendo ser feito a análise de suas características geométricas, obtendo parâmetros para as seguintes deposições em camadas. Para as paredes de 5 camadas, foram utilizadas 4 deposições, visto que a divisão em deposições com menos camadas que o objetivo de 30 camadas, diminui o gasto de material e torna possível verificar as influências dos parâmetros com o aumento da quantidade de camadas. Os parâmetros foram variados de acordo com a geometria obtida, cada um com 100 mm de comprimento, possibilitando que o calor fosse dissipado entre a deposição de cada camada. Já para a parede de 15 camadas, utilizando os resultados obtidos com as deposições anteriores, foram depositadas 2 paredes, novamente com 100 mm, obtendo geometria constante e linear. Com os resultados, foram depositadas mais 2 paredes com 30 camadas, sendo uma delas depositada sem interrupção do arco elétrico, e outra com 15 camadas depositadas, resfriamento da parede até 100 °C, valor de temperatura no qual não há interferência nas fases do material e o mesmo já está solidificado, e depositadas mais 15 camadas sobre as anteriores (deposição 15+15) a fim de se comparar o efeito da temperatura de interpasse controlada e sem interrupção do arco. Para as deposições das paredes, foi verificada sua geometria, levando em conta sua linearidade e a presença de descontinuidades, a fim de se escolher o melhor parâmetro. O fluxograma das etapas pode ser visto na Figura 35.



Figura 35- Fluxograma do ensaio.

### 3.3 MÉTODO DE DEPOSIÇÃO

O método escolhido foi o CMT convencional, dado a seu maior controle da deposição, gerando peças com melhor acabamento superficial e menos respingos quando comparado com processo GMAW convencional, como obtido por Santos (2013) e por Pimenta (2022) que comparou estes dois processos e obteve menos respingo no substrato e nas camadas depositadas quando utilizado o CMT. Para os cordões simples, foi utilizado a deposição unidirecional. Para as outras deposições, foi utilizada a deposição bidirecional, contínua e sem interrupção do arco, ou seja, de forma que o arco não foi fechado durante a subida interpasses e em nenhum momento da deposição até a última camada, com exceção da parede de 30 camadas com interrupção na metade do processo. Com isso foi verificada a influência do resfriamento da peça, no gradiente de temperatura da mesma e, conseqüentemente, na sua geometria.

Os parâmetros avaliados e variados entre deposições, de forma individual, foram a velocidade de deslocamento da tocha, velocidade de alimentação do arame, corrente aplicada pela fonte e variação de altura a cada passada. Tendo como objetivo obter a geometria mais uniforme, além da menor largura e maior altura, ocasionando uma maior área efetiva de deposição. Com a obtenção de uma área efetiva maior, a necessidade de métodos subtrativos para se obter uma parede no formato final, é menor, tendo um menor desperdício de material.

### 3.4 MEDIÇÕES

As medições das dimensões geométricas foram feitas com a utilização de paquímetro com resolução de 0,01 mm, exatidão de  $\pm 0,02$  mm e 0-150 mm de faixa de medição. As medições de largura foram feitas a cada 5 mm de variação no comprimento da peça para os cordões, e a cada 10 mm no caso das paredes, e a altura da parede realizada na seção de corte. Esses valores foram escolhidos com base no trabalho do Novelino (2021) e do Pimenta (2022), que por conta de não ter tanta variação nas dimensões, utilizou da distância de 10 mm para as paredes com 75 mm de comprimento, enquanto para os cordões, com 50 mm de comprimento, foi utilizado de 5 mm entre medições. Cada ponto foi marcado na peça e feito 5 medições, e resultados apresentados como média e desvio padrão, com intervalo de confiança de 99,73%. Para padronização todas as imagens do Capítulo 4 (Resultados e Discussões), seguiram o mesmo posicionamento e direcionamento como na Figura 36, assim como a escala de medição nas imagens sendo de 1 mm.

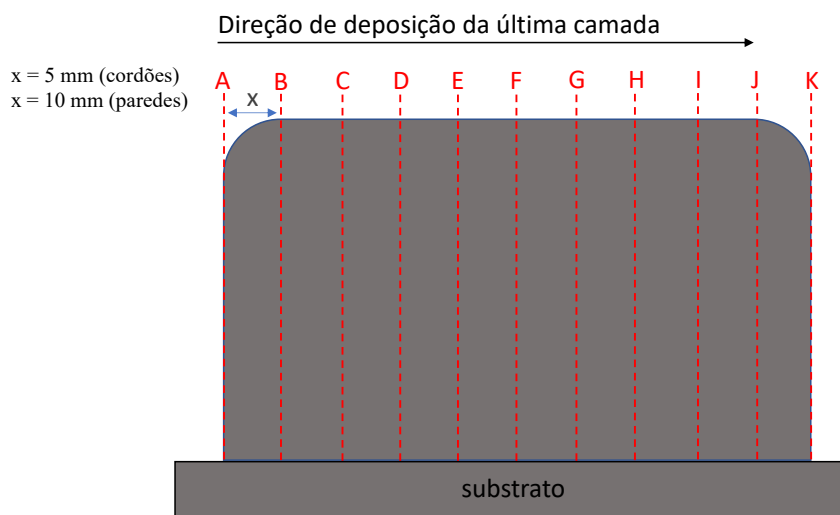


Figura 36 – Esquema da medição e direção de deposição das peças.

### 3.5 EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

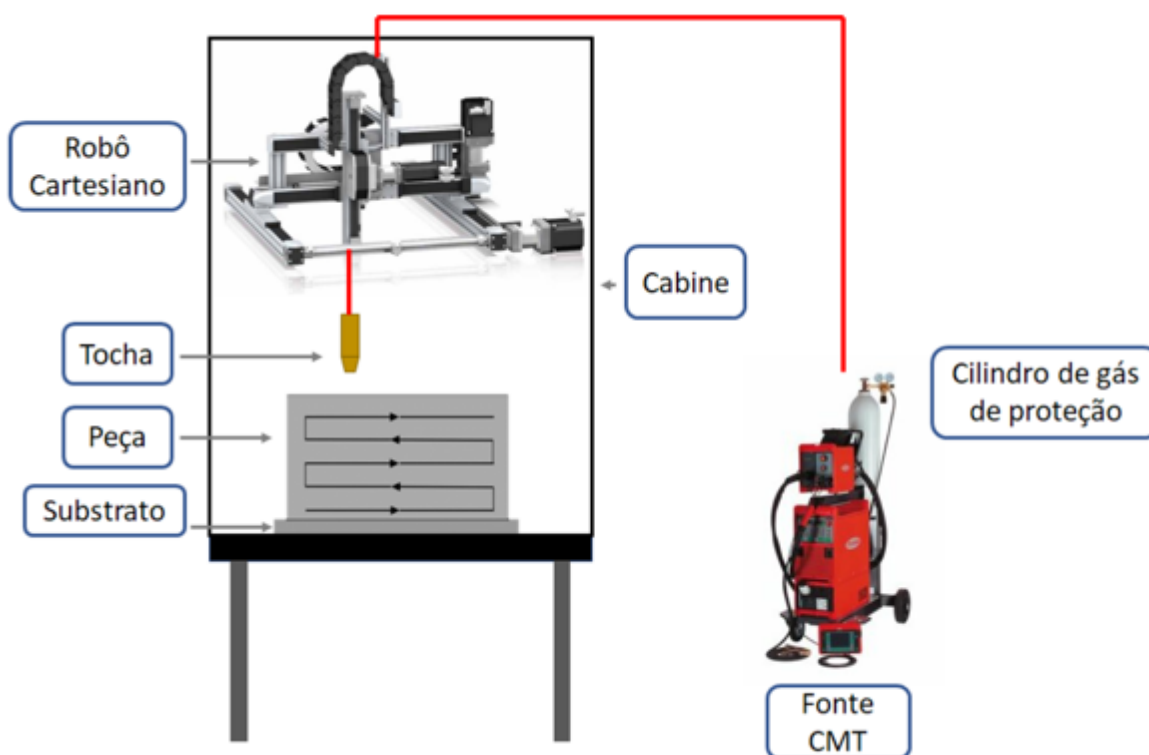
A máquina utilizada para realizar o deslocamento da tocha durante a deposição do material é o robô cartesiano MAXR23-S42-C42 da Electric Schneider as dimensões do equipamento são 800x800x500 mm, utilizando o código G como programação. O consumível utilizado para deposição foi o arame de

1,2 mm de diâmetro, sendo o arame intermediário entre 0,8 mm e 1,8, com valores de corrente necessária para a deposição e a velocidade de soldagem também intermediários, da liga 410NiMo, com o substrato de aço baixo carbono, a composição química do arame pode ser vista na Tabela 3.

Material	Composição química %						
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
410 NiMo	0,02	0,50	0,40	4,20	12,40	0,60	0,10

**Tabela 3** - Composição química do arame (adaptado de ESAB, 2019)

A fonte TransPuls Synergic 5000 CMT da Fronius foi utilizada para alimentação, dado sua capacidade de escolher o programa sinérgico de acordo com o tipo do material do arame, diâmetro do mesmo e o gás de proteção utilizado. O esquema final do processo, com seus componentes pode ser verificado na figura 37.



**Figura 37**- Esquema do processo de deposição (PIMENTA, 2022).

### 3.6 NORMAS

A norma utilizada para a inspeção visual foi a NBR NM 315 (NBR, 2017), a qual especifica a forma de se realizar um teste visual, preparação da peça para se fazer o ensaio e ambiente em que se pode utilizar destes testes, sendo seguida para a análise das peças obtidas. A ASME B31 (ASME, 2018) especifica os testes visuais que podem ser realizados em soldas, sendo eles trincas, fusão incompleta, porosidade, rechupe e acabamento superficial. Já para se caracterizar essas descontinuidades/defeitos, foi utilizada a norma ISO 5817 (ISO, 2014) que especifica os limites das imperfeições em soldagem, e como calculá-las.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DOS CORDÕES DEPOSITADOS

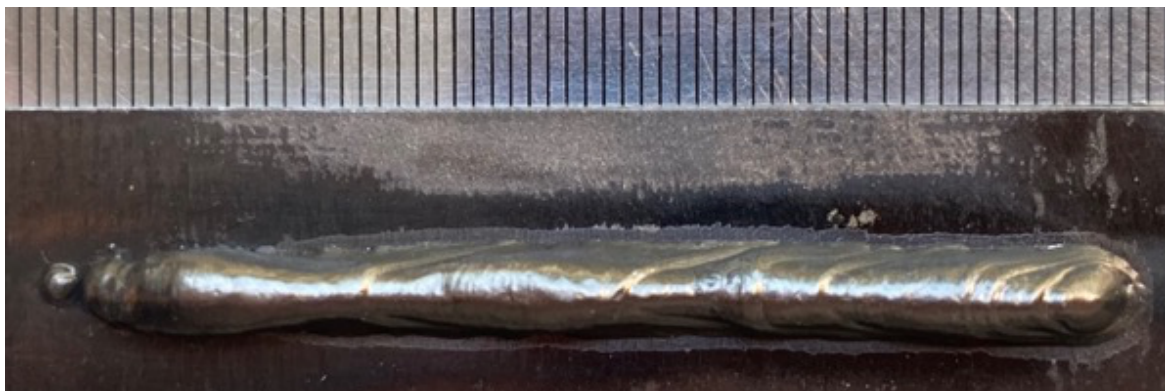
O comprimento escolhido para se realizar a deposição dos cordões simples, foi de 50 mm (com a escolha deste valor, já explicada no Capítulo 3.2). De acordo com as variações realizadas pela fonte, o aporte térmico também foi alterado, sendo maior quanto maior o valor do produto da corrente e tensão aplicada ( $I \cdot U$ ), juntamente com a velocidade de deslocamento da tocha. A distância bico de contato a peça (DBCP) foi inicialmente de 12 mm, assim como no trabalho de Novelino (2021), sendo esse valor aferido novamente ao final de cada deposição, alterando então o valor de altura de subida da tocha para que se mantenha constante essa distância (no caso de deposição de paredes). Os valores médios utilizados pela fonte são apresentados na Tabela 4. Os valores de altura e largura média dos cordões são mostrados nas Tabelas 5 a 11, juntamente com as Figuras 39 a 45 de cada deposição obtida.

Dados do experimento				
Cordão	Vdt (mm/s)	I (A)	U (V)	Va (m/min)
1	4,00	101,00	11,70	2,50
2	4,00	140,00	16,40	3,70
3	4,00	151,00	16,90	4,30
4	4,00	71,00	10,80	1,70
5	5,00	112,00	11,60	3,00
6	3,00	97,00	12,10	1,80
7	2,00	97,00	12,30	2,30

Obs: I= Corrente média, U= Tensão média, Va= Velocidade de alimentação do arame,  
Vdt= Velocidade de deslocamento da tocha.

**Tabela 4** – Parâmetros médios de deposições dos cordões simples.

O Cordão 1 (conforme tabela 4, nomenclatura seguida para todos os cordões simples) já apresentou uma geometria contínua, com valores de largura estáveis, porém com algumas variações na altura chegando a 47% de diferença, ocorrendo *pré-humping* com marcações claras na peça onde variaram esses valores. Como estudado por Yuan et al. (2020), o efeito de *humping* é, em geral, causado pela velocidade de deslocamento muito elevada e/ou baixo aporte térmico, porém por ainda ser um cordão contínuo, o efeito que caracteriza o Cordão 1 é o de *pré-humping*. Esse efeito e o resultado da deposição, assim como os valores de largura e altura podem ser vistos na Figura 38 e Tabela 5.

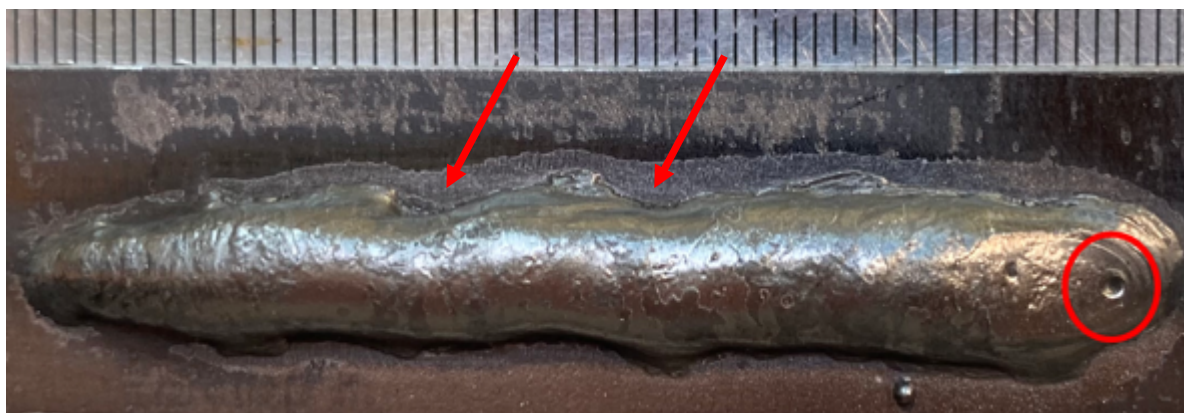


**Figura 38** – Vista superior do Cordão 1.

CORDÃO 1												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	2,06	3,91	3,45	3,20	3,57	2,93	2,89	2,87	3,05	2,99	2,42	3,03
DP	0,06	0,07	0,07	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,08	0,05
LARGURA (mm)												
média	3,72	4,44	3,75	4,53	4,29	4,74	4,73	4,82	4,66	4,80	4,26	4,43
DP	0,09	0,02	0,05	0,05	0,06	0,09	0,04	0,02	0,04	0,05	0,09	0,05

**Tabela 5** – Medidas de altura e largura do Cordão 1.

Para evitar o efeito de *pré-humping*, foi utilizado uma maior velocidade de alimentação do arame, de forma sinérgica os valores de corrente aumentaram, gerando um maior aporte térmico na deposição do Cordão 2. Porém após o término do processo, foi verificado que a DBCP não tinha sido regulada, sendo necessário mais um teste com os mesmos parâmetros para verificar a influência deles na deposição. Apesar disso, foi possível observar que o maior aporte térmico reduziu a altura média do cordão de  $3,03 \pm 0,05$  mm para  $2,75 \pm 0,04$  mm, aumentando sua largura em 35%. A ondulação no cordão (indicado pelas setas na Figura 39) também é algo indesejado na manufatura aditiva, pois não é uma base constante para as camadas superiores. Esse efeito causou uma diferença significativa no início do cordão, comparado com o final, sendo relacionado ao fato de a velocidade de deslocamento ser muito elevada, não tendo tempo suficiente para o metal se solidificar de forma constante e retilínea. Houve também a presença de rechupe de cratera (indicado por círculo vermelho na Figura 39), no final do cordão, defeito 1.4-2025 na norma ISO 5817-1 (ISO, 2003), gerado pela falta de material após a contração durante o resfriamento, podendo ser visto em destaque na Figura 39, assim como a variação medida dos valores de largura e altura na Tabela 6.



**Figura 39** – Vista superior do Cordão 2.

CORDÃO 2												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	2,26	3,16	3,40	3,05	3,10	3,09	2,96	2,98	2,96	2,14	1,13	2,75
DP	0,04	0,07	0,06	0,02	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,05	0,04
LARGURA (mm)												
média	4,41	5,12	7,48	7,26	6,53	6,83	7,53	7,25	7,97	8,02	6,56	6,81
DP	0,04	0,04	0,02	0,19	0,03	0,06	0,04	0,01	0,09	0,07	0,10	0,06

**Tabela 6** – Medidas de altura e largura do Cordão 2.

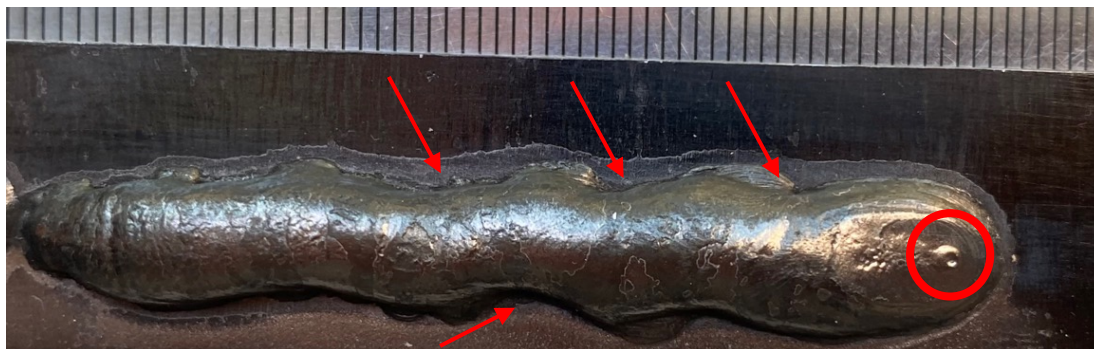
O Cordão 3 foi utilizado para validar os parâmetros utilizados no Cordão 2, que por conta de estar com a DBCP diferente do planejado anteriormente em 12 mm, necessitou ser ajustada para esse valor. Com isso, utilizando os mesmos parâmetros do Cordão 2, foi obtido uma geometria com altura média maior que a deposição anterior, porém apresentando ainda o defeito de rechupe de cratera (destacado pelo círculo vermelho na Figura 40), e o declínio na altura do cordão na direção longitudinal do mesmo. Ambos os cordões também apresentaram uma largura maior que o Cordão 1, sendo menos vantajoso para produção de peças.

O valor de velocidade de soldagem utilizado para o Cordão 2 e Cordão 3, foi descartado para as deposições seguintes, visto que o aporte térmico mais elevado que no Cordão 1 gerou um cordão 6% mais baixo e aproximadamente 64% mais largo, necessitando de mais material para atingir determinada altura, além de que o acúmulo de calor das camadas sobre camadas, poderiam causar o deslizamento



das camadas ou até o colapso das paredes. Além disso é possível verificar na Figura 40, a variação da linearidade do cordão (indicado pelas setas vermelhas), assim como no Cordão 2, isso leva há uma maior necessidade de retirada de material quando for preciso usinar por conta da largura efetiva ser menor que um cordão mais linear, onde a largura efetiva será mais próxima da largura total, ocasionando um maior desperdício de material. Essa diferença de ondulações entre o Cordão 3 e o Cordão 1, torna o 1 preferível em relação ao 3, por conta de ter menor necessidade de retirada de material e uma base mais estável para deposições em camadas. Os valores de altura e largura medidos do Cordão 3 podem ser verificados na Tabela 7.

Chaudhari et al. (2022) também obtiveram um cordão com ondulação e largura acima do esperado, verificando que o parâmetro que mais influenciou o valor da largura do cordão foi o aumento da velocidade de soldagem, com o aumento de forma sinérgica da corrente. Os autores utilizaram do processo GMAW e aço da liga 316L, depositando uma parede de 20 camadas com os parâmetros selecionados dos testes com cordões simples.

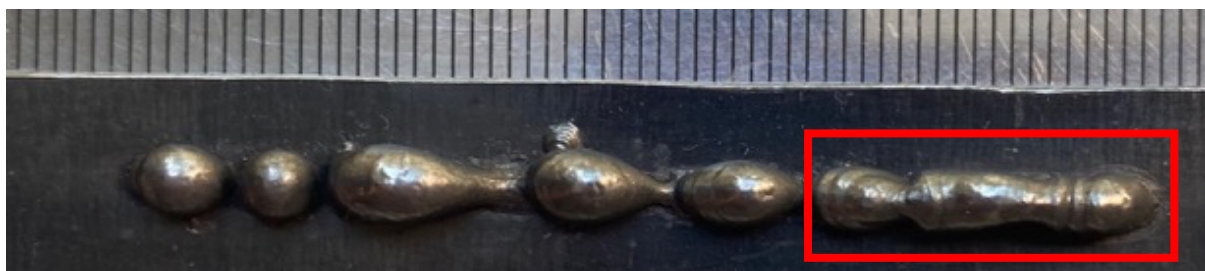


**Figura 40** – Vista superior do Cordão 3.

CORDÃO 3												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	2,45	3,65	3,64	3,61	3,43	2,87	3,05	2,89	2,80	1,93	0,98	2,85
DP	0,05	0,03	0,05	0,02	0,05	0,05	0,10	0,04	0,03	0,07	0,03	0,05
LARGURA (mm)												
média	5,14	7,27	6,74	7,03	6,70	6,93	7,83	8,07	8,23	9,00	6,73	7,24
DP	0,05	0,10	0,01	0,05	0,01	0,06	0,04	0,02	0,08	0,06	0,16	0,06

**Tabela 7** – Medidas de altura e largura do Cordão 3.

O Cordão 4 apresentou *humping* de forma mais acentuada que o Cordão 1, com seus vales chegando a alturas nulas (Tabela 8), porém com uma largura do cordão estreita de  $2,75 \pm 0,04$  mm. Além disso foi visto que em alguns pontos não se teve a formação de um cordão propriamente dito, visto a falta de continuidade do cordão, com o metal depositado afastado entre si. Já no final do cordão, o mesmo apresentou uma discreta melhora na geometria e continuidade (região em destaque na Figura 41). O *humping* pode ter ocorrido devido a baixa temperatura do substrato, visto que não houve um pré-aquecimento do material de base, aliado ao baixo aporte térmico e alta velocidade de soldagem (Yuan et al., 2020).

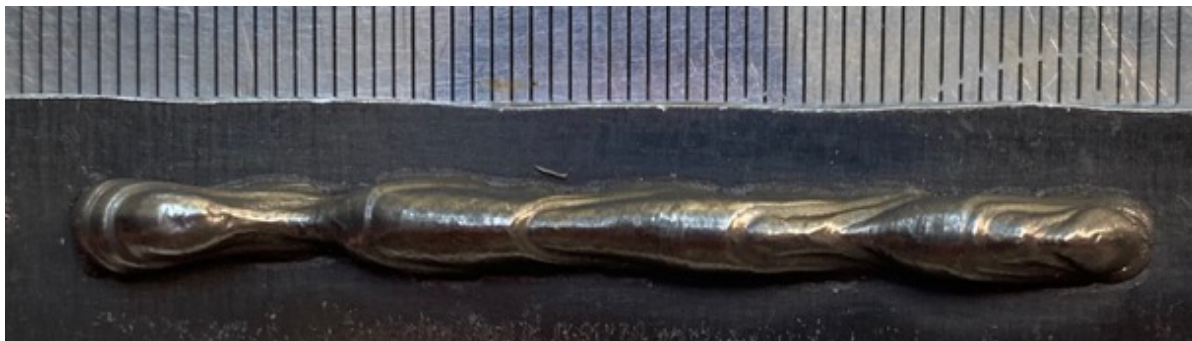


**Figura 41** – Vista superior do Cordão 4.

CORDÃO 4												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	3,31	4,04	2,02	3,12	3,26	3,09	3,05	2,11	3,24	2,94	1,89	2,92
DP	0,05	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04
LARGURA (mm)												
média	2,65	1,65	3,57	2,59	3,00	1,35	3,31	3,31	3,17	2,86	2,79	2,75
DP	0,05	0,05	0,02	0,06	0,04	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,04

**Tabela 8** – Medidas de altura e largura do Cordão 4.

Para a deposição do Cordão 5, foi reduzido a velocidade de deslocamento da tocha, esperando com isso aumentar o calor aportado no material, gerando uma geometria mais linear e contínua (visto na Figura 42) quando comparado com o Cordão 4. Na deposição deste cordão, por conta do aumento na velocidade de alimentação do arame e, conseqüente, maior corrente, as descontinuidades da geometria do Cordão 4 foram eliminadas, contudo ainda apresentando *humping*, no entanto com diferenças de picos e vales menores que a deposição anterior. A largura do cordão foi comparável a do Cordão 1, não sendo relevante o *humping* no caso de deposições com mais camadas, considerando principalmente que o acúmulo de calor da camada depositada se dissipa para as camadas inferiores, diminuindo o efeito visualizado. Elmer et al. (2019) atribuíram a redução na largura das deposições de aço inoxidável da liga 308L, ao aumento na velocidade de deslocamento da tocha, tendo um menor aporte térmico por unidade de comprimento do cordão. A média de altura do Cordão 5 foi 6% inferior à do Cordão 4 (Tabela 9) porém com valores de largura médio similares.

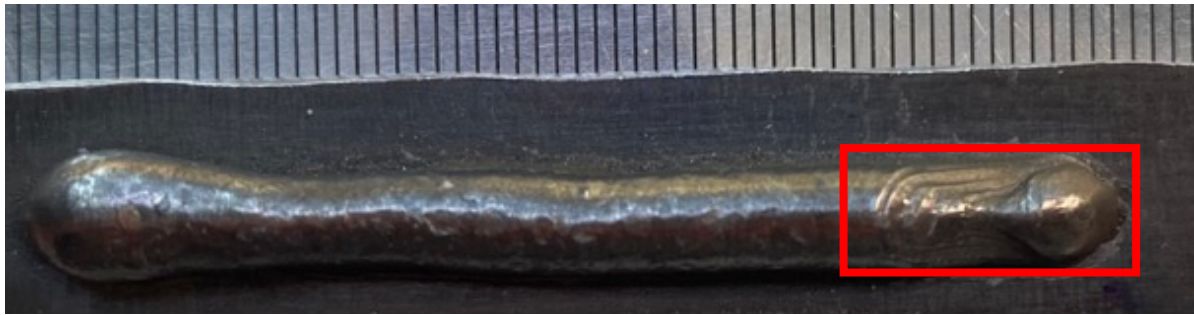


**Figura 42** – Vista superior do Cordão 5.

CORDÃO 5												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	2,82	-	3,08	3,38	3,01	2,10	3,04	2,82	3,49	3,75	2,71	2,75
DP	0,01	-	0,05	0,06	0,04	0,07	0,04	0,02	0,05	0,03	0,04	0,04
LARGURA (mm)												
média	2,82	-	3,08	3,38	3,01	2,10	3,04	2,82	3,49	3,75	2,71	2,75
DP	0,01	-	0,05	0,06	0,04	0,07	0,04	0,02	0,05	0,03	0,04	0,04

**Tabela 9** – Medidas de altura e largura do Cordão 5.

Para o Cordão 6 foi possível obter uma largura média 50% maior que o Cordão 5 e 13 % maior que o Cordão 1, reduzindo, na maior parte do cordão, o pré-*humping*, apenas nas medidas finais esse efeito foi aparente (em destaque na Figura 43). Outra diferença foi a largura do cordão no início da deposição, que foi consideravelmente maior que nos outros 4 cordões com diferenças próximas de 50% a mais no seu valor, possivelmente causado por um acúmulo de calor, desde o momento que o arco é aberto, até o momento que a tocha começa a se deslocar. Por conta da geometria sem descontinuidades e variações na linearidade (comprovado pela Tabela 10), no geral, desse cordão, foram utilizados estes parâmetros para iniciar o teste de paredes com 5 camadas.

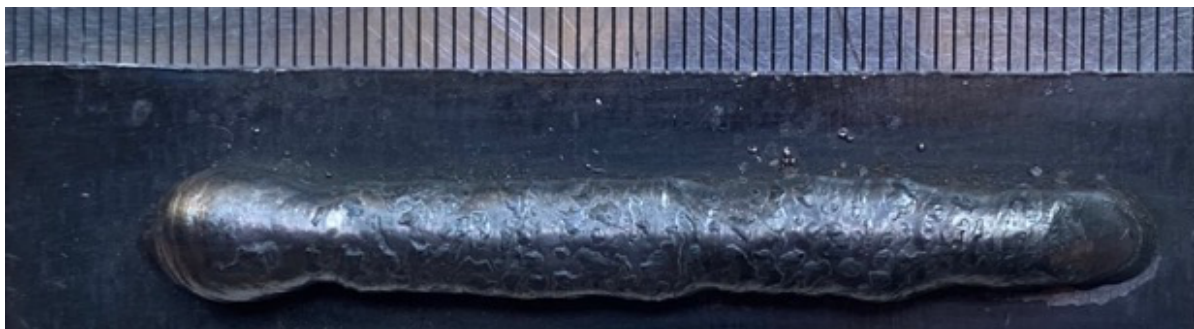


**Figura 43** – Vista superior do Cordão 6.

CORDÃO 6												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	4,27	4,22	3,82	3,61	3,60	3,58	3,69	3,65	3,30	2,84	2,65	3,57
DP	0,06	0,07	0,05	0,05	0,05	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,03	0,05
LARGURA (mm)												
média	4,33	5,70	4,46	5,23	5,28	5,22	5,20	5,21	5,42	5,43	4,24	5,07
DP	0,09	0,06	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,06	0,03	0,08	0,05

**Tabela 10** – Medidas de altura e largura do Cordão 6.

Ainda foi realizado a deposição do Cordão 7, reduzindo a velocidade de deslocamento da tocha. Esse maior tempo com o arco aceso, gerou o cordão com a maior altura de todos os testes, chegando a 3,91 mm, porém com uma largura elevada com média de 5,83 mm. Com isso, podendo causar problemas nas deposições de camadas, os parâmetros foram descartados. Para Ding et al. (2015), que apesar de utilizar o método a laser, verificaram que a largura do cordão foi influenciada pela energia de soldagem, enquanto a altura foi influenciada pela velocidade de deslocamento da tocha. Foi possível verificar o acúmulo de material no início da deposição, assim como ocorreu no Cordão 6, porém isso não é considerado um problema significativo, visto que as peças devem passar por um processo de usinagem até chegar em sua geometria final.



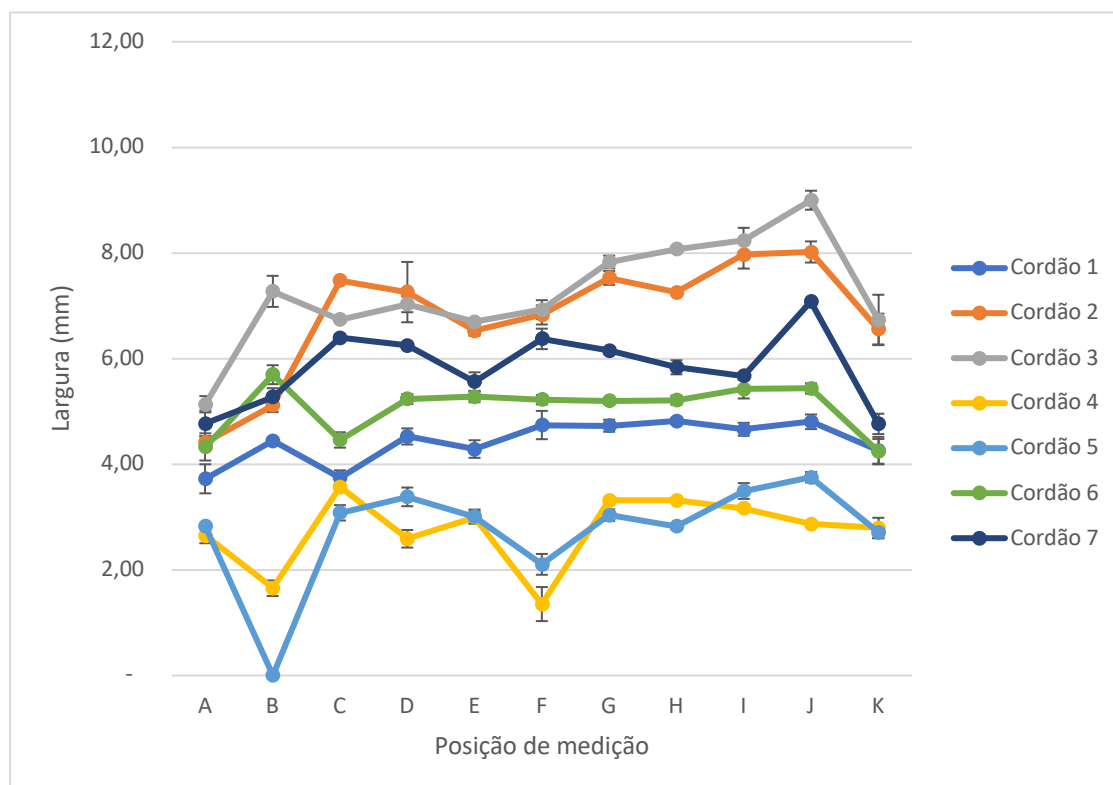
**Figura 44** – Vista superior do Cordão 7.

CORDÃO 7												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	5,37	4,40	3,65	3,61	3,64	3,91	3,89	3,96	4,02	3,12	1,23	3,71
DP	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,07	0,03	0,05	0,05
LARGURA (mm)												
média	4,77	5,27	6,39	6,25	5,56	6,37	6,15	5,84	5,67	7,08	4,76	5,83
DP	0,08	0,06	0,02	0,01	0,06	0,06	0,02	0,04	0,02	0,02	0,06	0,04

**Tabela 11** – Medidas de altura e largura do Cordão 7.

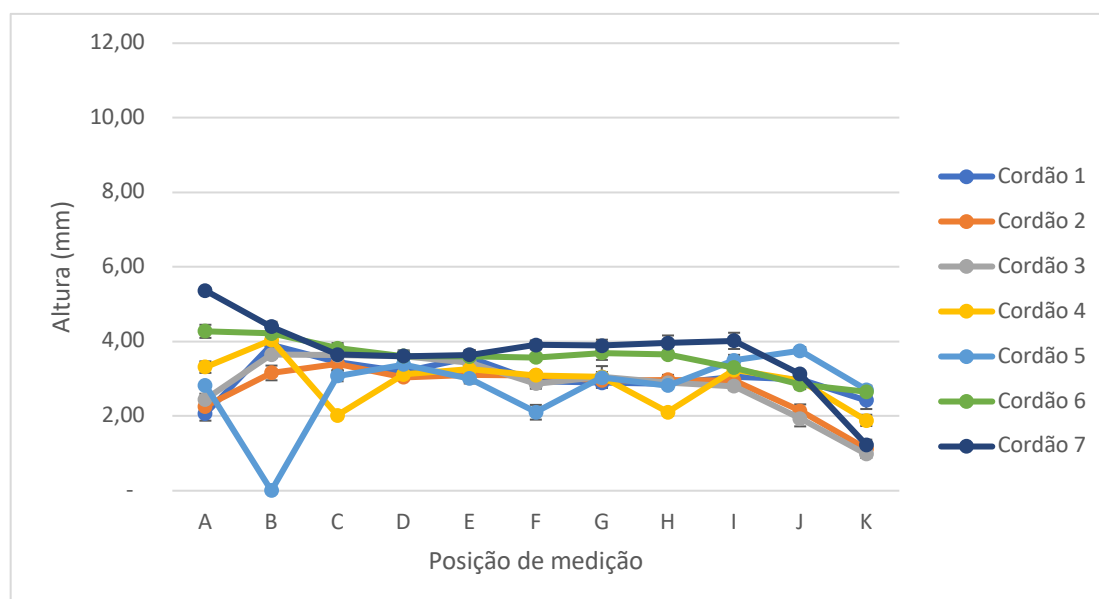
Realizando uma análise geral dos cordões depositados, é possível verificar a variação na largura de todos os cordões simples (Figura 45), tendo o Cordão 4 e Cordão 5 a menor largura, o que é vantajoso para deposição de camadas, porém apenas apresentaram essas características por conta do *humping* ou *pré-humping*. Portanto os cordões simples com características mais estáveis foram o Cordão 6 e 7, tendo o 6 com menor largura, sendo assim escolhido para a deposição de paredes de 5 camadas inicialmente. Já o Cordão 3 e Cordão 2 apresentaram os maiores valores e variações de largura, isso ocorreu devido a

velocidade de deslocamento da tocha ser elevada, comprovado pelo fato de que após diminuir a velocidade de deslocamento, a largura foi mais estável e estreita.



**Figura 45** – Largura dos cordões simples.

Verificando as variações na altura dos cordões simples na Figura 46, foi possível observar novamente que o efeito de *humping* ocasionou cordões com as maiores variações dentre as amostras (Cordão 5 e Cordão 4). Já o Cordão 7 apresentou, no geral a maior altura entre as amostras, com muitas variações em seu início e fim, fato que pode ser explicado pela redução da velocidade de deslocamento da tocha para 2 mm/s, enquanto no Cordão 6 (escolhido com melhor parâmetro) foi utilizada uma velocidade de 3 mm/s, apesar deste ter uma altura maior apenas em alguns pontos, sua variação é mais baixa, formando um cordão mais estável, quando comparado com o Cordão 7.



**Figura 46** – Altura dos cordões simples.

Quando comparado com o estudo de Novelino (2021), é possível verificar a diferença na geometria obtida com arames da liga ER70S-6, que por necessitarem de menos calor para que ocorra a fusão, sua geometria apresenta em geral menor altura e maior largura, quando comparado com a deposição da liga 410NiMo, que tem um maior ponto de fusão. Com isso a maior altura do cordão obtida, foi de 3,34 mm com uma largura de 14,06 mm, enquanto utilizando do aço inoxidável a maior altura obtida foi de 3,71 mm, com uma largura de 5,83 mm. Esse fato melhora o aproveitamento de material na manufatura aditiva, visto que é necessário menos material para alcançar certa altura.

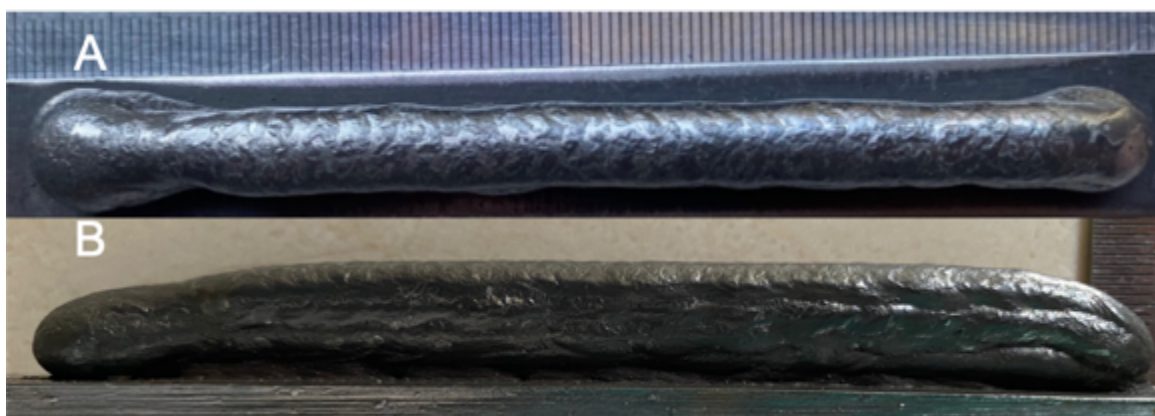
## 4.2 ANÁLISE DAS PEÇAS DE 5 CAMADAS

Para deposição das paredes, foi utilizado um comprimento de 100 mm, para que o calor pudesse se dissipar durante o percurso da tocha. Após o resfriamento das paredes foi visto um aspecto rugoso na superfície superior da parede. Porém como as peças devem passar por um processo de acabamento superficial, a superfície externa não deve ser um problema. Na Tabela 12 é possível verificar todos os parâmetros utilizados para cada deposição.

Dados do experimento						
Parede	Vdt (mm/s)	Subida entre passes (mm)	DBCP após deposição (mm)	I (A)	U (V)	Va (m/min)
5.1	3,00	1,00	4,50	112,00	11,60	3,00
5.2	4,00	1,00	6,00	112,00	11,60	3,00
5.3	4,00	2,00	10,00	89,00	11,80	2,60
5.4	6,00	2,00	11,00	96,00	12,10	3,00

**Tabela 12** – Dados médios das deposições das paredes com 5 camadas.

A Parede 5.1, apresentado na Figura 48, utilizou dos parâmetros do Cordão 6 (deposições dos cordões simples), e apresentou a maior e mais constante altura entre todas de 5 camadas com média de  $9,96 \pm 0,06$  mm, porém com DBCP de apenas 4,5 mm ao término da deposição. Como a intenção é depositar mais camadas, esses parâmetros poderiam ocasionar o contato entre o bico de contato e o material fundido, podendo soldar o bico da tocha na peça. Assim como nos cordões, foi visível e medido a maior largura no ponto inicial do processo (visto na Tabela 13), tendo uma diferença de aproximadamente 30% do valor central com o obtido nas bordas. Nessa deposição a presença de rechupe de cratera também foi vista. Essa diferença de altura entre início e fim da parede, também foi reportado por Zhang et al. (2003), sendo ocasionado pela falta de controle da viscosidade do material, podendo ser diminuído através da deposição com arco descontínuo, sendo interrompido a cada camada.

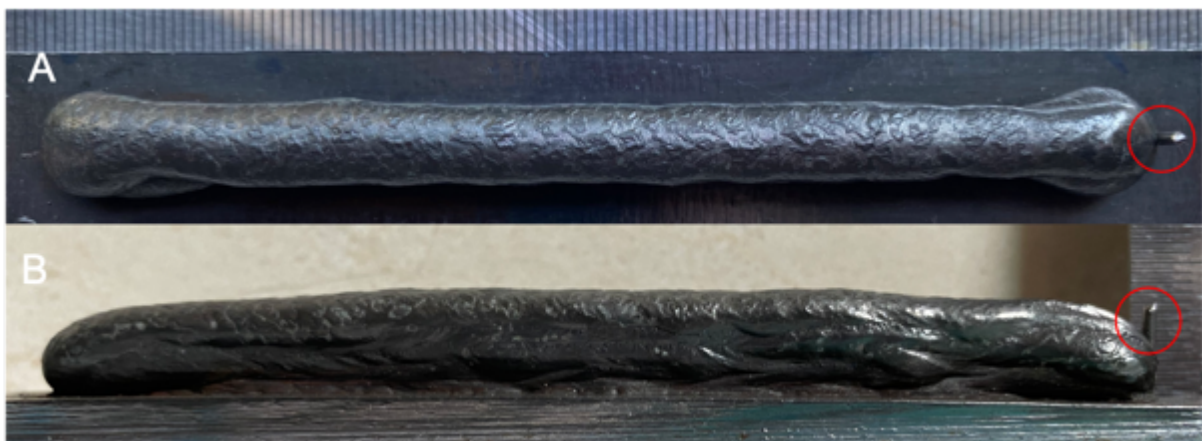


**Figura 48** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 5.1.

PAREDE 5.1												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	8,16	8,62	10,17	10,60	10,55	10,76	10,52	10,52	10,71	9,61	9,33	9,96
DP	0,02	0,05	0,07	0,07	0,06	0,08	0,07	0,08	0,04	0,09	0,08	0,06
LARGURA (mm)												
média	10,88	10,45	7,42	7,80	7,64	7,87	7,55	7,70	7,65	7,85	9,34	8,38
DP	0,05	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03

**Tabela 13** – Medidas de altura e largura do Parede 5.1.

No caso da Parede 5.2, com o aumento da velocidade de deslocamento da tocha, sua altura se manteve estável em sua extensão, com uma largura média de  $7,15 \pm 0,03$  mm enquanto na Parede 5.1 foi de 8,38 mm. Porém a DBCP final foi de 6 mm, por conta do aumento na velocidade de soldagem, com uma parte do arame sendo soldada na poça de fusão (em destaque na Figura 49), possivelmente por algum defeito no servomotor que realiza o processo CMT. Esse material soldado, não permitiu verificar se houve a cratera de rechupe ao final do processo. No início da parede, é claro a redução da largura do efeito de início, sendo mais de 50% quanto comparado com a Parede 5.1 (Tabela 14).

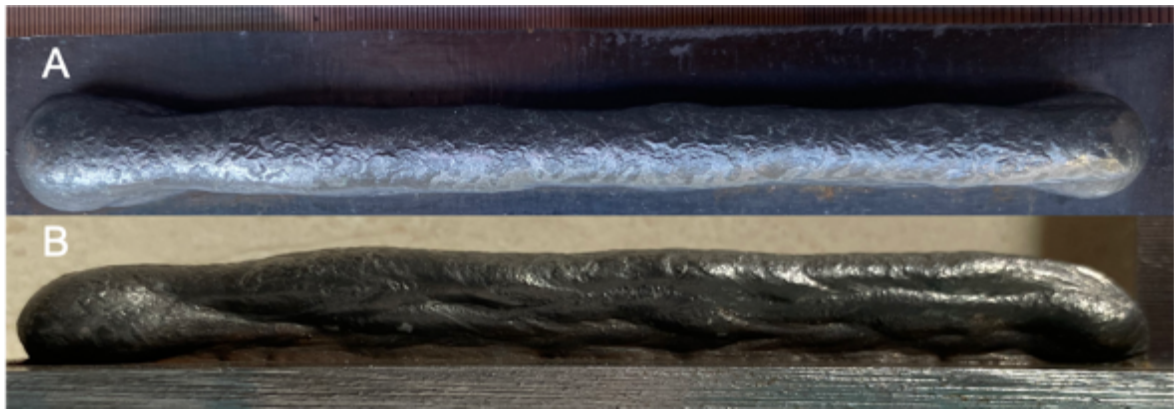


**Figura 49** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 5.2.

PAREDE 5.2												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	7,78	8,06	8,30	9,01	9,06	8,87	8,80	8,34	8,32	8,21	8,00	8,43
DP	0,07	0,08	0,03	0,08	0,05	0,05	0,09	0,02	0,06	0,06	0,03	0,06
LARGURA (mm)												
média	4,25	8,87	7,52	7,39	7,32	7,07	6,98	7,36	6,33	8,35	7,24	7,15
DP	0,01	0,07	0,01	0,02	0,04	0,04	0,06	0,03	0,01	0,02	0,06	0,03

**Tabela 14** – Medidas de altura e largura do Parede 5.2.

Para a Parede 5.3 (Figura 50), variando-se a altura por subida da tocha, a DBCP após o fim da deposição foi próxima a inicialmente estipulada de 12 mm, obtendo ao final do processo, um valor de aproximadamente 11 mm. Sua geometria foi similar a da Parede 5.2, com sua largura média sendo 0,49 mm maior (Tabela 15). Além disso, nesta deposição ocorreu o efeito de rebaixamento da parede comparando o início com o fim do caminho percorrido pela tocha, juntamente com um rebaixo acentuado logo no início do caminho sendo uma diferença de 22% na altura máxima e mínima. Lehmann et al. (2020) atribuíram esse efeito de rebaixamento ao acúmulo de calor no início da deposição, gerando um acúmulo de material nas extremidades da peça. Para reduzir este efeito, deve-se aumentar a velocidade de soldagem e/ou interromper o arco durante os passes, reduzindo assim o aporte térmico nas extremidades.

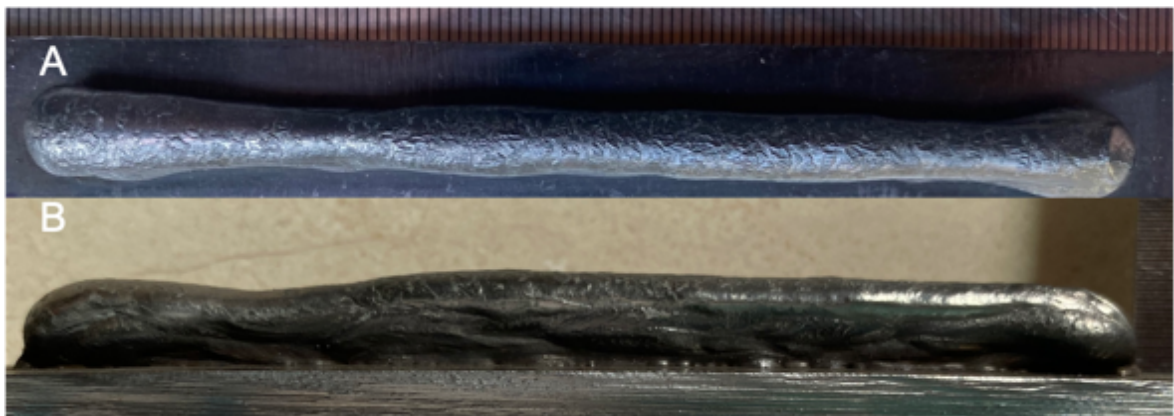


**Figura 50** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 5.3.

PAREDE 5.3												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	8,22	7,76	8,46	9,24	8,91	9,29	9,21	9,10	9,52	9,43	8,63	8,89
DP	0,04	0,08	0,09	0,09	0,09	0,04	0,07	0,03	0,09	0,08	0,06	0,07
LARGURA (mm)												
média	8,39	7,75	6,99	7,89	7,51	6,75	7,68	6,67	7,37	7,26	8,66	7,54
DP	0,05	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,06	0,37	0,02	0,02	0,04	0,06

**Tabela 15** – Medidas de altura e largura do Parede 5.3.

Com a Parede 5.4 (Figura 51), foi utilizado uma maior velocidade de deslocamento da tocha, diminuindo o aporte térmico no processo, conseqüentemente, gerando uma peça com redução de 13% na largura média, visto na Tabela 16. Sua geometria foi estável durante o processo, variando de forma clara, no mesmo local da parede 5.3. Por conta de sua geometria e menor aporte térmico, escolheu-se estes parâmetros para a deposição de 15 camadas.



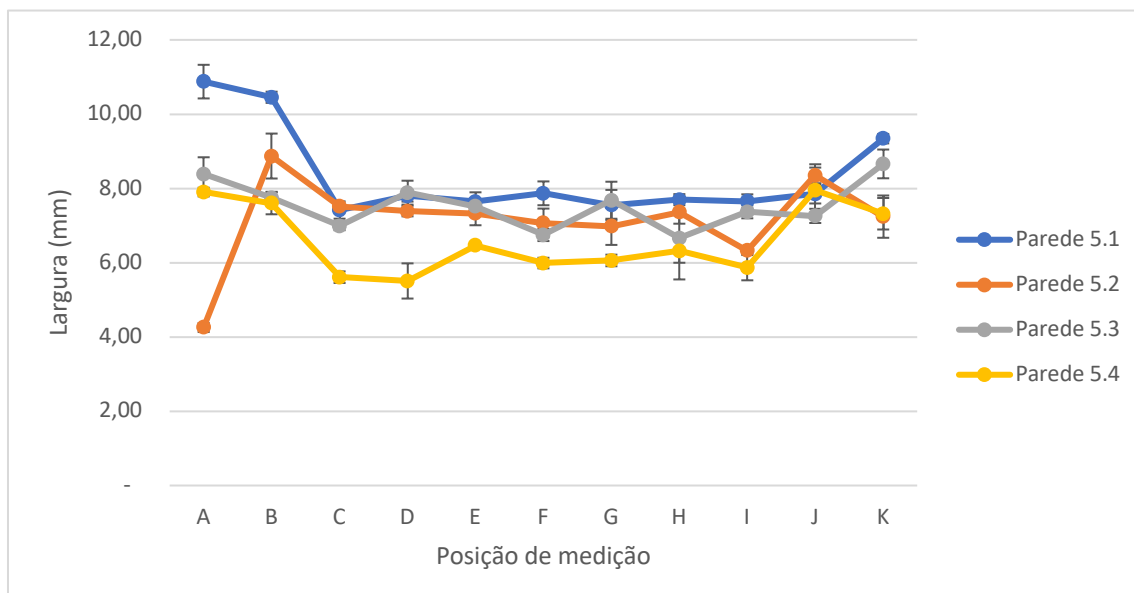
**Figura 51** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 5.4.

PAREDE 5.4												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	7,83	6,97	6,17	7,38	7,87	7,71	7,58	7,72	7,40	7,40	7,98	7,46
DP	0,04	0,08	0,08	0,05	0,07	0,07	0,03	0,04	0,07	0,09	0,02	0,06
LARGURA (mm)												
média	7,90	7,61	5,61	5,51	6,46	5,99	6,06	6,31	5,87	7,95	7,32	6,60
DP	0,01	0,03	0,02	0,05	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,08	0,05	0,03

**Tabela 16** – Medidas de altura e largura do Parede 5.4.

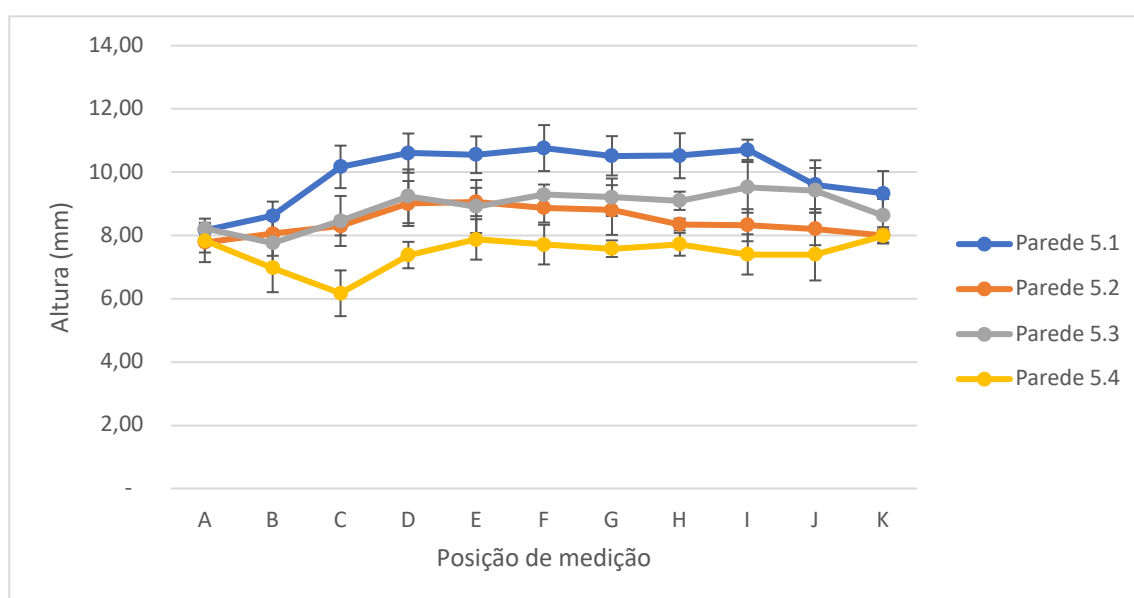
Na Figura 52, é possível verificar a variação obtida da largura medida das paredes depositadas com 5 camadas. Com isso é visto que o valor da largura se manteve constante, no geral, do ponto C ao I de medição, enquanto nas extremidades, por conta de efeitos da borda, ocorreram variações significativas. A parede que apresentou a menor largura foi a 5.4, enquanto a Parede 5.1, que utilizou dos parâmetros de deposição do Cordão 6, apresentou a maior largura. A Parede 5.2 e 5.3, mantiveram sua largura estável, porém na 5.2 houve uma variação expressiva entre o ponto A e B, fator que pode causar um

acúmulo elevado de calor, ocasionando escorregamento das camadas superiores no caso de deposições com mais camadas.



**Figura 52** - Largura das paredes de 5 camadas.

Em relação a altura houve uma diferença em relação aos resultados dos cordões e do trabalho de Bruno (2019), pois apesar da largura medida ser a maior na Parede 5.1, sua altura também foi significativamente maior que as outras deposições de 5 camadas. As paredes apresentaram boa estabilidade, com a menor variação em comparação com as paredes de 15 e 30 camadas. Na Parede 5.4 do ponto A ao C, houve uma diminuição da largura, juntamente com o rebaixo da parede, isso explica-se pelo valor de 6 mm/s de deslocamento da tocha, sendo muito elevado quando em comparação com 4 mm/s da parede 5.3, escolhida como melhor parâmetro. A Parede 5.3 também apresentou a menor variação de altura e largura entre as deposições de 5 camadas.



**Figura 53** – Altura das paredes de 5 camadas.

### 4.3 ANÁLISE DAS PAREDES DE 15 CAMADAS

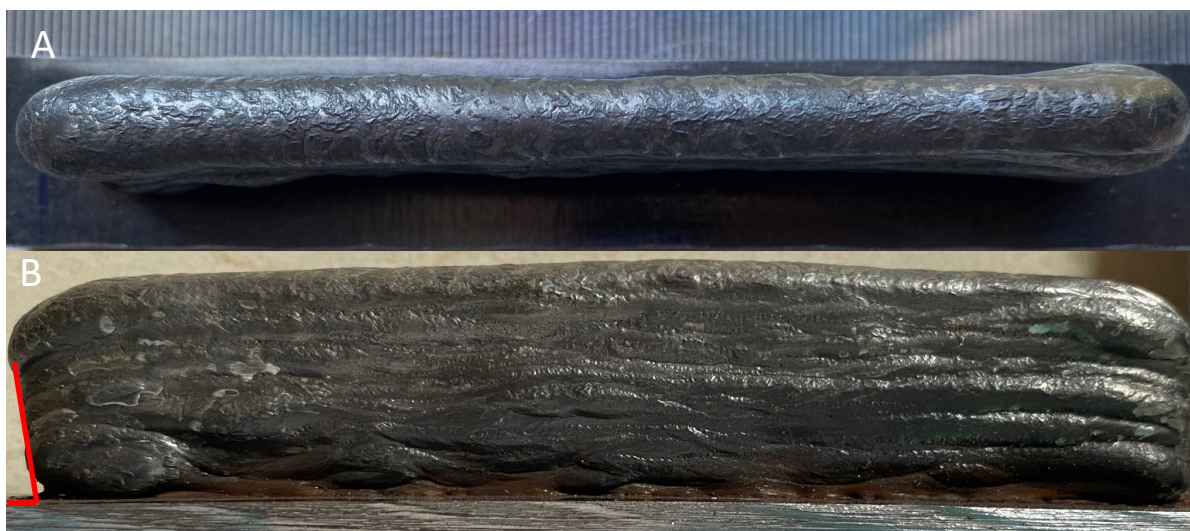
As peças com 15 camadas depositadas, também foram feitas com 100 mm de comprimento, em geral apresentaram qualidade superficial similar as peças de 5 camadas, com aparência rugosa, porém sem descontinuidades aparentes. Seus parâmetros podem ser verificados na Tabela 17.



Dados do experimento						
Parede	Vdt (mm/s)	Subida entre passes (mm)	DBCP após deposição (mm)	I (A)	U (V)	Va (m/min)
15.1	6,00	2,00	20,00	67,00	18,20	2,10
15.2	6,00	1,50	13,00	87,00	12,20	2,70

**Tabela 17** – Dados médios das deposições das paredes com 15 camadas.

Para a Parede 15.1, que utilizou dos parâmetros da Parede 5.3, foi obtido uma geometria constante, com bom acabamento, porém com altura desnivelada em mais de 10% do maior ponto ao menor (Tabela 18), devido a diferença de aporte térmico no ponto de início da deposição, para a posição final. Por conta deste mesmo efeito, foi possível observar uma maior largura no local correspondente a menor altura, fato explicado pelo maior tempo sob aplicação de calor, com o material por mais tempo com menor viscosidade. Além disso houve uma inclinação da parede na extremidade onde se iniciou o caminho da tocha (destacado na figura 54.B, com linhas vermelhas), este efeito foi observado por Corradi et al. (2020), descrevendo que a principal causa é a falta de apoio lateral à deposição, sendo possível o escorregamento da camada fundida, aumentando a largura e diminuindo a altura da deposição, além do maior acúmulo de calor quando comparado com as camadas inferiores, levando um tempo maior para se solidificar. Para isso pode se utilizar de métodos de resfriamento, maiores tempos de interpasso ou aumentando a velocidade de deslocamento, diminuindo a corrente.



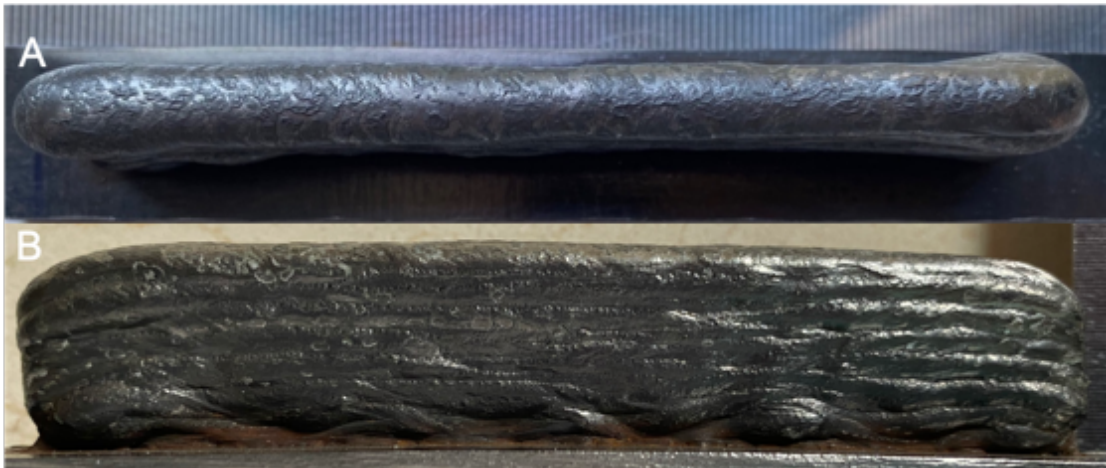
**Figura 54** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 15.1.

PAREDE 15.1												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	20,06	20,13	20,20	20,52	20,42	20,34	19,60	19,00	18,69	18,31	18,37	19,60
DP	0,14	0,17	0,10	0,09	0,13	0,20	0,21	0,19	0,20	0,26	0,13	0,49
LARGURA (mm)												
média	7,86	9,74	8,83	8,03	8,24	7,83	7,85	7,76	7,91	8,95	8,16	8,29
DP	0,16	0,22	0,09	0,04	0,05	0,12	0,07	0,16	0,28	0,09	0,14	0,13

**Tabela 18** – Medidas de altura e largura do Parede 15.1.

Já na Parede 15.2 variou-se a distancia de subida entre passes, a fim de se diminuir esse efeito de rebaixo e de maior largura em um ponto, por conta de aumentar a corrente e manter um DBCP mais próximo de 12 mm. Com isso verificou-se que a altura do cordão permaneceu mais constante, abaixo de 10% em sua extensão (Tabela 19), que na Parede 15.1, ou seja, menor variação na altura. Além disso a largura do cordão foi menor, gerando uma maior área efetiva, sendo, por essas características, o parâmetro escolhido para a deposição com 30 camadas, visto o menor aporte térmico no processo. Outro ponto observado na Figura 55 B, é ondulação na deposição, principalmente nas primeiras camadas

depositadas. Wu et al. (2019) também observaram esse efeito, explicado por uma baixa velocidade de soldagem, sendo completamente corrigido com o aumento deste parâmetro.

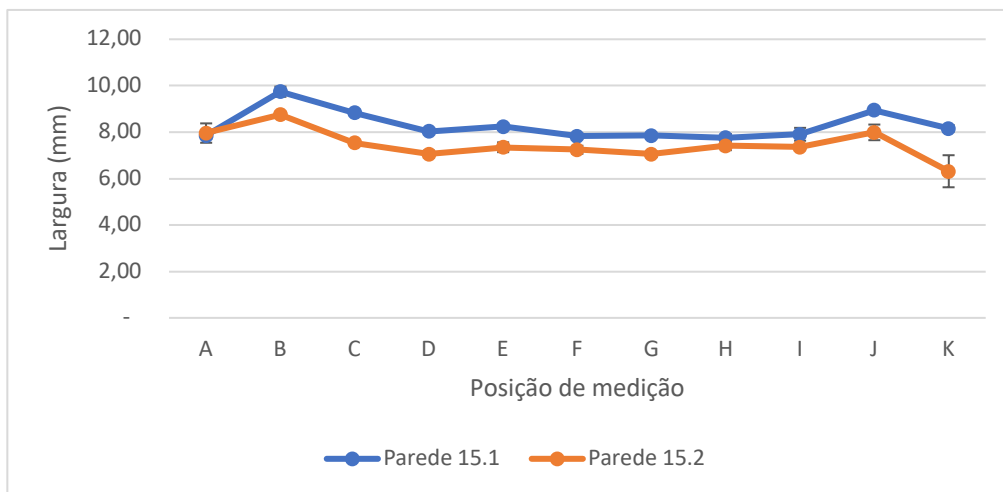


**Figura 55** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 15.2.

PAREDE 15.2												
ALTURA (mm)												Média das medições
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
média	19,08	18,64	18,91	18,81	18,60	18,58	18,62	18,41	18,12	18,07	18,15	18,55
DP	0,12	0,27	0,25	0,23	0,13	0,23	0,25	0,25	0,22	0,24	0,20	0,65
LARGURA (mm)												Média das medições
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
média	7,96	8,75	7,53	7,06	7,35	7,24	7,05	7,42	7,35	7,99	6,32	7,46
DP	0,14	0,02	0,01	0,05	0,07	0,06	0,04	0,07	0,03	0,11	0,23	0,07

**Tabela 19** – Medidas de altura e largura do Parede 15.2.

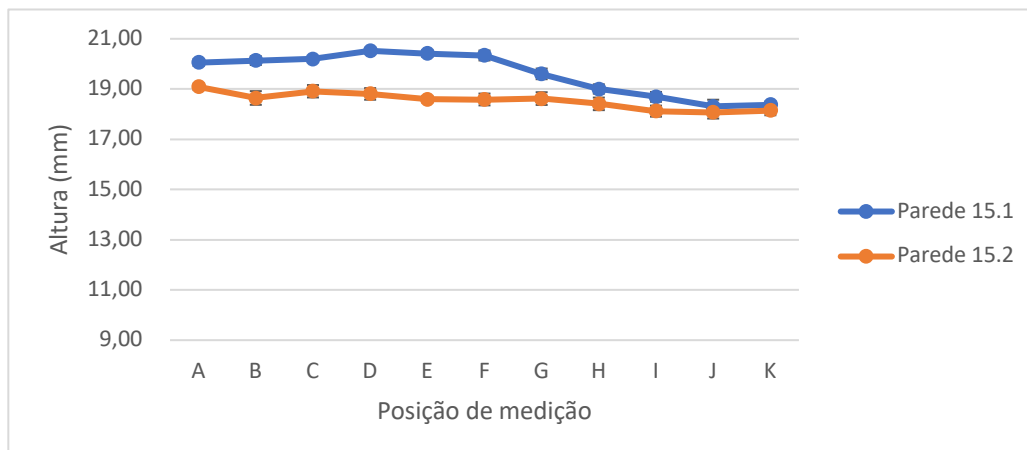
Com uma análise geral do processo, verificou-se que os valores de largura apresentaram variações semelhantes entre as paredes, com geometria estável, quando comparado com o estudo de Bruno (2019) que apresentou uma variação de até 29% nas peças depositadas. Apesar de similares, a parede 15.1 apresentou uma maior largura, com variações entre 0,34 mm e 1,84 mm, sendo este último valor na borda da parede. Essas variações e valores da largura das paredes de 15 camadas podem ser vistas na Figura 56.



**Figura 56** – Largura das paredes de 15 camadas.

Enquanto a largura não apresentou uma variação expressiva, a altura apresentou valores com variação de até 2 mm no centro da peça (Figura 57), local onde foram obtidos os picos de altura das paredes. A parede 15.1 apresentou maior altura quando comparado com a Parede 15.2, o que pode ter sido ocasionado pela maior distância DBCP durante o processo, diminuindo a densidade de energia concentrada em um ponto, pois o arco apresenta um maior diâmetro, aumentando a dispersão do calor.

Além disso a Parede 15.1 apresentou a maior variação da altura entre a medição na borda e no centro da peça, com diferença de 10%, enquanto na Parede 15.2 a maior variação foi de 5%.



**Figura 57** – Altura das paredes de 15 camadas.

#### 4.4 ANÁLISE DAS PEÇAS DE 30 CAMADAS

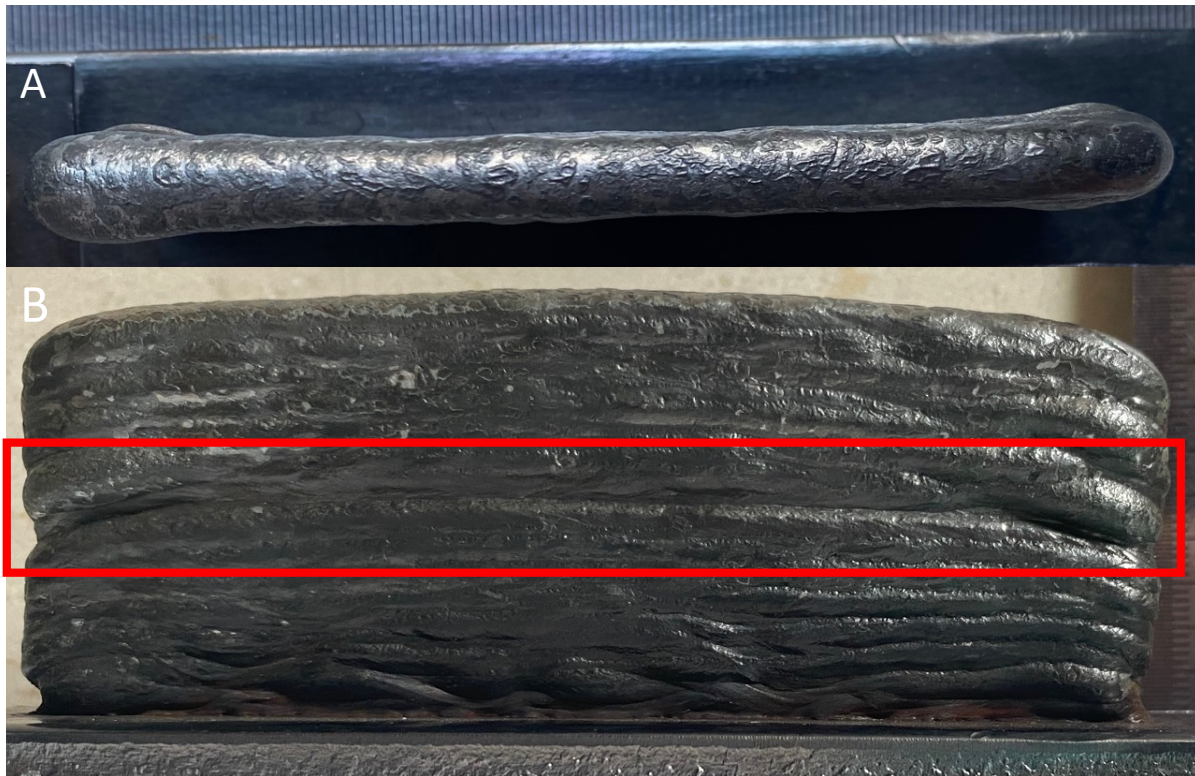
##### 4.4.1 Parede De 30 Camadas Sem Arco Interrompido

O comprimento das paredes se manteve em 100 mm, sendo possível verificar a interferência da variação da quantidade de camadas na geometria depositada. Também foi feito a comparação com a deposição contínua e em blocos de 15 camadas, obtendo com isso variações de geometrias na peça depositada. Os parâmetros utilizados (Tabela 20) foram o da Parede 15.2 para ambas peças, padronizando, então, os testes.

Dados do experimento						
Parede	Vdt (mm/s)	Subida entre passes (mm)	DBCP após deposição (mm)	I (A)	U (V)	Va (m/min)
30.1	6,00	1,50	15,00	112,00	11,60	3,00
30.2	6,00	1,50	14,00	97,00	12,40	3,00

**Tabela 20** – Dados médios das deposições das paredes com 30 camadas.

A Parede 30.1 apresentou as mesmas características da Parede 30.2, até o termino do primeiro bloco de deposição. Após isso, foi criado uma região de menor espessura, ocasionada pelo resfriamento mais rápido no local, devido a menor temperatura, quando comparado com as camadas sobrepostas. No segundo bloco de deposição, foi obtido uma geometria similar a Parede 15.2, em relação a sua altura, foi produzido um efeito de arco, com o centro mais elevado que as bordas em 9% (Tabela 21), efeito que não ocorreu nas outras deposições. Na camada onde houve o resfriamento da parede para, depois continuar a deposição, é possível ver a menor largura do cordão formando uma divisória entre primeiro e segundo bloco (em destaque na Figura 58. Essa redução na largura efetiva, e conseqüentemente na área efetiva, foi minimizada por Lehmann et al. (2020), que estudaram o efeito da temperatura interpasse na deposição de aço ER70S-6 no processo CMT, com isso foi visto que quanto menor a temperatura de interpasse, menor foi a redução da área efetiva, porém sendo necessário um equilíbrio entre o tempo total de soldagem com a temperatura de interpasse, que pode ser reduzido caso haja uma forma de resfriamento ativa.

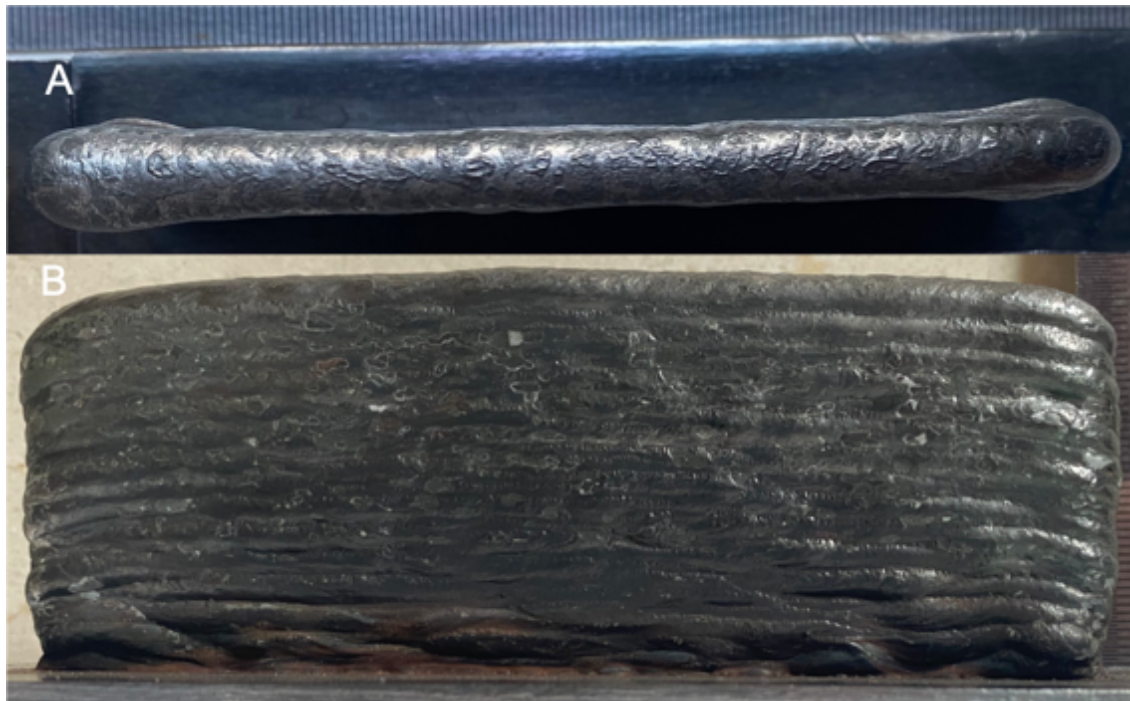


**Figura 58** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 30.1.

PAREDE 30.1												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	36,17	36,37	37,00	37,68	38,17	38,30	38,14	37,95	37,38	36,59	35,06	37,16
DP	0,25	0,18	0,11	0,24	0,23	0,20	0,18	0,33	0,23	0,37	0,10	0,66
LARGURA (mm)												
média	9,05	9,62	8,94	8,72	7,55	8,55	7,98	9,07	8,57	9,85	8,40	8,76
DP	0,16	0,12	0,07	0,05	0,13	0,05	0,07	0,11	0,13	0,08	0,10	0,10

**Tabela 21** - Medidas de altura e largura do Parede 30.1.

A Parede 30.2, depositada de forma contínua, apresentou geometria regular e sem a presença de discontinuidades. Em relação a sua largura, foi visto uma menor variação na largura em relação a Parede 15.2 e menor valor sendo de  $8,42 \pm 0,10$  mm (Tabela 22), devido a melhor distribuição de calor, evitando o acúmulo excessivo de material em apenas uma região. Essas características geraram um maior valor de largura efetiva do material, pois se faz necessário uma menor retirada de material para chegar na geometria final, quando comparado com peças com maior variação de dimensões. Foi possível verificar que a estabilidade na geometria do cordão iniciou após a 4 camada de deposição.

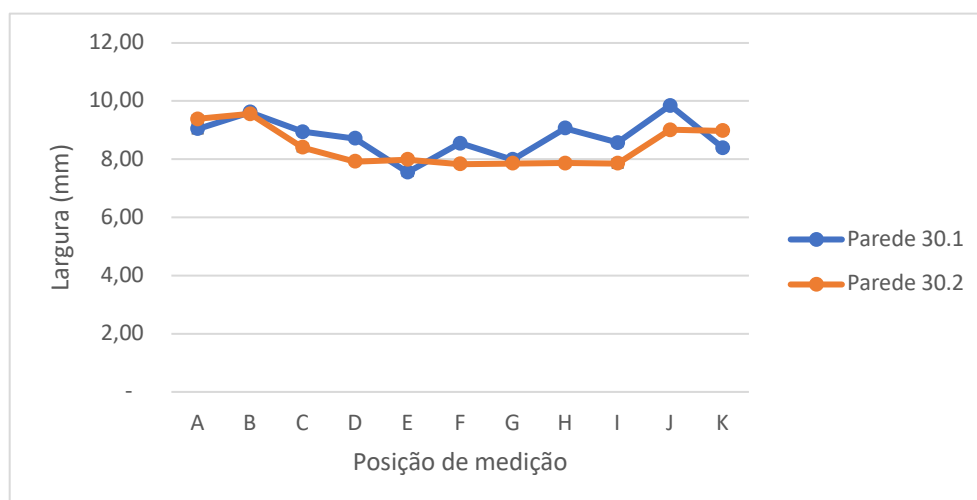


**Figura 59** – Vista superior (A) e lateral (B) da Parede 30.2.

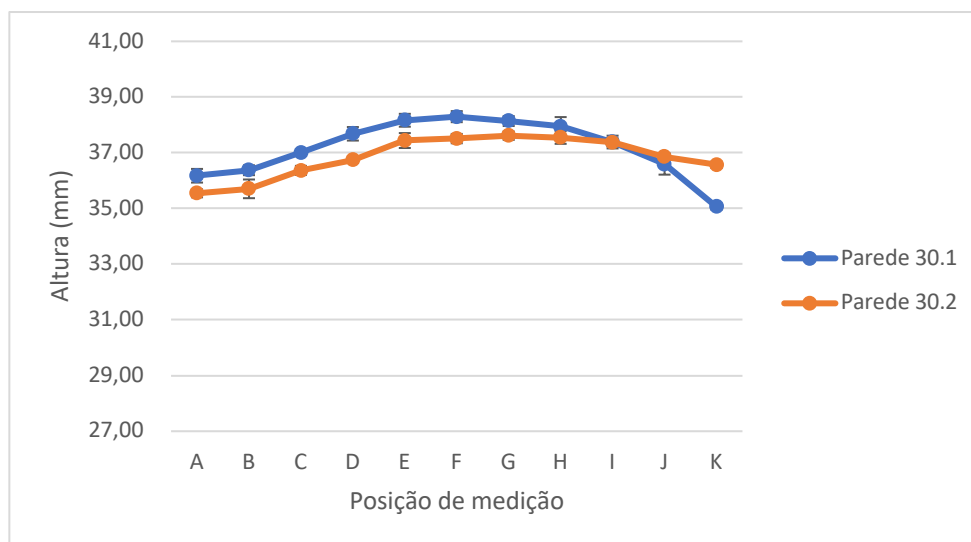
PAREDE 30.2												
ALTURA (mm)												Média das medições
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
média	35,54	35,70	36,37	36,74	37,44	37,51	37,61	37,55	37,37	36,85	36,56	36,84
DP	0,14	0,34	0,16	0,11	0,27	0,17	0,15	0,23	0,14	0,12	0,11	0,53
LARGURA (mm)												Média das medições
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
média	9,39	9,56	8,40	7,92	7,99	7,83	7,86	7,86	7,86	9,01	8,98	8,42
DP	0,12	0,10	0,13	0,08	0,07	0,10	0,10	0,05	0,15	0,05	0,11	0,10

**Tabela 21** – Medidas de altura e largura do Parede 30.2.

A variação de largura entre as paredes de 30 camadas (Figura 60), não foi relevante, apresentando valores dentro da faixa de 8 a 10 mm, nessa faixa a Parede 30.1 apresentou valores menores de largura apenas no ponto A, E e K, sendo equivalente no ponto G com a Parede 30.2. Já em relação a altura, a variação entre a Parede 30.1 e 30.2 foi maior, sendo obtido uma altura reduzida nas bordas da peça, devido ao escorregamento de material por conta de ser o local onde a tocha mantém o aporte térmico por mais tempo. No centro das peças a Parede 30.1 apresentou uma maior altura, com valores acima de 38 mm, enquanto a Parede 30.2 teve seu pico em 37,61 mm, porém esta apresentou menor variação de altura em toda a peça, com a Parede 30.1 tendo aproximadamente 9% de variação entre seu valor máximo e mínimo. Essa comparação entre as alturas pode ser verificada na Figura 61.



**Figura 60**– Largura das paredes de 30 camadas.



**Figura 61** – Altura das paredes de 30 camadas.

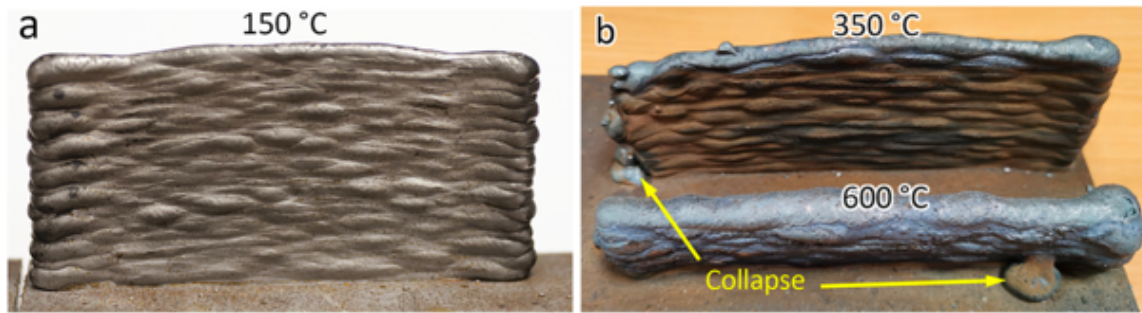
Outro fator analisado é a comparação entre a energia consumida no processo de soldagem CMT, quando comparado com processo convencional GMAW utilizado por Santos (2013), que em seu estudo obteve uma média de 22,3 kJ/mm, enquanto utilizando o CMT a média de todas as deposições foi de 14,12 kJ/mm, correspondendo a uma diminuição de, aproximadamente, 37%. Esses valores podem ser divididos em cada uma das deposições sendo de 17,7 kJ/mm para cordões simples, 12,75 kJ/mm para 5 camadas, 7,98 kJ/mm para 15 camadas depositadas e 8,76 kJ/mm para as paredes de 30 camadas. Portanto além de um menor consumo de energia, é possível constatar que o processo CMT necessita de um menor aporte térmico para realizar a deposição, diminuindo com isso o calor acumulado entre as camadas depositadas, sendo mais aconselhável para deposições, especialmente de multicamadas, quando comparado com o processo GMAW convencional. Essas características permitem a deposição mais uniforme e constante das paredes, pois o material se solidifica mais rápido que em processos de GMAW convencionais, além de evitar a possibilidade de colapso da parede depositada. Esses valores de energia aportada foram divididos por deposição na Tabela 23.

Deposições	Cordões simples	Parede de 5 camadas	Parede de 15 Camadas	Parede de 30 Camadas	Média das deposições por CMT	Média do GMAW convencional (Santos, 2018)
Energia de soldagem (kJ/mm)	17,70	12,75	7,98	8,76	14,12	22,30

**Tabela 23** – Média da energia de soldagem por deposição CMT e GMAW.

#### 4.4.2 Parede De 30 Camadas Com Arco Interrompido

Na Figura 62, pode ser visto a que a parede depositada foi linear em sua altura, além de constante, com variações abaixo de 15% em sua extensão. Outra característica que foi presente na deposição com controle da temperatura, foi a inclinação das laterais da parede, possivelmente causado pelo reinício da máquina a cada passe de deposição. A temperatura de interpasse apresenta uma melhora na altura, largura e área efetiva da peça depositada, porém, como estudado por Zhai et al. (2022), o contraponto a utilização da temperatura de interpasse é o tempo que se leva a chegar no valor determinado. Porém no caso de peças de grandes dimensões, o tempo de percurso da tocha, já se faz suficiente para promover o resfriamento da peça, um exemplo é a fabricação de pontes por WAAM da empresa MX3D. Estes autores também utilizaram do processo CMT para deposição, porém variando a temperatura de interpasse de 150 °C, 350 °C e 600 °C, obtendo as paredes vistas na Figura 62, nas quais utilizando a temperatura de 150 °C foi possível obter uma parede sem colapso, porém com ondulações, já para temperaturas mais elevadas houve o colapso da parede, unido com a redução da altura e maior largura.



**Figura 62** – Parede depositada com temperatura de interpasse de a) 150 °C e b) 300 °C e 600 °C (Adaptado de ZHAI et al., 2022)

Para a análise da influência da temperatura de interpasse, utilizando de uma temperatura de 45 °C a 55 °C, ou seja, a temperatura ambiente, foi visto um aumento de aproximadamente 24% (Tabela 24) em relação a Parede 30.1 e 25% (Tabela 21) em relação a Parede 30.2 (Tabela 22), partindo de uma média de 37,16 mm para 45,88 mm. Portanto um dos fatores alterados por conta da temperatura de interpasse foi a altura média obtida, sendo maior que nas deposições anteriores. Na largura, foi verificado um fenômeno contrário, visto que a mesma foi de  $6,16 \pm 0,08$  mm de média, enquanto nas paredes de 30 camadas foi de  $8,76 \pm 0,10$  mm e  $8,42 \pm 0,10$  mm, respectivamente. Ou seja, a temperatura de interpasse provocou uma redução de aproximadamente 30% na largura da parede quando comparado com a deposição contínua sem controle de temperatura. Nas bordas foi possível observar um efeito de “união” da camada inferior com a seguinte, como se as duas estivessem formando uma, esse efeito ocorre pela rápida solidificação do material na abertura do arco quando o material ainda está frio, impossibilitando o escorregamento do material no sentido de deslocamento da tocha. Muitas vezes esse efeito é seguido por uma redução na largura logo após esse início, formando um “empescoçamento” da parede.



**Figura 63** - Vista superior (A) e lateral (B) da parede com temperatura de interpasse controlada.

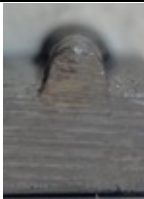





PAREDE 30.2												
ALTURA (mm)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Média das medições
média	42,94	44,59	45,84	46,32	46,48	46,53	46,76	46,62	46,56	46,55	45,48	45,88
DP	0,55	0,32	0,08	0,12	0,22	0,17	0,13	0,15	0,19	0,10	0,09	0,19
LARGURA (mm)												
média	7,49	5,61	6,12	5,98	5,89	5,81	5,92	5,78	6,05	5,90	7,23	6,16
DP	0,94	0,22	0,18	0,08	0,06	0,11	0,09	0,06	0,15	0,41	0,13	0,08

**Tabela 24** – Medidas de altura e largura da parede com temperatura de interpasse controlada.

#### 4.5 ANÁLISE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS DEPOSIÇÕES

Após as medições dos cordões, foi feito o corte no ponto médio dos cordões e paredes para se evitar defeitos de borda, podendo então ser analisado sua altura e largura, assim como a largura efetiva e área efetiva, visto que essa característica que contribui para um maior aproveitamento de material.





Como o cordão 4 apresentou humping de forma a não ter continuidade no cordão, não foi feito seu corte, visto que cada gota depositada tinha variações significativas dimensionais e geométricas entre elas. Para os cordões simples, o ângulo de molhamento deve se aproximar de 90° para que se tenha uma deposição em camadas estável, tendo o valor mais próximo no Cordão 6. Em contrapartida os cordões 3 e 7 apresentaram valores mais distantes, sendo o 3 ocasionado por elevado aporte térmico, causando uma maior fluidez no material, fazendo com que o metal escoe por mais tempo no substrato até a sua solidificação. Já no caso do Cordão 7, o aporte térmico foi mais baixo gerando um maior ângulo de molhamento, com uma superfície convexa. Essa relação de energia aplicada e ângulo de molhamento foi explicado por Nunes et al. (2015). As imagens do corte e suas respectivas medidas podem ser vistas na Tabela 25.

Seção dos cordões simples			
	Reforço: 3,03 mm Largura: 4,81 mm $\theta$ : 69,73°		Reforço: 3,05 mm Largura: 7,43 mm $\theta$ : 78,20°
Cordão 1		Cordão 2	
	Reforço: 3,14 mm Largura: 7,26 mm $\theta$ : 58,46°		Reforço: 3,07 mm Largura: 4,16 mm $\theta$ : 52,20°
Cordão 3		Cordão 5	
	Reforço: 3,67 mm Largura: 4,68 mm $\theta$ : 80,95°		Reforço: 4,08 mm Largura: 6,51 mm $\theta$ : 120,52°
Cordão 6		Cordão 7	

**Tabela 25** - Imagens e valores das seções transversais dos cordões simples.



Para as paredes de 5 camadas (Tabela 26) a 5.1 apresentou a maior área entre as amostras, sendo possível visualizar a diferença obtida com o aumento da velocidade de deslocamento da tocha no caso da Parede 5.2. A Parede 5.1 apresentou uma diferença significativa na altura entre o início, mais baixo, e o meio com uma altura maior, isso explica o fato de apesar de ser a amostra mais alta, também apresentou a maior largura efetiva. Já as deposições 5.2 e 5.3 foram bastante similares, com menos de 3% de diferença em sua área efetiva, diferente da Parede 5.4 com a menor área efetiva entre as paredes, ocasionado pela maior velocidade de soldagem entre as paredes de 5 camadas.



Seção das paredes de 5 camadas			
 <p>Parede 5.1</p>	<p>Altura: 11,30 mm Largura total: 7,92 mm Largura efetiva: 5,51 mm Área efetiva: 62,26 mm<sup>2</sup> Razão: 83%</p>	 <p>Parede 5.2</p>	<p>Altura: 9,25 mm Largura total: 6,86 mm Largura efetiva: 4,65 mm Área efetiva: 43,01 mm<sup>2</sup> Razão: 83%</p>
 <p>Parede 5.3</p>	<p>Altura: 9,12 mm Largura total: 6,58 mm Largura efetiva: 4,59 mm Área efetiva: 41,86 mm<sup>2</sup> Razão: 87%</p>	 <p>Parede 5.4</p>	<p>Altura: 7,99 mm Largura total: 5,55 mm Largura efetiva: 3,81 mm Área efetiva: 30,44 mm<sup>2</sup> Razão: 82%</p>

**Tabela 26** – Imagens e valores das seções transversais das paredes com 5 camadas.




As deposições com 15 camadas apesar de apresentarem área efetiva similares, é visível a diferença na retidão do cordão na Tabela 27, com a Parede 15.1 apresentando menor variação durante a deposição, sendo preferível na manufatura aditiva, visto que em mais camadas podem acabar ocasionando escorregamento das camadas superiores, ou até mesmo o colapso da parede, esse fenômeno também ocorreu com Arana et al. (2022), que apesar de estar depositando alumínio 2319, também verificaram a diferença na linearidade da parede depositada. Esta variação pode ser explicada pelo maior aporte térmico na amostra 15.2, ocasionando um maior acúmulo de calor e menor viscosidade da camada anterior, não suportando as camadas superiores e causando escorregamento.

Seção das paredes de 15 camadas			
 <p>Parede 15.1</p>	<p>Altura: 19,15 mm Largura total: 7,31 mm Largura efetiva: 4,80 mm Área efetiva: 91,92 mm<sup>2</sup> Razão: 82%</p>	 <p>Parede 15.2</p>	<p>Altura: 20,44 mm Largura total: 6,81 mm Largura efetiva: 5,35 mm Área efetiva: 109,36 mm<sup>2</sup> Razão: 87%</p>

**Tabela 27** – Imagens e valores das seções transversais das paredes com 15 camadas.

As paredes de 30 camadas utilizaram dos mesmos parâmetros de deposição, porém é possível verificar a diferença na largura e altura da parede que teve a interrupção do arco após 15 camadas, sendo o responsável pela maior altura e área efetiva da amostra, visto na Tabela 28. Como foi verificado no corte transversal, a área efetiva foi aumentada em 6% consequência do aumento de 0,61 mm na altura e menor variação da largura entre camadas depositadas. Já na parede com controle de interpasse, foi visto uma irregularidade nas primeiras deposições, podendo ser posteriormente retirado por processos de usinagem caso necessário. Essa irregularidade pode ter sido provocada pela variação no referencial da

máquina no momento de parada e retomada da deposição entre camadas. Outro ponto de diferença entre a Parede 30.1 e com interrupção, é a redução do efeito da camada média (15ª camada), que na deposição em blocos correspondeu a uma redução na área efetiva, por reduzir a largura efetiva. Esse efeito diminuiu na peça com temperatura de interpasse controlada, pois a cada camada, a peça era resfriada, portanto não houve um acúmulo de calor das camadas superiores para as inferiores, que causou a visível diferença de largura na Parede 30.1.

Seção das paredes de 30 camadas		
		
Parede 30.1	Parede 30.2	Parede com Temp. Inter.
<p>Altura: 38,77 mm  Largura total: 7,46 mm  Largura efetiva: 4,75 mm  Área efetiva: 184,16 mm<sup>2</sup>  Razão: 80%</p>	<p>Altura: 38,16 mm  Largura total: 7,72 mm  Largura efetiva: 4,71 mm  Área efetiva: 179,73 mm<sup>2</sup>  Razão: 72%</p>	<p>Altura: 45,49 mm  Largura total: 5,12 mm  Largura efetiva: 4,65 mm  Área efetiva: 195,88 mm<sup>2</sup>  Razão: 86%</p>

**Tabela 28** – Imagens e valores das seções transversais das paredes com 30 camadas.

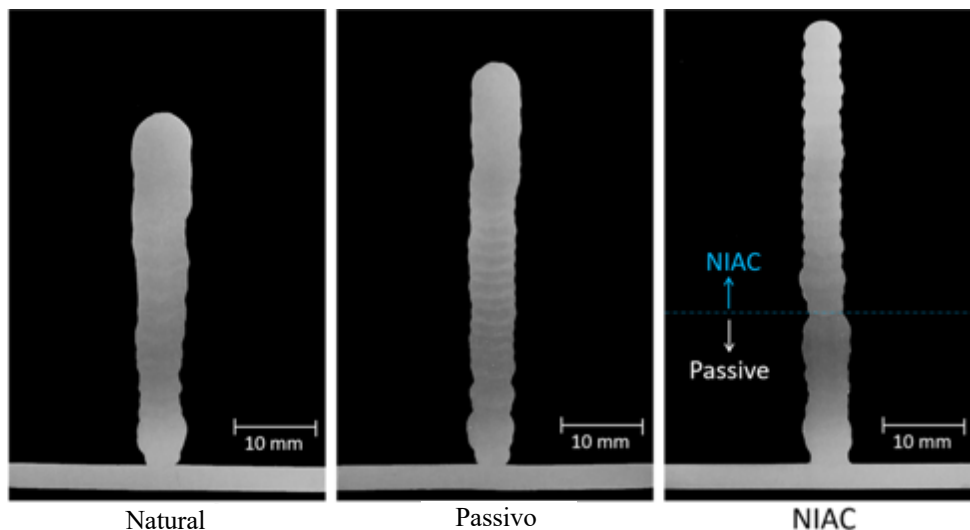
Também é possível comparar a deposição utilizando o método CMT com o GMAW convencional feito por Santos (2018), com o mesmo aço 410 NiMo, sendo visível a diferença na estabilidade e linearidade da deposição, sendo o CMT mais retilíneo e constante quando comparado com o método

utilizado por Santos em 2018, que variou a temperatura interpasse de 150° a 200° e a temperatura de pré-aquecimento do material de base de 100° a 200° (Figura 64).



**Figura 64** – Deposições obtidas por GMAW convencional (SANTOS, 2018).

Como estudado por Zhai et al. (2022) o controle de temperatura de interpasse favorece a fabricação de peças mais estáveis e lineares, porém com um tempo maior de produção, isto ocorreu na deposição das 30 camadas com temperatura controlada, levando aproximadamente 4 h para depositá-las, visto que foi utilizado o ar para resfriamento, ou seja um método natural que teve um tempo de espera entre deposições de 8 min em média. Por isso Da Silva et al. (2020) desenvolveram um método de resfriamento ativo utilizando uma cuba com água que eleva seu nível de acordo com o aumento de altura da parede a cada camada depositada, chamado de *near-immersion active cooling* (NIAC). Com isso obtiveram paredes lineares, sem tempo de espera entre uma camada e a seguinte, depositando 29 camadas em 11 min, o que corresponde a menos de 5% do tempo gasto com resfriamento ao ar.



**Figura 65** – Deposições de 29 camadas utilizando resfriamento natural, passivo e NIAC (Adaptado de DA SILVA et al., 2020)

## 5 CONCLUSÕES

Com o objetivo de se analisar as influências dos parâmetros de deposição no processo CMT convencional na manufatura aditiva por deposição a arco da liga 410 NiMo, foram depositados 4 grupos, um de cordão simples e 3 deposições em camadas. Foram feitas as análises geométricas em toda extensão e na seção média das deposições, fazendo a relação dos parâmetros utilizados com os resultados obtidos. Com isso foram obtidas as seguintes conclusões:

i. Algumas paredes e cordões depositados apresentaram cratera de rechupe, porém sendo apenas superficial. Também foi possível obter deposições livres de defeito de aço inoxidável sobre um substrato de aço carbono.

ii. Nos cordões simples foi observado o efeito de *humping* para o que utilizou de uma velocidade de alimentação no arame de 1,7 m/min e 3 m/min, quando utilizado uma velocidade de deslocamento da tocha de 5 mm/s. O efeito de *pré-humping* localizado apenas ao fim da deposição, ocorreu quando utilizado uma velocidade de alimentação de 1,8 m/min com uma velocidade de deslocamento da tocha 25% menor.

iii. Para os cordões simples dentre as 7 deposições, a com melhor geometria foi a que utilizou de 3 mm/s de velocidade de deslocamento da tocha, 97 A de corrente, 12,10 V de tensão e 1,8 m/min para velocidade de alimentação da tocha. Sua geometria da seção transversal, no ponto médio do cordão, apresentou o ângulo de molhamento mais próximo de 90°, com seu reforço 16% maior que o segundo maior reforço.

iv. Com as paredes de 5 camadas foi verificado que uma velocidade de deslocamento da tocha de 6 mm/s, apresentou uma redução da largura do cordão de 22% quando comparado com uma velocidade de 3 mm/s, além disso a subida entre passes que apresentou melhor geometria do cordão foi com 2 mm, reduzindo o efeito de borda com valores de até 10,88±0,05 mm para 7,90±0,01 mm.

v. A distância de subida entre passes foi um dos fatores críticos para se controlar a linearidade e uma geometria constante das paredes, visto que a mesma altera o aporte térmico acumulado entre os passes das deposições, fato que ficou evidente nas paredes com 15 camadas, reduzindo a angulação na borda da deposição.

vi. A deposição com interrupção do arco e temperatura de interpasse de 100°C apresentou uma altura 1,6% maior que a de arco contínuo, porém apresentou uma camada com largura reduzida por conta do resfriamento da peça, gerando uma região sem acúmulo de calor das anteriores, reduzindo assim a área efetiva que poderia ser obtida caso essa interface apresentasse uma variação menos brusca em sua largura por conta da diferença de temperatura.

vii. A parede com controle de temperatura de interpasse apresentou a maior área efetiva entre as deposições com 195,88 mm<sup>2</sup>, além de uma razão de 86% entre a área total e área efetiva, tendo o maior aproveitamento de material, por precisar de menos usinagem para chegar a geometria final. Além disso a temperatura de resfriamento próxima do ambiente resultou em um cordão linear, altura 25% maior e largura de 6,16±0,08 mm de média enquanto as outras paredes de 30 camadas apresentaram 8,76±0,10 mm e 8,42±0,10 mm, respectivamente.

viii. A energia utilizada para realizar o processo de soldagem por CMT foi 37% menor que em GMAW convencional, além de paredes mais lineares e constantes, podendo ser utilizado como processo alternativo ao convencional.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como indicações para trabalhos futuros para temas relacionados, podem-se incluir:

- Análise da microestrutura obtida com relação aos parâmetros de deposição utilizados;
- Verificar a influência de diferentes temperaturas de interpasse e sua interferência na geometria obtida, assim como temperaturas de pré aquecimento do material de base;
- Estudo de dureza, resistência a tração e fadiga das peças, a fim de analisar a utilização do método e material para aplicações na indústria dos mesmos;

- Analisar a influência de diferentes angulações da tocha e do substrato, a fim de depositar paredes com variadas geometrias e angulações;
- Estudo com deposições sobre chapa de aço inoxidável, visto que foi utilizado aço carbono e pode causar descontinuidades devido a diferenças de propriedades entre os materiais;
- Utilização de deposição unidirecional e sua comparação com a bidirecional;
- Análise da utilização de processos de usinagem para melhorar o acabamento superficial das peças obtidas;
- Estudo é a deposição de peças nas dimensões finais de utilização, sendo analisado a viabilidade da utilização do método CMT para manufatura das peças de aço 410 NiMo em larga escala.

## 6 REFERÊNCIAS

Os estudos feitos utilizaram de 86 referências sendo divididas em:

- Revistas: 50 (58%)
- Livros: 4 (5%)
- Congressos: 6 (7%)
- Teses, dissertações e monografias: 9 (11%)
- Normas: 3 (4%)
- Outros (catálogos, manuais, apostilas, sites): 14 (15%)

ANO	Até 2000	2001-2010	2011-2017	2018	2019	2020	2021	2022
FONTES	1	9	15	12	14	17	8	10

Airbus. 2021. “Large-scale 3D printing goes to space on Airbus’ Eurostar Neo satellites”. Disponível em <<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-02-large-scale-3d-printing-goes-to-space-on-airbus-eurostar-neo-satellites>>. Acessado em 16 de março de 2022.

Aldaca, I., Briz, E., Garcia, H. e Matanza, A. 2020. “The Weldability of Duplex Stainless-Steel in Structural Components to Withstand Corrosive Marine Enviroments”. Metals. <https://doi.org/10.3390/met10111475>.

Ali, Y., Henckell, P., Hildebrand, J., Reimann, J., Bergmann, J. e Barnikol-Oettler, S. 2019. “Wire Arc Additive Manufacturing of Hot Work Tool Steel with CMT Process”. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 269, p. 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>.

Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Aguliar, D. e Alvares, P. 2022. “Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminium WAAM components”. Materials & design, Vol. 221, 110974. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110974>.

ASME B31.3. 2018. Process Piping – ASME Code for Pressure Piping. International Piping Code, p. 82.

Bruno, J.M. 2019. “WAAM processing of AISI 410 stainless steel for part building”. Tese de mestrado em engenharia mecânica- Técnico Lisboa. Disponível em <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/memec/dissertacao/565303595502599>>. Acessado em 28 de março de 2022.

Butt, J. 2020. “Exploring the Interrelationship between Additive Manufacturing and Industry 4.0”. Designs, Vol. 4. <https://doi.org/10.3390/designs4020013>.

Chaudhari, R., Parmar, H., Vora, J. e Patel, V. 2022. “Parametric Study and Investigations of Bead Geometries of GMAW-Based Wire–Arc Additive Manufacturing of 316L Stainless Steels”. Metals, Vol. 12(7). <https://doi.org/10.3390/met12071232>.

Chen, N., Ma, G., Zhu, W., Godfrey, A., Shen, Z., Wu, G. e Huang, X. 2019. “Enhancement of an additive-manufactured austenitic stainless steel by post-manufacture heat-treatment”. Materials Science and Engineering, vol. 759. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.111>.

Chen, X., Su, C., Wang, Y., Siddiquee, A., Sergey, K., Jayalakshmi, S. e Singh, A. 2018. “Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System”. *Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques*, Vol. 12, No. 6. <https://doi.org/10.1134/S102745101901004X>.

Chuaiphan, W. e Srijaroenpramong, L. 2020. “Optimization of TIG welding parameter in dissimilar joints of low nickel stainless steel AISI 205 and AISI 216”. *Journal of Manufacturing Processes*, p. 163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.052>.

Cornacchia, G., Cecchel, S., Panvini, A. 2017. “A comparative study of mechanical properties of metal inert gas (MIG)-cold metal transfer (CMT) and fiber laser-MIG hybrid welds for 6005A T6 extruded sheet”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, p. 2017-2030. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0914-9>.

Corradi, D., Bracarense, A., Wu, B., Cuiuri, D., Pan, Z. e Li, H. 2020. “Effect of Magnetic Arc Oscillation on the geometry of single-pass multi-layer walls and the process stability in wire and arc additive manufacturing”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 283, 116723. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116723>.

Cunningham, C.R., Dhokia, V., Shokrani, A. e Newman, S.T. 2021. “Effects of in-process LN2 cooling on the microstructure and mechanical properties of type 316L stainless steel produced by wire arc directed energy deposition”. *Materials Letters*, vol. 282, 128707. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128707>.

Ding, D., Pan, Z., Cuiuru, D. e Li, H. 2015. “Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests”. *International Journal of Additive Manufacturing Technologies*, Vol. 81, p. 465-481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.

Divya, M., Das, C., Albert, S., Ramasubbu, V., Bhaduri, A. e Sivaraman, P. 2011. “In-situ Weld Repair of Cracked Shrouds of Turbine and Characterization of The Weld Joint”. *Indian Welding Journal*, vol. 44. <https://doi.org/10.22486/iwj.v44i1.177937>.

Dramicanin, M., Balos, S., Janjatovic, P., Zabunov, I. e Grabulov, V. 2019. “Activated flux tig welding of stainless-steel pipes”. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, p. 353-360. <https://doi.org/10.2298/CICEQ181229013D>.

Duvoisin, C. e Horst, D. 2018. “Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review”. *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 8, p. 2454-4698, n. 8. ISSN: 2321-0869

Elmer, J., Vaja, J., Carpenter, J., Coughlin, D., Dornak, M., Hochanadel, P., Gurung, P., Johnson, A. e Gibbs, G. 2020. “Wire-Based Additive Manufacturing of Stainless Steel Components”. *Welding Journal*, Vol. 99. <https://doi.org/10.29391/2020.99.002>.

ESAB. 2019. Catálogo de consumíveis: Produtos especiais. Disponível em: <[https://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-inox-produtos\\_especiais\\_rev1.pdf](https://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-inox-produtos_especiais_rev1.pdf)>. Acessado em: 25 de abril de 2022.

ESAB. 2022. “Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)”. Centro de Conhecimento ESAB. Disponível em: <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_mig\\_mag\\_gmaw.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm)>. Acessado em 25 de abril de 2022.

Feng, Q. B., Li, Y. B., Carlson e Lai, M. 2018. “Study of resistance spot weldability of a new stainless steel”. Science and Technology of Welding and Joining, p. 101-111. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1491378>.

Formlabs. 2022. “Dental”. Disponível em <<https://dental.formlabs.com/>>. Acessado em 16 de março de 2022.

Fronius. 2022. “TransPuls Synergic 5000 CMT”. HBT Weld. Disponível em: <<https://hbt-weld.cz/produkty/transpuls-synergic-5000-cmt/>>. Acessado em 28 de março de 2022.

Fujiwara, K., Tadahisa, T., Masahiro, O., Takashi, M., Naoki, M. e Yoshihide, I. 2020. “Experimental study on the metal transfer control by using pulsed Ar addition in CO2 arc welding process: studies on pulsed gas MAG welding”, Welding International, Vol. 34 p. 7-9, 297-313, <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1936924>.

Furukawa, K. 2006. “New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets”. Welding International. Vol. 20, p. 440-445. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>.

Ge, J., Ma, T., Han, W., Yuan, T., Jin, T., Fu, H., Xiao, R., Lei, Y. e Lin, J. 2019. “Thermal-induced microstructural evolution and defect distribution of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 part: Numerical simulation and experimental characterization”. Applied Thermal Engineering, Vol. 163. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114335>.

Guilherme, L. H., Benedetti, A. V., Fugivara, C. S., Magnabosco, R. e Oliveira, M. F. 2020. “Effect of MAG welding transfer mode on sigma phase precipitation and corrosion performance of 316L stainless steel multi-pass welds”. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9, ed. 5, p. 10537-10549. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.039>.

ISO. 2005. “Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)- Quality levels for imperfections”. International Standard, p. 1-32.

Javaid, M. e Haleem, A. 2019. “Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: A literature-based review”. Journal of Oral and Craniofacial research, p. 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2019.04.004>.

Jenney, C., O’Brien, A. 2007. “Welding science and technology: survey of joining, cutting, and allied processes”. Welding handbook: Ninth Edition. Vol. 1, cap. 1, p. 1-4. Disponível em <[https://pubs.aws.org/Download\\_PDFS/WHB-1.9PV.pdf](https://pubs.aws.org/Download_PDFS/WHB-1.9PV.pdf)>. Acesso em: 12 jul. 2021.



Jiang, Q., Zhang, P., Yu, Z., Shi, H., Li, S., Wu, D., Yan, H., Ye, X. e Chen, J. 2020. “Microstructure and Mechanical Properties of Thick-Walled Inconel 625 Alloy Manufactured by Wire Arc Additive Manufacture with Different Torch Paths”. *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, 2000728. <https://doi.org/10.1002/adem.202000728>.

Kah, P., Lafiti, H., Suoranta, R., Martikainen, J. e Pirinen, M. 2014. “Usability of arc types in industrial welding”. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 9, 15. <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0015-6>.

Kannan, A., Kumar, S., Pramod, R., Shanmugam, N., Vihsnukumar, M. e Naveenkumar, S. 2021. “Microstructural characterization and mechanical integrity of stainless steel 316L clad layers deposited via wire arc additive manufacturing for nuclear applications”. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 52(6), p. 617-623. <https://doi.org/10.1002/mawe.202000242>.

Knezović, N., Garašić, I. e Jurić, I. 2020. “Influence of the Interlayer Temperature on Structure and Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Product”. *Materials*, vol. 13, 5795. <https://doi.org/10.3390/ma13245795>.

Kovalenko, O. 2019. “Avaliação de aspectos da estabilidade do arco e da geometria de pré-formas em manufatura aditiva utilizando o processo MIG/MAG CMT com foco na liga Ti-6Al-4V”. Tese de doutorado em engenharia mecânica – Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.629>.

Lehmann, T., Jain, A., Jain, Y., Stainer, H., Wolfe, T., Henein, H. e Qureshi, A. 2020. “Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing”. *Materials & Design*, Vol. 194, 108841. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108841>.

Long, P., Wen, D., Min, J., Zheng, Z., Li, J. e Liu, Y. 2021. “Microstructure Evolution and Mechanical Properties of a Wire-Arc Additive Manufactured Austenitic Stainless Steel: Effect of Processing Parameter”. *Materials*, p. 1681. <https://doi.org/10.3390/ma14071681>.

Machado, I. 1996. “Soldagem e técnicas conexas: Processos”. Editado pelo autor, Vol. 1, p. 477.

Marques, P., Modenesi, P. e Bracarense, A. 2009. “Soldagem fundamentos e tecnologias”. Editora UFMG. ISBN 978-85-7041-748-0.

Mezrag, B., Deschaux, F., Rouquette S. e Benachour, M. 2018. “Indirect approaches for estimating the efficiency of the cold metal transfer welding process”. *Science & Technology of Welding & Joining*, Science & Technology of Welding & Joining, Vol. 23, p. 508-519. <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1417806>.

Modenesi, P. 2011. “Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas”. Universidade federal de Minas Gerais, departamento de engenharia metalúrgica e de materiais.

Modenesi, P. 2012. “Soldabilidade dos Aços Transformáveis”. Universidade federal de Minas Gerais, departamento de engenharia metalúrgica e de materiais.

Motta, M., Dutra, J., Junior, R. e Scotti, A. 2007. “A Study on out-of phase current pulses of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on coating applications: part I”. Technical Papers: J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng., Vol. 29, p. 207-210. <https://doi.org/10.1590/S167858782007000200010>.

MTS. 2019. “MTS Landmark Testing Solutions”. Catálogo, p. 4. Disponível em: <[https://corp.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev\\_004324.pdf](https://corp.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_004324.pdf)>. Acessado em 28 de março de 2022.

Nadzam, J. 2014. “Gas Metal Arc Welding: Product and Procedure Selection”. Disponível em: <[c4200.pdf \(lincolnelectric.com\)](https://www.lincolnelectric.com/c4200.pdf)>. Acesso em: 10 jul 2021.

Nagamatsu, H., Sasahara, H., Mitsutake, Y. e Hamamoto, T. 2020. “Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining”. Additive Manufacturing, vol. 31, 100896. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>.

NBR NM 315. 2017. Ensaio não destrutivo – Ensaio Visual – Requisitos e práticas recomendadas. p. 1-11.

Neris, M. 2012. “Soldagem: Eixo tecnológico: Controle e processos industriais”. Disponível em <[http://www.cpscetec.com.br/cpscetec/arquivos/apostila\\_soldagem.pdf](http://www.cpscetec.com.br/cpscetec/arquivos/apostila_soldagem.pdf)>. Acessado em 16 de março de 2022.

Novelino, A. 2021. “Estudo da Geometria dos Cordões Fabricados pelo Processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco”. Universidade de Brasília, p. 1-79.

Novelino, A. e Ziberov, M. 2021. “Defects in wire and arc additive manufactured components: A review”. 26<sup>o</sup> ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

Nunes, E., Cavalcante, N., Barreto, A., Silva, A. e Motta, M. 2015. “Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem na Deposição de Aço Inoxidável Superduplex pelo Processo Plasma Pó”. Soldagem e Inspeção, Vol. 20, n. 2, p. 205-218. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.08>.

Oliveira, A., Santos, R., Silva, B., Guarieiro, L., Angerhausen, M., Reisgen, U., Sampaio, R., Machado, B., Droguett, E., Silva, P. e Coelho, R. 2021. “A Detailed Forecast of the Technologies Based on Lifecycle Analysis of GMAW and CMT Welding Processes”. Sustainability, Vol. 13, ed. 3766, p. 3766. <https://doi.org/10.3390/su13073766>.

Olympus. 2007. “Olympus Launches LEXT OLS3100 Confocal Laser Scanning Microscope”. Olympus Global Homepage. Disponível em <<https://www.olympus-global.com/en/news/2007a/nr070125lext31e.html>>. Acessado em 28 de março de 2022.

Pakmanesh, M.R., Shamanian, M. 2018. “Optimization of pulsed laser welding process parameters in order to attain minimum underfill and undercut defects in thin 316L stainless steel foils”. Optic & Laser Technology, p. 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.047>.

Paolini, A., Kollmansberger, S. e Rank, E. 2019. “Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods”. Additive Manufacturing, Vol. 30. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>.

Park, J. e Lee, S.H. 2021. “CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel (2): Solidification Map of the Multilayer Deposit” *Metals*, vol. 11(11), 1725. <https://doi.org/10.3390/met11111725>.

Pereira, A., Buschinelli, A. Ñino, C. e Henke, S. 2001. “Estudo Comparativo do Reparo por Soldagem dos Aços Inoxidáveis Martensíticos AISI 410 e CA-6NM”. COBEF, p. 1-8.

Pickin, C. G. e Young, K. 2006. “Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy”. *Science & Technology of Welding & Joining*, Vol. 11, p. 583-585. <https://doi.org/10.1179/174329306X120886>.

Pimenta, R. 2022. “Avaliação Da Resistência À Fadiga Em Peças Impressas Através De Manufatura Aditiva Por Deposiçãoa Arco”. Universidade de Brasília, p. 1-128.

Ramalho, A., Santos, T., Bevans, B., Smoqi, Z., Rao, P. e Oliveira, J.P. 2022. “Effect of contaminations on the acoustic emissions during wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel”. *Additive Manufacturing*, Vol. 51. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102585>.

Ramkumar, K., Dharmik, K., Noronha, B. e Mugundan, G. 2019. “Structure-property evaluation of single pass Laser-arc hybrid welding of resulphurized martensitic stainless steel”. *Journal of Materials Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.016>.

Roy, S., Shassere, B., Yoder, J., Nycz, A., Noakes, M., Narayanan, B., Meyer, L., Paul, J. e Sridharan, N. 2020. “Mitigating Scatter in Mechanical Properties in AISI 410 Fabricated via Arc-Based Additive Manufacturing Process”. *Materials*, Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/ma13214855>.

Sachin, R., Sumesh, A. e Upas, U.S. 2020. “Study of Mechanical Properties and Weldability of Aluminium Alloy and Stainless steel by Gas Metal Arc Welding”. *Materials today: Proceedings*, p. 1167-1173. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.430>.

Santos, M. 2013. “Determinação da Emissividade e Análise Microestrutural do Aço Inoxidável Martensítico ASTM A743 CA6NM Decorrente Da Soldagem GMAW em Múltiplos Passos com Metal de Deposição AWS 410 NiMo”. Universidade de Brasília, p. 1-133.

Santos, M. 2018. “Estudo do Efeito da Temperatura de Interpasse e de Pré-aquecimento no Processo de Soldagem por Múltiplos Passos no Reparo de Pás de Turbina Hidráulicas”. Universidade de Brasília, p. 1-162.

Scotti, A., Ponomarev, V. e Lucas, W. 2012. “A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, p. 1406-1413. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021>.

Shuangyu, L. 2018. “Characteristics analysis of droplet transfer in laser- MAG hybrid welding process”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, p. 805-811. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.047>.

Silva, B. H. S. 2020. “Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) bruno Henrique Sousa silva”. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.279>.

Silva, C. 2017. “influência da temperatura de revenimento sobre a microestrutura de metais de solda 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo”. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, p. 1-43. Disponível em: < [https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCC2-Camila-Braga-Teixeira-Silva\\_CI%C3%A1udio-Turani.pdf](https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCC2-Camila-Braga-Teixeira-Silva_CI%C3%A1udio-Turani.pdf)>. Acessado em: 24 de abril 2022.

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., Nascimento, V., Vilarinho, L., Scotti, A. 2011. “Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito”. Soldag. Insp., p. 22-32. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100004>.

Spartacus3D. 2020. Farinia. Disponível em <<https://www.farinia.com/spartacus3d/industrial-additive-manufacturing>>. Acesso em 16 de março de 2022.

TOTVS. 2020. “Gestão Industrial”. Disponível em <<https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/manufatura-aditiva/#:~:text=Conceito%20da%20manufatura%20aditiva,como%20base%20um%20modelo%20digital>> Acessado em 16 de março de 2022.

TWI. 2022. “Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)”. Job knowledge, Disponível em: < <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>>. Acessado em 2 de outubro de 2022.

Vittorino, A. 2018. “Avaliação De Potencialidades Do Processo De Soldagem Mig/Mag Com Arames Eletrodo Ultrafinos”. Monografia em engenharia mecânica pela faculdade de Uberlândia, p. 5. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22284/1/AvaliacaoPotencialidadesProcesso.pdf>>. Acesso em 19 de abril de 2022.

Wang, L., Xue, J. e Wang, Q. 2019. “Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel”. Materials Science and Engineering: A, vol. 751, p. 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.078>.

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H. e Norrish, J. 2018. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”. Journal of Manufacturing Processes, Vol. 35, p. 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.

Wu, W., Xue, J., Wang, L., Zhang, Z., Hu, Y. e Dong, C. 2019. “Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing”. Metals, 9(1):109. <https://doi.org/10.3390/met9010109>.

Yin, S., Yan, X., Jenkins, R., Chen, C., Kazasidis, M., Liu, M., Kuang, M. e Lupoi, R. 2019. “Hybrid additive manufacture of 316L stainless steel with cold spray and selective laser melting: Microstructure and mechanical properties”. Journal of Materials Processing Technology, vol. 273, 116248. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.029>.

Zhai, W., Wu, N. e Zhou, W. 2022. “Effect of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing Using High-Strength Metal-Cored Wire”. *Metals*, Vol. 12, 212. <https://doi.org/10.3390/met12020212>.

Zhang, L., Okudan, G., Basante-Defaz, A., Gneiting, R., Subramaniam, S., Ozevin, D. e Indacochea, E. 2020. “Characterization of GMAW (Gas Metal Arc Welding) Penetration Using Ultrasonics”. *Materials*, p. 2307. <https://doi.org/10.3390/ma13102307>.

Zhang, Y., Chen, Y., Li, P. e Male, A. “Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, p. 347-357. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00867-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00867-1).

Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., Zhao, L. e Zhou, C. 2017. “Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint”. *Applied Surface Science*, p. 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.252>.

Zhang, Z., Sun, C., Xu, X. e Liu, L. 2018. “Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminium alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing”. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, p. 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.005>.

Zhao, Y., Xiaojian, S., Keng, Y., Guoqiang, W., Zhanjun, J. e Yuxiang, H. 2018. “Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel”. *Journal of Materials Processing Tech*, p. 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.003>.

Zwick/Roell. 2022. “Universal hardness tester ZHU 250”. Direct Industry by Virtualexpo Group. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/prod/zwickroell-gmbh-co-kg/product-15660-1100157.html>>. Acessado em 28 de março de 2022.