

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PAULO HENRIQUE TOALDO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO NA
MANUFATURA ADITIVA DO AÇO VP50IM POR ARCO ELÉTRICO A GÁS**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2022

PAULO HENRIQUE TOALDO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO NA
MANUFATURA ADITIVA DO AÇO VP50IM POR ARCO ELÉTRICO A GÁS**

**Evaluation of the Influence of Processing Parameters in The Additive
Manufacturing of VP50IM Steel by Gas Electric Arc**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração: Fabricação Mecânica e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Anderson G. M. Pukasiewicz.

Coorientador: Prof. Dr. Roger Navarro Verastégui.

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa**



PAULO HENRIQUE TOALDO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO NA MANUFATURA ADITIVA DO AÇO VP50IM POR ARCO ELÉTRICO A GÁS.

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Fabricação Mecânica E Materiais.

Data de aprovação: 04 de Novembro de 2022

Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Denilson Jose Marcolino De Aguiar, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Ramon Sigifredo Cortes Paredes, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Roger Navarro Verastegui, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 04/11/2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus (a força maior), por me dar força e energia para a superação dos obstáculos diários.

À minha família, sem a qual eu não teria dado sequer um passo. A minha mãe Marly, meu pai Ciro, e minha irmã Ana que, apesar de todas as tribulações no meio do caminho, sempre me incentivaram e apoiaram em todas as fases dessa trajetória. A minha vó Wonni e meus padrinhos Carli e Lori que, mesmo longe, sempre torceram e me ajudaram sempre que possível, em especial ao ano que morei em SC durante o programa de mestrado.

Ao meu orientador e amigo Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, pela introdução ao universo da soldagem, pelas oportunidades fornecidas, conversas esclarecedoras, paciência, viagens discussões e acima de tudo, dedicação e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador e amigo Roger Verastégui pelo acompanhamento no laboratório de soldagem, direcionando o estudo prático com dicas e orientações sobre o processo de soldagem, ações estas que muito contribuíram na construção do conhecimento.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Ponta Grossa, ao Departamento de Engenharia Mecânica pela disponibilidade de toda sua estrutura durante o processo, em especial ao Laboratório Multiusuário C²MMa.

A todos meus amigos da engenharia, especialmente a, Gabriel Trelha, Gustavo Trelha e Gabriel Borri, cujo não pouparam esforços para me ajudar nas horas que mais precisei. Também aos meus amigos pessoais, pela força e incentivo, os quais muitas vezes me acompanharam noite a dentro na elaboração da dissertação com sua companhia virtual em aplicativos de voz.

Aos meus gestores e amigos da Sideral Linhas Aéreas, os quais sempre incentivaram minha contribuição ao universo da pesquisa, desenvolvendo minhas habilidades de investigador junto ao programa de Mestrado.

RESUMO

Os processos de soldagem como fabricação mecânica são uma realidade essencial na produção e reparo de componentes para a maioria das indústrias de manufatura. Ademais, nos últimos anos a demanda por manufatura aditiva a arco por arame, processo de soldagem conhecido como WAAM, (*Wire Arc Additive Manufacturing*) aumentou potencialmente, tornando-se uma alternativa às manufaturas subtrativas. No processo WAAM, utiliza-se a deposição multicamada de cordões de solda seguindo um modelo digital, produzindo uma estrutura mecânica tridimensional. A utilização da manufatura aditiva é reconhecida para confecção de peças de alta complexidade geométrica e para o reparo de componentes, com propriedades mecânicas comparáveis às do material fundido. Entretanto, existem desafios significativos associados ao WAAM, como microestruturas e propriedades mecânicas indesejáveis, altas tensões residuais e distorção da geometria. Neste contexto, este estudo contribui para o tema com uma metodologia de seleção de parâmetros para WAAM utilizando GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) pulsado e a caracterização do empilhamento gerado. Utilizou-se a metodologia CCC (Central Composto Completo), definindo critérios para avaliar o comportamento e definição dos parâmetros para a confecção das amostras por manufatura aditiva, variando corrente de pico (C_p), corrente de base (C_b), velocidade de alimentação de arame durante corrente de pico (V_{ap}), velocidade de alimentação de arame durante corrente de base (V_{ab}) e velocidade de soldagem (V_s). A metodologia de seleção de parâmetros evidenciou um caminho lógico a seguir para uma escolha viável de parâmetros de soldagem para manufatura aditiva. A combinação de parâmetros ideal demonstrada foi $C_p=200A$, $C_b=100A$, $V_{ap}=2,9\text{cm/min}$, $V_{ab}=1,2\text{cm/min}$ e $V_s=20\text{cm/min}$. Foram realizados ensaios de tração, rugosidade, dureza, inspeção visual, microestrutura e geometria da seção transversal das amostras confeccionadas em manufatura aditiva no parâmetro ideal previamente designado. Ensaios de tração mostraram uma resistência até 15% maior nas amostras na seção longitudinal ao sentido de soldagem em comparação ao sentido transversal. Ensaios de dureza demonstraram uma dureza até 9% menor no centro do empilhamento em comparação ao topo e base. A análise de fratura dos corpos de prova evidenciou algumas inclusões e uma fratura dúctil. Utilizou-se a ISO 4287 para avaliação de rugosidade através de ensaio de polimento. Os valores de rugosidade chegaram a 0,265 Ra sem sinais de descontinuidade.

Palavras Chave: soldagem; manufatura aditiva; VP50IM; GTAW pulsado; formação de perfil.

ABSTRACT

Welding processes such as mechanical fabrication are essential in producing and repairing components for most manufacturing industries. Furthermore, in recent years the demand for wire arc additive manufacturing (welding process known as WAAM, (Wire Arc Additive Manufacturing) has increased, becoming an alternative to subtractive manufacturing, which has a significant loss of material. In the WAAM process, multilayer deposition of weld beads is used following a digital model, producing a three-dimensional mechanical structure. The use of additive manufacturing is recognized for manufacturing parts of high geometric complexity and repairing components with mechanical properties comparable to the cast material. However, there are significant challenges associated with WAAM, such as undesirable microstructures and mechanical properties, high residual stresses, and geometry distortion. In this context, this study contributes to the topic with a parameter selection methodology for WAAM using pulsed GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) and the characterization of the generated stacking. The CCC methodology (Complete Composite Central) was used to evaluate the definition of additive manufacturing parameters. Peak current (C_p), base current (C_b), peak current wire feeding speed (V_{ap}), base current wire feeding speed (V_{ab}), and welding speed (V_s) were evaluated. The parameters selection methodology evidenced schematics logic for a viable choice of definition parameters for additive manufacturing. The ideal parameters were $C_p=200A$, $C_b=100A$, $V_{ap}=2.9cm/min$, $V_{ab}=1.2cm/min$, and $V_s=20cm/min$. Tests were performed on robustness, durability, visual attraction, microstructure, and cross-section geometry of samples configured in additive manufacturing in the ideal parameter designed ideally. The transverse direction is transverse. Lower center tests up to 9% building durability compared to top and base hardness. The fracture analysis of the samples shows some inclusions and a ductile fracture. Standard ISO 4287 was used for roughness evaluation through the polishing test. The roughness values reached 0.265 Ra with no signs of discontinuity.

Key Words: welding; additive manufacturing; VP50IM; GTAW pulsed; forming profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Impressão 3D de um bloco de motor em polímero.	17
Figura 2 - Primeira ponte confeccionada por MA e design generativo.	19
Figura 3 - Primeira peça em MA enviada ao espaço operando sob testes.	20
Figura 4 - Fluxograma da estrutura de trabalho.	22
Figura 5 - Definição de fabricação esquematizada.	25
Figura 6 - Esquemático de um processo GTAW.	29
Figura 7 - Definição gráfica de parâmetros de controle GTAW de corrente pulsada.	30
Figura 8 - Macroestrutura esquemática de um cordão de solda	35
Figura 9 - Aspecto da seção transversal de um cordão de solda.	35
Figura 10 - Região de crescimento de grão	37
Figura 11 - MA de um componente metálico utilizando braço robótico.	38
Figura 12 – Desenho esquemático de manufatura WAAM.	41
Figura 13 - Geração de caminho por curvas de Hilbert.	44
Figura 14 - Metodologia de preparação das amostras	53
Figura 15 - Representação gráfica do DoE - CCC	55
Figura 16 - Análise de geometria do cordão de solda simples	65
Figura 17 - Análise de geometria do cordão de solda camada a camada.	66
Figura 18 - Análise de diluição do cordão de solda	67
Figura 19 - Análise de molhabilidade do cordão de solda	68
Figura 20 - Análise de preenchimento de área do cordão de solda	69
Figura 21 - Procedimento de medidas para Microdureza.	74
Figura 22 - Esquemático de remoção dos corpos de prova para ensaio de tração A) Transversal B) Longitudinal.	76
Figura 23 – Desenho esquemático dos corpos de prova de tração	76
Figura 24 - Análise de Rugosidade com ampliação de 50x	105

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Amostras iniciais provenientes do estudo preliminar.....	57
Fotografia 2 - Maquinário utilizado para confecção das amostras	59
Fotografia 3 – Metal base utilizado para amostras.....	60
Fotografia 4 – Equipamento de corte semiautomático Buehler® IsoMet 4000.....	61
Fotografia 5 – Lixadeira automática Buehler® Vector.....	62
Fotografia 6 – Microscópio estereoscópio binocular ZEISS® Stemi 508	62
Fotografia 7 - Microscópio ótico ZEISS®	63
Fotografia 8 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN Oxford®	64
Fotografia 9 - Ângulos da tocha de soldagem	70
Fotografia 10 - Configuração de soldagem camada a camada.....	71
Fotografia 11 - Esquema de arrefecimento de interpasse dos cordões	72
Fotografia 12 – Dispositivo de Microdureza Vickers Shimadzu® HMV-G20	73
Fotografia 13 - Máquina de tração EMIC® Linha DL-10000	75
Fotografia 14 – Corpos de prova de tração: A1 e A2 seção transversal; B1 e B2 seção longitudinal.....	77
Fotografia 15 - Perfilômetro ótico 3D CCI Lite Taylor Hobson®.....	78
Fotografia 16 - Inspeção visual dos parâmetros soldados	80
Fotografia 17 - Análise geométrica: Seção transversal parâmetro 01.....	82
Fotografia 18 - Análise geométrica: Seção transversal parâmetro 02.....	83
Fotografia 19 -Análise de área: Seção transversal parâmetro 01	84
Fotografia 20 - Réplica dos níveis selecionados realizados em pares. a) Nível 04, b) Nível 19, c) Nível 38 e d) Nível 39.....	86
Fotografia 21- Molhabilidade das amostras dos níveis: a) 4 b) 19 c) 38 d) 39	87
Fotografia 22 - Diluição das amostras de níveis a) 4 b) 19 c) 38 d) 39	88
Fotografia 23 - Deposição de cordões para ensaio na transversal	90
Fotografia 24 - Deposição de cordões para ensaio na longitudinal.....	91
Fotografia 25 - Esquemático para retirada de amostras na transversal	92
Fotografia 26 - Esquemático para retirada de amostras na longitudinal	92
Fotografia 27 - Seção transversal da soldagem camada a camada. a) Microestrutura do início da estrutura, b) Microestrutura do meio da estrutura c) Microestrutura do topo da estrutura	93

Fotografia 28 – Diluição da soldagem camada a camada.....	95
Fotografia 29 - Aspecto final do corpo de prova após finalização do ensaio de tração	100
Fotografia 30 - Fratura corpo de prova longitudinal.....	102
Fotografia 31 - Fratura corpo de prova transversal	103
Fotografia 32 - Fratura do corpo de prova: Alvéolos e inclusões	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sumário de métodos de caminhos de tocha para MA.....	43
Quadro 2 - Classificação geral de aços ferramentas.....	48
Quadro 3 - Parâmetros utilizados no processo GTAW pulsado	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química Aço VP50IM fornecida pelo fabricante	49
Tabela 2 - Parâmetros do estudo preliminar	56
Tabela 3 – Parâmetros dos níveis selecionados	57
Tabela 4 - Parâmetros do experimento para utilização da metodologia CCC	58
Tabela 5 - Composição química medida por EDS do material de adição (arame 1,2mm)	60
Tabela 6 - Referência de medidas para Microdureza	73
Tabela 7 - Medições de geometria do estudo inicial	82
Tabela 8 – Relação de áreas inscritas do reforço do cordão	85
Tabela 9 – Valores de área dos cordões diluídos nas amostras empilhadas	96
Tabela 10 - Diluição dos elementos químicos ao longo do empilhamento	97
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração uniaxial	101
Tabela 12 – Valores de rugosidade atingida com polimento	105

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Três dimensões, ambiente tridimensional
AISI	Sistema americano para a classificação dos aços, do inglês <i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais, do inglês <i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho assistido por computador, do inglês, <i>Computer Aided Design</i>
CAM	Manufatura assistida por computador, do inglês, <i>Computer Aided Manufacturing</i>
CCC	Central Composto Completo, do inglês <i>Central Composite Circumscrip</i>
DCEN	Corrente Contínua no Eletrodo Negativo, do inglês <i>Direct Current Electrode Negative</i>
DCEP	Corrente Contínua no Eletrodo Positivo, do inglês <i>Direct Current Electrode Positive</i>
DED	Deposição de Energia Direta, do inglês <i>Direct Energy Deposition</i>
DOE	Planejamento do Experimento, do inglês <i>Design of the Experiment</i>
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva, do inglês <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
GMAW	Soldagem de Arco Metal Gás, do inglês <i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	Soldagem com Eletrodo não consumível de Tungstênio, do inglês <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HV	Dureza Vickers, do inglês <i>Hardness Vickers</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização, do inglês <i>International Organization for Standardization</i>
MA	Manufatura Aditiva
MAG	Soldagem a Arco Elétrico de Arame Com Gás Ativo, do inglês <i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal Base
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MIG	Soldagem a Arco Elétrico de Arame Com Gás Inerte, do inglês <i>Metal Inert Gas</i>
OFAT	Um Parâmetro Por Vez, do inglês <i>One Factor At Time</i>
PAW	Soldagem a Plasma, do inglês <i>Plasm Arc Welding</i>
PCGTAW	Soldagem a Arco Gás Tungstênio com Corrente Pulsada, do inglês <i>Pulsed Current Gas-Shielded Tungsten Arc Welding</i>
SAE	Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade, do inglês <i>Society of Automotive Engineers</i>
SAW	Soldagem por Arco Submerso, do inglês <i>Submerged Arc Welding</i>

SMAW	Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, do inglês <i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	Soldagem com Eletrodo não consumível de Tungstênio, do inglês <i>Tungsten Inert Gas</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WAAM	Manufatura Aditiva a Arco por Arame, do inglês <i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADE
b	Base do Reforço do Cordão de Solda	[mm]
C_b	Corrente de Base	[A]
C_p	Corrente de Pico	[A]
F	Frequência do Pulso	[Hz]
h	Altura do Reforço do Cordão de Solda	[mm]
i_b	Corrente de Base	[A]
i_p	Corrente de Pulso	[A]
r	Divisão Entre Base e Altura Do Reforço do Cordão de Solda	[mm/mm]
R_a	Média Aritmética das Ordenadas de Afastamento de um Perfil	[μ m]
R_p	Altura Máxima do Pico Mais Elevado da Rugosidade	[μ m]
R_q	Média Aritmética da Raíz Quadrada	[μ m]
R_t	Distância Vertical Entre o Pico Mais Elevado e o Vale Mais Profundo	[μ m]
R_z	Média Aritmética de 5 Valores de Rugosidade	[μ m]
S_a	Desvio Aritmético Médio de Perfil	[μ m]
S_q	Desvio Médio Quadrático de Perfil	[μ m]
S_z	Altura Máxima de Perfil	[μ m]
t_b	Duração da Corrente de Base	[ms]
t_p	Duração da Corrente de Pulso	[ms]
V_{a_b}	Velocidade do Arame na Corrente de Base	[m/min]
V_{a_p}	Velocidade do Arame na Corrente de Pico	[m/min]
V_s	Velocidade de Soldagem	[cm/min]
α_1	Ângulo de Incidência do Arame	[°]
β_1	Ângulo de Incidência da Tocha	[°]
θ_1	Ângulo Entre Tocha e Arame	[°]
b	Base do Reforço do Cordão de Solda	[mm]
C_b	Corrente de Base	[A]
C_p	Corrente de Pico	[A]
F	Frequência do Pulso	[Hz]
h	Altura do Reforço do Cordão de Solda	[mm]
i_b	Corrente de Base	[A]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral	21
1.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Estrutura do Trabalho	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Processos de Fabricação Mecânica	24
2.2	Processos de Soldagem	26
2.2.1	Conceito de arco elétrico	27
2.2.2	Métodos convencionais de soldagem a arco	28
2.2.3	Processo de soldagem GTAW pulsado	29
2.2.4	Parâmetros de soldagem GTAW	31
2.2.5	Metalurgia da soldagem	34
2.3	Manufatura Aditiva de Peças Metálicas	38
2.3.1	Técnicas de manufatura aditiva	39
2.3.2	Processo de manufatura aditiva WAAM	40
2.3.3	Parâmetros de deposição do Processo WAAM	42
2.3.3.1	Geração do caminho da tocha	42
2.3.3.2	Aporte térmico em processos WAAM	45
2.3.4	Vantagens do processo WAAM	45
2.4	Aços Ferramentas	47
2.4.1	Classificação dos aços ferramenta	48
2.4.2	Aço ferramenta VP50IM	49
2.4.3	Soldagem de aço ferramenta	50
2.4.4	Manufatura aditiva de aços ferramenta	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	Planejamento do Experimento (DOE)	54
3.1.1	Estudo preliminar	55
3.1.2	Definição dos níveis e parâmetros iniciais	57
3.2	Preparação das Amostras	59
3.3	Preparação Metalográfica	61
3.3.1	Análise macroestrutural	61
3.3.2	Análise da microestrutura	62
3.3.3	Ataque químico	64
3.4	Análise de Geometria	64

3.5	Análise de Diluição	66
3.6	Análise de Molhabilidade	67
3.7	Análise de Área Inscrita	68
3.8	Parâmetros Utilizados no Trabalho	69
3.9	Deposição dos Cordões Camada a Camada	71
3.10	Ensaio de Microdureza Vickers	72
3.11	Ensaio de Tração Uniaxial	74
3.12	Análise de Perfilometria Ótica	77
4	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	79
4.1	Resultado do Estudo Dos Parâmetros	79
4.1.1	Inspeção visual.....	79
4.1.2	Geometria.....	81
4.1.3	Análise de área inscrita.....	84
4.1.4	Molhabilidade.....	86
4.1.5	Diluição do reforço no substrato.....	87
4.1.6	Definição do parâmetro ideal.....	89
4.2	Deposição dos Cordões Camada a Camada	90
4.2.1	Inspeção visual.....	90
4.2.2	Geometria e microestrutura.....	91
4.2.3	Caracterização do empilhamento.....	94
4.2.4	Mapeamento de microdureza.....	98
4.2.5	Propriedades mecânicas à tração.....	100
4.2.6	Estudo do aspecto superficial do depósito após polimento.....	104
5	CONCLUSÕES	107
5.1	Recomendações Para Trabalhos Futuros	108
6	REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

A produção de bens, como um dos pilares do desenvolvimento da sociedade, sempre atraiu a atenção de pesquisadores e profissionais de diversas áreas, por suas inegáveis características multidisciplinares. É do senso comum que, com o passar dos tempos, a inovação se faz uma necessidade para ampliar horizontes, possibilidades e caminhos, seja aplicando tecnologia em empresas, indústrias, academia, entretenimento ou em quaisquer atividades produtivas.

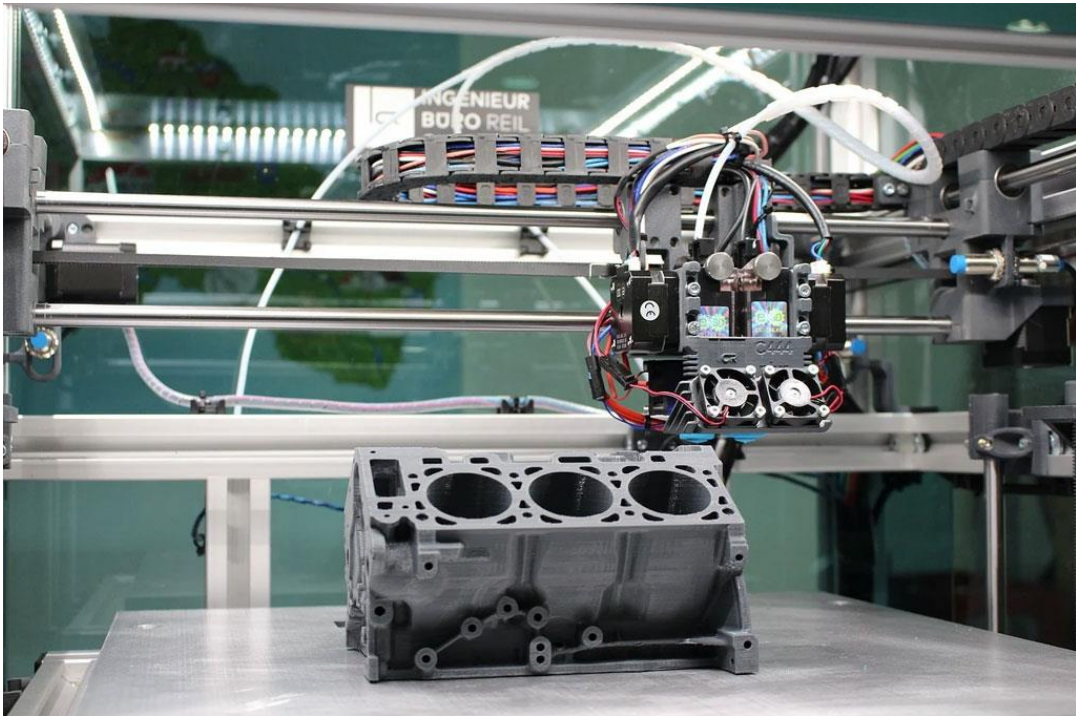
No âmbito da fabricação mecânica não se faz diferente, tendo a tecnologia contribuído com o processo evolutivo da concepção de materiais e ferramentas. Os meios tradicionais de produção de peças e ferramentas há tempos foram, e são, em sua essência, processos de fundição, conformação mecânica (laminação, extrusão, trefilação, forjamento, estampagem) usinagem e todas suas variações. Essas técnicas são largamente conhecidas e estudadas desde a revolução industrial, acumulando ao longo dos tempos funcionalidades e eficiências benéficas para a evolução tecnológica. Porém esses meios convencionais, por mais que sejam minimizados atualmente, ainda produzem uma elevada quantidade de resíduos e um gasto excessivo de material e local de estoque, contribuindo negativamente para com o meio ambiente devido aumento de contaminantes (THOMPSON; BIAN, *et al.*, 2015).

Todavia, esses meios tradicionais de fabricação fazem parte de uma filosofia de remoção de material, ou transformação física/química do material já existente para a confecção de uma peça. Um modo antagônico a esta filosofia para a concepção de peças são as manufaturas feitas por adição de material, amplamente conhecidas pela difusão do termo “impressão 3D”.

Ultimamente o termo “impressão 3D” tem ganhado os holofotes da mídia social e da indústria, mas há tempos que essa tecnologia é estudada, tendo um desenvolvimento substancial a partir da década de 1980. Vários são os termos encontrados para identificar a mesma sistemática, devido a revolução que estamos vivenciando (ALMEIDA, 2019).

Na Figura 1 é possível observar uma confecção de um bloco de motor em polímero, representativo e em escala demonstrando como a impressão 3D pode auxiliar a visualização do produto final, seja ele um protótipo ou o projeto final.

Figura 1 - Impressão 3D de um bloco de motor em polímero.



Fonte: Gomes (2020).

Um outro termo usual para impressão 3D é a prototipagem rápida ou simplesmente prototipagem, cujo termo é utilizado para descrever tecnologias que criam produtos físicos a partir de um arquivo gerado em software CAD 3D, melhorando assim o desenvolvimento do produto (GIBSON; STUCKER; ROSEN, 2010).

O termo Impressão 3D difundiu rapidamente por ser extremamente descritivo e por aproveitar o conceito de impressão, o qual é muito difundido entre as pessoas. Os termos Manufatura Aditiva, Prototipagem Rápida e Manufatura Rápida pode não obter muito sentido para alguém que não pertença ao campo da Engenharia, porém o termo Impressão 3D faz sentido para praticamente todas as pessoas (SILVA, 2017).

Estes termos, assim como tantos outros, são sinônimos da “Manufatura Aditiva” – MA (em inglês, *Additive Manufacturing – AM*), caracterizando o grupo de tecnologias que utiliza uma abordagem camada por camada para criar componentes funcionais, com forma livre; da base ao topo, dando forma física a um modelo 3D previamente desenvolvido em um arquivo digital (GIBSON; STUCKER; ROSEN, 2010). Para padronização deste tema, a ASTM entendeu a necessidade da criação de uma nova e única terminologia a ser adotada e certificou o termo “Manufatura Aditiva” como o que melhor representa esse grupo de tecnologias (ASTM, 2015).

Essa técnica de manufatura é relativamente moderna, considerada disruptiva, a qual é introduzida e aproveitada ao inovador conceito da indústria 4.0, cujo utiliza métodos de adição de material e contrapõe-se aos métodos convencionais de retirada de material (ALBERTI; SILVA; D'OLIVEIRA, 2014).

Deste modo, os benefícios da manufatura aditiva são tanto econômicos quanto ambientais, contudo, a literatura demonstra que a adoção dessa tecnologia de maneira mais ampla tem encontrado diversas barreiras em sua implementação. Genericamente, essas barreiras foram relacionadas à energia, materiais, mão de obra, maquinários, regulamentação e processos de fabricação. Atualmente, em nosso país, essa tecnologia é recente e faz parte de um revolucionário processo tecnológico, mas não se abstém de atravessar as mesmas dificuldades identificadas em outras localidades (ALMEIDA, 2019).

Diferente do processo de soldagem convencional – o qual une duas partes de uma peça pela fusão de ambas – a manufatura aditiva a partir do processo de soldagem faz a concepção de componentes inteiros e funcionais, com forma livre e de acabamento final. É comum encontrar o termo “impressão 3D em metal” para tal processo.

Ao fazer a combinação do processo de manufatura aditiva com o processo de soldagem (com um auxílio de um robô e uma máquina de solda), não apenas se faz possível como já é uma realidade, a concepção de peças metálicas de geometria livre como pontes, tubulações complexas já com suas flanges, peças automobilísticas, aeronáuticas, aeroespaciais entre outras, dentro desse universo ilimitado de opções que essa metodologia proporciona (LIPSON, 2012).

As máquinas de manufatura aditiva evoluíram nas últimas três décadas de um número limitado de protótipos caros para ferramentas de produção de commodities amplamente disponíveis, tornando-as deste modo, relativamente de fácil disponibilidade para as indústrias. (LIPSON, 2012). Em contrapartida, como todo o começo de uma inovação, existem várias maneiras de atingi-la, as quais ainda são muito difusos, podendo ser uma adversidade em diversas empresas que apostam em modelos de negócios puramente focados em reduções de custos (ALBERTI; SILVA; D'OLIVEIRA, 2014).

Uma vez de posse das máquinas de fabricação por MA, os responsáveis técnicos definem as especificações que o produto deve respeitar juntamente com os materiais utilizados, assim como todos os seus parâmetros. Desse modo, o software utiliza-se de simulações – muitas vezes baseadas em Inteligência Artificial – e interações evoluindo de uma situação de contorno inicial para encontrar a melhor solução possível para a problemática (SILVA, 2017). Em alguns países, é de fácil visualização a expansão deste método de manufatura, conforme demonstrado na Figura 2 com a primeira ponte funcional construída por MA, utilizando design generativo confeccionado por inteligência artificial e otimização de topologia.

Figura 2 - Primeira ponte confeccionada por MA e design generativo.

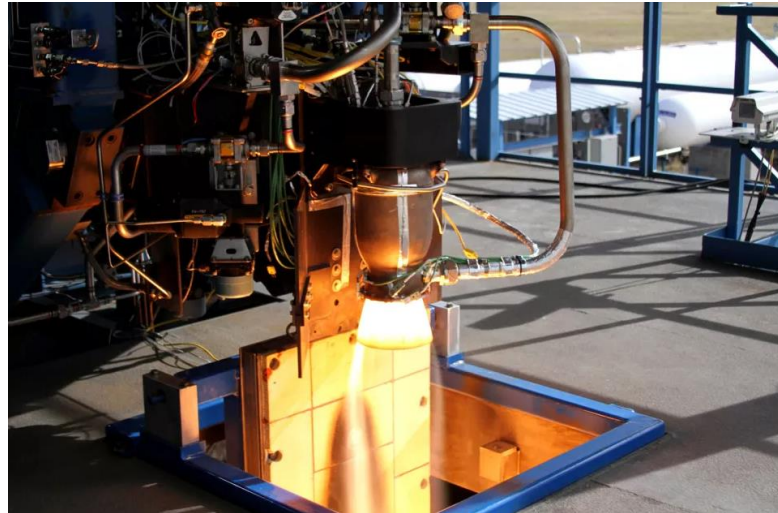


Fonte: Brogan (2021).

Deste modo, a manufatura aditiva de peças metálicas vem ganhando espaço na indústria, tornando-se uma opção para empresas inovarem na concepção de seus produtos, peças e ferramentas.

Recentemente, observa-se a indústria privada do setor aeroespacial apostar energicamente na tecnologia de MA para a confecção de peças de foguetes, como uma válvula oxidante principal do motor do foguete, demonstrado na Figura 3. Esta foi a primeira peça por MA enviada ao espaço, operando em condições totalmente fora do comum como temperaturas criogênicas, altos valores de pressão e vibração (HOWELL, 2014).

Figura 3 - Primeira peça em MA enviada ao espaço operando sob testes.



Fonte: Howell (2014).

Para aumentar a confiabilidade das peças fabricadas por este meio de fabricação inovador, vários recursos são estudados para aprimorar as técnicas de MA. Um destes é a Manufatura Aditiva por Arco Elétrico com Arame (WAAM, do inglês, Wire Arc Additive Manufacturing), um método mais limpo e ambientalmente amigável, cujo processo não expõe os operadores ao ambiente de pó potencialmente perigoso, comparado a outros processos de MA com alimentação por pó, por exemplo. Possui maior eficiência de uso do material com até 100% do material do arame depositado no componente. Ademais, arames metálicos são mais baratos e mais facilmente disponíveis do que os pós metálicos (DING; PAN, *et al.*, 2015).

Entretanto, devido ao caráter inovador deste processo de fabricação, alguns desafios significativos associados ao processo WAAM são evidenciados, como microestruturas e propriedades mecânicas indesejáveis, altas tensões residuais e construção da geometria no espaço, sem sua distorção. Estudos demonstram a importância de uma caracterização preliminar para deposição em espaço livre utilizando uma estrutura de suporte móvel (RANGESH; O'NEIL, 2012). No âmbito de MA para aços ferramenta, além dos desafios previamente citados, encontra-se na literatura estudos sobre transformações de fase, distribuição de tensões residuais e características metalúrgicas devido a transformação de austenita retida em martensita devido ao calor da fonte de solda (COTTAM; WANG, 2014).

Muitos processos tecnológicos são aplicados ao processo WAAM, modelos são concebidos para prever a distribuição da temperatura no material depositado

utilizando elementos finitos (GOKHALE; KALA, 2021), ensaios de propriedades mecânicas à tração de amostras nos sentidos transversal e longitudinal (WU; XUE, *et al.*, 2019) e estudos de geometria da seção transversal (DINOVITZER; CHEN *et al.*, 2019).

Uma metodologia adotada pelos pesquisadores para enfrentar tais desafios, são estudos que aprimoram a técnica de MA com a caracterização de perfil de cordões de solda, sendo possível entender as características de soldagem com maior precisão em suas propriedades (ZHANG; DING, *et al.*, 2021).

Sendo assim, este trabalho contribui à comunidade científica com uma análise da influência dos parâmetros de deposição de um perfil confeccionado por MA, estudando desde geometria, microestrutura, microdureza, propriedades mecânicas à tração e perfilometria óptica dos cordões de um perfil obtido por manufatura aditiva à arco elétrico de um aço ferramenta.

Diante das situações expostas e necessidades apresentadas, apresentam-se os objetivos do trabalho.

1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência dos parâmetros de deposição na construção de um perfil por tecnologia de Manufatura Aditiva por Arco Elétrico com Arame - WAAM, analisando as propriedades mecânicas do material depositado camada a camada, bem como os aspectos microestruturais do material depositado.

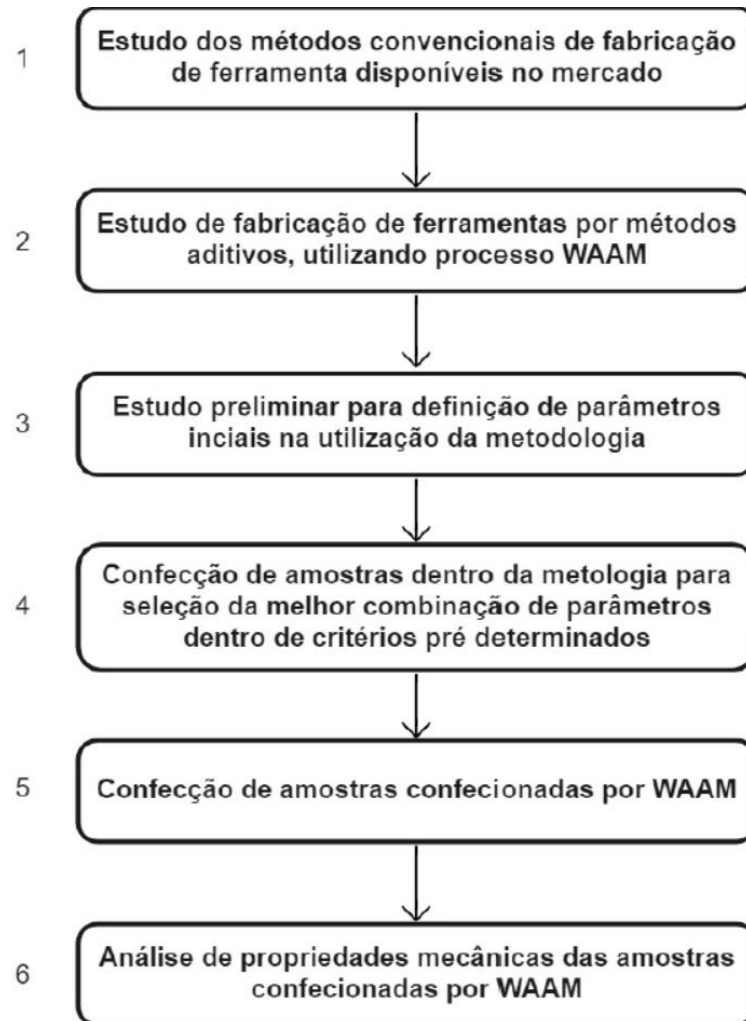
1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros de soldagem no processo de construção na geometria de um perfil utilizando soldagem GTAW pulsado como processo WAAM;
- Avaliar a influência da orientação do material depositado na resistência a tração e escoamento das camadas depositadas do material empilhado;
- Mapear a microdureza ao longo do material empilhado;
- Analisar a dispersão e diluição dos elementos químicos do aço VP50IM no material empilhado e a influência da sequência de passes;
- Avaliar a continuidade e constância de valores de rugosidade através de análise de rugosidade e polimento.

1.3 Estrutura do Trabalho

Estruturou-se o trabalho conforme esquematizado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma da estrutura de trabalho.



Fonte: Autoria própria (2021).

Previamente à realização do presente trabalho, analisou-se como o cenário da manufatura aditiva vem se atualizando no decorrer dos anos, assim como suas tecnologias empregadas. Com isso, é possível entender melhor sobre como a manufatura aditiva impacta na construção de ferramentas e no reparo destas (matrizes, por exemplo). Na etapa 1, um estudo sobre os métodos convencionais de fabricação de ferramenta, utilizando processos de fabricação ordinários (metodologias subtrativas de material). Na etapa 2, um estudo sobre os métodos aditivos de material,

utilizando processos de soldagem. Ambas estas etapas estão descritas na fundamentação teórica do trabalho.

Na etapa 3, foi realizado um estudo prévio da literatura para definição inicial dos parâmetros a serem utilizados. Uma vez de posse destas informações, é possível criar um desenho de experimento para escolher, de fato, o melhor parâmetro para o estudo, com base nos condicionais e critérios impostos. Para tal, confeccionou-se amostras para estudo dos parâmetros na 4ª etapa do trabalho.

Na etapa 5, utilizou-se o melhor parâmetro encontrado na etapa anterior para a confecção dos corpos de prova soldados camada a camada, a serem analisados por ensaios mecânicos na etapa 6.

No Capítulo 2 aborda-se os processos de fabricação mecânica de uma maneira geral; em seguida, com maiores detalhes, o processo de soldagem GTAW e manufatura aditiva, assim como seus parâmetros e características do material a ser trabalhado.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada neste trabalho. São descritos com detalhes o estudo prévio, os materiais utilizados e os métodos seguidos para deposição por manufatura aditiva. Posteriormente, as metodologias utilizadas na realização de ensaios de microdureza Vickers, ensaio de tração, molhabilidade e diluição na seção transversal, geometria do cordão de solda, os defeitos encontrados e rugosidade após polimento.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelos ensaios mecânicos propostos, análise das propriedades mecânicas assim como as discussões pertinentes, expondo em tabelas e gráficos os detalhes de valores obtidos, tratando também sobre os defeitos encontrados nas amostras e dificuldades enfrentadas no processo. Por fim, o Capítulo 5 descreve as conclusões obtidas pelo autor e os relaciona com os objetivos deste trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

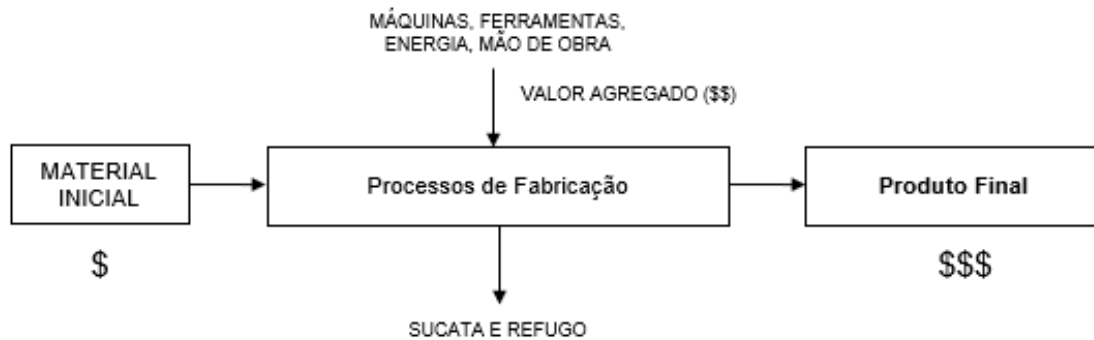
Este capítulo uma revisão da literatura é apresentada, envolvendo temas de interesse para o estudo, partindo inicialmente de processos de fabricação mecânica de maneira geral, passando por processo de soldagem e seus parâmetros; manufatura aditiva e seus parâmetros; uma abordagem sobre o material a ser estudado e fundamentos dos ensaios utilizados.

2.1 Processos de Fabricação Mecânica

A literatura define processo de fabricação como um procedimento realizado a fim de gerar transformações físicas e/ou químicas no material inicial com o objetivo de agregar valor a este material. Ou seja, é um passo único ou uma sequência de passos necessários para a transformação do material inicial (matéria prima) no produto final. As operações de fabricação podem ser divididas em dois tipos principais: Operações de processamento, cujo transformam o material de um estado do acabamento em um estado mais avançado e sempre mais próximo do produto final desejado e operações de montagem, cuja une dois ou mais componentes objetivando criar uma nova peça, que pode ser chamada conjunto, subconjunto ou ter outra denominação, mas sempre se referindo ao processo de união (por exemplo, a solda de um componente é um conjunto de elementos soldados) (GROOVER, 2012). Estas operações elevam o valor do produto por meio de mudança na geometria, nas propriedades mecânicas e/ou químicas e no aspecto do material como um todo (FISCHER; GOMERINGER *et al.*, 2016).

Este contexto encontra-se esquematizada na Figura 5 o impacto de um processo de fabricação na transformação da matéria prima. Uma junção de um processo tecnológico e econômico na concepção de novos componentes, peças, objetos, etc.

Figura 5 - Definição de fabricação esquematizada.



Fonte: Adaptado de Groover (2012).

Essa transformação, de matéria prima em objetos de uso corrente, existe desde os primórdios da civilização e a literatura divide as operações de processamento desta matéria prima em:

- Processos de Aprimoramento das Propriedades;

O melhor e maior exemplo deste grupo são os tratamentos térmicos. Estes processos não alteram, intencionalmente, a geometria final da peça. A *sinterização* de pós metálicos e cerâmicos também é considerada um processo de tratamento térmico, que endurece a peça formada por partículas compactadas (GROOVER, 2012).

- Processos de Modificação da Superfície;

Estes processos podem ser desde os mais simples, como limpeza e tratamento de superfície até revestimentos e deposição de filmes finos. A *limpeza* inclui processos mecânicos e químicos para remover impurezas, óleos e outros possíveis contaminantes superficiais. Os tratamentos de superfície incluem processos mecânicos como o jateamento com esferas (ou areia) e processos físicos como a difusão e implantação iônica. Os processos de revestimento usuais – cujo criam uma camada na superfície do material - são a *galvanização*, a anodização do alumínio, aspersão térmica (metálico ou cerâmico) e pinturas. A deposição de filmes finos inclui a deposição física de vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*) e a deposição química de vapor (CVD- *Chemical Vapor Deposition*) para criar revestimentos extremamente finos protetores (GROOVER, 2012).

- Processos de Mudança de Forma;

Este grupo de operação de processamento combina forças mecânicas (força e calor) para alterar a geometria final do material, a qual divide esta categoria em 4 sub grupos, os quais são: Processos de solidificação, cujo material inicialmente está no estado líquido/semissólido e é resfriado até que se solidifique na geometria final; Processamento de particulados, quando o material a ser processado está na forma de pó que será moldado e aquecido para alcançar a geometria desejada; Processos de conformação, quando o material inicial é um sólido dúctil (em geral metálico) que se deforma plasticamente para alcançar a geometria final; e Processos de remoção de material, quando o material é inicialmente sólido (dúctil ou frágil) e parte dele é removida para se obter a geometria final (GROOVER, 2012).

Dentro dos processos de solidificação, podemos citar soldagem (união) e fundição, geralmente usado para processos com metais, e moldagem, usado para polímeros. Dentro dos processos de remoção de material, podemos citar os processos de usinagem de corte (e suas variações), erosão e separação por cisalhamento (FISCHER; GOMERINGER *et al.*, 2016).

Dentre estes processos de adição de material, destacam-se os processos de soldagem, os quais serão melhores classificados, desdobrados e esclarecidos na próxima seção.

2.2 Processos de Soldagem

A Sociedade Americana de Soldagem define processo de soldagem como uma operação que tem por objetivo obter a coalescência localizada de um material pelo aquecimento até uma temperatura adequada para fusão, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001).

Além desta definição padronizada internacionalmente, é possível dizer, em poucas palavras, que o processo de soldagem é a união de dois materiais pelo alcance da temperatura de fusão de ambos os materiais. Sua principal função é a deposição de materiais sobre superfícies, seja para finalidades de união, recuperação ou formação de revestimentos superficiais (MODENESI; MARQUES, 2000).

Os métodos convencionais de soldagem estão diretamente relacionados com o conceito físico de arco elétrico, sendo este o principal mecanismo de transferência de energia do processo, tornando possível a união de materiais por fusão e solidificação.

2.2.1 Conceito de arco elétrico

O termo “arco elétrico” é extenso e amplamente utilizado no universo da união de materiais por fusão. A soldagem a arco se aplica à grande maioria dos processos convencionais de soldagem de materiais metálicos, os quais utilizam um arco elétrico como a principal fonte de calor para atingir o ponto de fusão dos materiais no processo de soldagem.

Entre a ponta de um eletrodo - seja ele consumível ou não - para soldagem e o metal de base existe uma região por onde passa uma grande quantidade de corrente elétrica, produzindo uma alta intensidade de calor e luz. Este conceito a literatura define como arco voltaico, ou também como “arco elétrico”, mecanismo fundamental para vários processos de soldagem (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Esse mecanismo é amplamente utilizado na soldagem por fusão de materiais metálicos pois apresenta uma combinação ótima de características, tais como concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores (MODENESI, 2012).

A soldagem a arco é iniciada quando as superfícies do eletrodo e do metal de base são aquecidas, por resistência elétrica, até atingir a capacidade de emitir e receber elétrons, assim como levar o meio que está entre o eletrodo e a peça às condições necessárias para se ionizar (SCOTTI; MONTEIRO, 2012). Desse modo, os gases na eminência do eletrodo são submetidos a um campo elétrico de altíssima intensidade, sendo satisfeita a condição para seus átomos liberar ou receber elétrons (íons se tornando em cátions e, em menor probabilidade, ânions). Esse processo é denominado de emissão catódica e faz parte da física do arco elétrico (TALKINGTON, 1998).

Entender a direção do fluxo de elétrons é de extrema importância para processos de soldagem. A orientação do fluxo da corrente é diretamente proporcional à temperatura do eletrodo e do metal base. Correntes positivas aquecem mais o eletrodo de soldagem, enquanto correntes negativas aquecem mais o metal de base (TALKINGTON, 1998). O entendimento desse fenômeno auxilia na escolha correta do processo de soldagem a ser utilizado, assim como seus parâmetros.

2.2.2 Métodos convencionais de soldagem a arco

A lista dos processos de soldagem aumenta cada vez mais com o passar dos tempos. Os principais processos de soldagem mencionados pela literatura (ASTM, 2015), dentre os quais são citados como fundamentais e amplamente utilizados pela indústria brasileira, são:

- Soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW);
- Soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW ou MIG/MAG);
- Soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW ou TIG);
- Soldagem com Arames tubulares (FCAW);
- Soldagem ao Arco Submerso (SAW) e
- Soldagem a Plasma (PAW).

Vários outros métodos de soldagem são identificados na literatura, como eletro-escória, soldagem de pinos, oxi-gás, feixe de elétrons, laser, entre outros. O método a ser utilizado no presente trabalho é o processo de soldagem GTAW.

O processo de soldagem popularmente conhecido no Brasil como TIG (acrônimo em inglês para tungstênio a gás inerte – *Tungsten Inert Gas*) é denominado no mundo por GTAW (acrônimo em inglês para soldagem a arco de gás tungstênio – *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*). Utiliza-se de um eletrodo não consumível de tungstênio para produzir a fusão dos metais por meio da fusão de material (soldagem). Este eletrodo chega a aproximadamente 3000 °C e é protegido da oxidação por uma atmosfera controlada por um gás inerte (argônio ou hélio) e normalmente protegido contra a fusão por refrigeração a água. Pode ou não haver um arame consumível para adicionar material fundido à junta soldada (WEMAN, 2012).

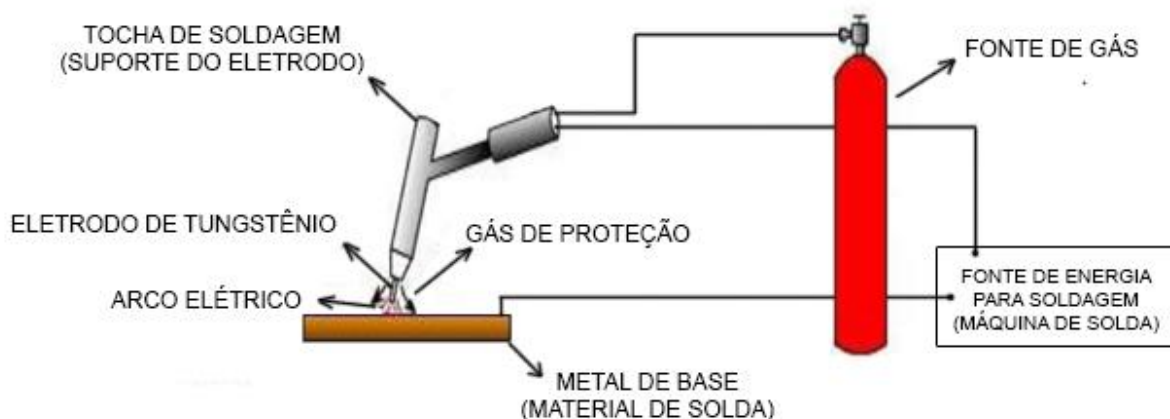
Uma variação do processo de soldagem GTAW, é o GTAW, onde a corrente varia em função de um padrão especificado com o objetivo de reduzir o aporte térmico.

2.2.3 Processo de soldagem GTAW pulsado

Assim como o processo GTAW comum, o processo GTAW pulsado também utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio - geralmente de dimensões 0,5 a 6,4mm de diâmetro e 150 a 200 mm de comprimento - para produzir um arco elétrico. A energia é fornecida por uma fonte, produzindo a energia elétrica para formar o arco elétrico. Este arco, com temperaturas acima das temperaturas de fusão das peças a serem soldadas, produz a união destas por solidificação da poça fundida. Uma vez determinados os parâmetros corretos e a tocha devidamente refrigerada, o eletrodo de tungstênio não funde devido seu elevado ponto de fusão. (ARPITA; VIKRAM, 2016).

Os valores de corrente e tensão são dependentes da fonte de energia DC que a máquina está sendo alimentada. Um desenho esquemático do processo de soldagem GTAW pode ser visualizado na Figura 6. Visualmente, o processo GTAW e GTAW pulsado são idênticos, com mudança apenas na categoria de corrente utilizada para a formação do arco elétrico.

Figura 6 – Desenho esquemático de um processo GTAW.



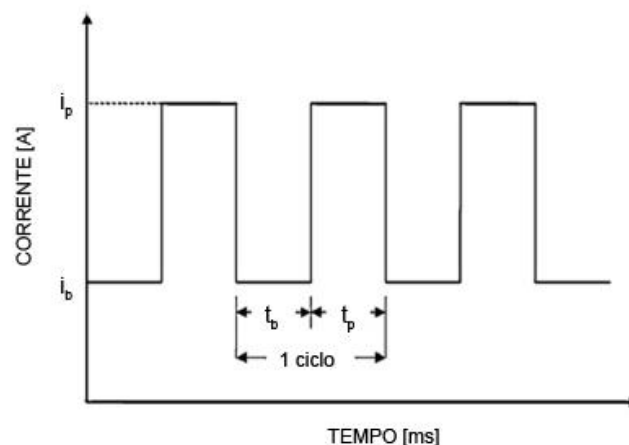
Fonte: Adaptado de Arpita; Vikram (2016).

O processo GTAW pulsado é uma variação do processo GTAW, denominado de PCGTAW (acrônimo em inglês para soldagem a arco de gás tungstênio com corrente pulsada – *Pulsed Current Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*).

Essa tecnologia, desenvolvida em meados de 1950, permite colocar a corrente de soldagem em um ciclo, de modo que ela percorra de um nível alto para um nível baixo em uma frequência regular selecionada. O nível alto da corrente de pulso é geralmente selecionado para dar penetração adequada e contorno do cordão, enquanto o nível baixo da corrente de fundo é definido em um nível suficiente para manter o arco estável. Isso permite que a energia do arco seja usada de forma eficiente para fundir um ponto de dimensões controladas em um curto período de tempo, limitando o desperdício de calor por condução para o material original adjacente como na soldagem de corrente constante normal (YOUSEFIEH; SHAMANIAN; SAATCHI, 2011).

É possível analisar esse modelamento da onda (corrente de pico, corrente de base, duração do pulso, frequência e porcentagem do tempo na corrente de pico) para processos de PCGTAW na Figura 7.

Figura 7 - Definição gráfica de parâmetros de controle GTAW de corrente pulsada



i_p = Corrente de pulso [A]
 i_b = Corrente de base [A]
 t_p = Duração da corrente de pulso [ms]
 t_b = Duração da corrente de base [ms]

$F = (t_b + t_p)^{-1}$ Frequência do pulso [Hz]
 % de tempo = Duração do pulso de corrente em um ciclo

Fonte: Adaptado de Yousefieh; Shamanian; Saatchi (2011).

Utilizando o método de corrente pulsada obtemos uma zona termicamente afetada menor, uma vez que a energia térmica necessária para fundir o material de base é fornecida apenas durante os pulsos de corrente de pico, permitindo que o calor se dissipe no material de base.

Devido a viabilidade de controle de energia transferida para a estrutura soldada, a técnica GTAW é um dos principais processos de união de aços inoxidáveis, austeníticos e ferríticos, os quais são necessários a minimização de transferência de energia. No entanto, a mudança microestrutural que ocorre durante a soldagem e na soldagem junta ainda é um grande desafio hoje, pois afeta tanto a resistência à corrosão e as propriedades mecânicas (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018). Deste modo, utilizar a metodologia GTAW na manufatura aditiva pode ser útil em questões de seleção de parâmetros, demonstrado a seguir.

2.2.4 Parâmetros de soldagem GTAW

A literatura define cinco parâmetros primários do processo GTAW, os quais são descritos a seguir:

- Corrente de Soldagem

Com o objetivo de controlar taxa de fusão do metal de adição e metal base, a profundidade de fusão e a geometria do cordão de solda, é possível afirmar que a corrente de soldagem é a variável mais influente no processo de soldagem a arco elétrico GTAW. A maioria das soldas GTAW emprega corrente contínua no eletrodo negativo (DCEN - polaridade direta) porque produz maior penetração de solda, profundidade e velocidade de deslocamento do que no eletrodo positivo (DCEP - polaridade inversa) (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018). Para PCGTAW, a corrente de soldagem se divide em duas, apresentando uma corrente de pico e corrente de base, conforme demonstrado na Figura 7.

- Tensão de Soldagem

É a diferença de potencial elétrico entre a ponta do eletrodo e a superfície da poça de fusão fundida. É possível realizar um ajuste manual ou automático da tensão, assim como a obtenção destes dados de maneira eletrônica. A tensão de soldagem

determina diretamente a forma da zona fundida e do reforço do cordão (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018).

- Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem nada mais é que a taxa de deslocamento do eletrodo ao longo da solda ou a taxa de deslocamento do trabalho, geralmente com unidade em [mm/min]. Ou seja, a velocidade de deslocamento da solda é o deslocamento do eletrodo pelo tempo de arco (TEWARI; GUPTA; PRAKASH, 2017). O controle da velocidade de soldagem é significativo para o controle do aporte térmico na peça. O aumento da velocidade de soldagem produz uma diminuição na área da seção transversal da solda e, conseqüentemente, a profundidade de penetração e largura de solda. Estudos sugerem que a velocidade de deslocamento influencia diretamente o volume de material fundido (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018).

- Gás de proteção

Os gases de proteção são utilizados nos processos de soldagem com a finalidade de evitar a contaminação atmosférica na zona fundida. Esta proteção gasosa garante estabilidade do arco elétrico, previne porosidade, formação de trincas na solda e alteração na composição química do material soldado. Gases com baixo potencial de ionização facilitam a ignição do arco elétrico e aqueles com baixa condutividade térmica tendem a aumentar a estabilidade do arco (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018).

Argônio (Ar) é o gás de proteção mais utilizado em processos de arco elétrico com adição de material, como por exemplo processos GTAW e GMAW. Possui baixo potencial de ionização e é mais pesado do que o ar, proporcionando uma excelente proteção da poça de fusão, principalmente para posições planas (a favor da gravidade). É chamado popularmente de “arco frio”. Para posições sobre a cabeça pode-se, por exemplo, utilizar um gás mais leve que o ar, como Hélio (He), popularmente chamado de “arco quente”. Essas definições de arco quente e arco frio são devido seu potencial de ionização, o qual é maior com He, atingindo temperaturas levemente maiores que o arco com Ar (SCOTTI; MONTEIRO, 2012).

- Metal de Adição

Geralmente os metais de adição para processos GTAW ou GMAW são adicionados a frio, automaticamente, de um rolo ou uma bobina. Mas para processos GTAW podem ser soldados com a adição de varetas manuais, ou até mesmo sem metal de adição e sem qualquer outro tratamento térmico. Para garantir as propriedades mecânicas, recomenda-se materiais de composição semelhante à do material original, todavia, a ductilidade das soldas é geralmente mais baixa do que o metal básico devido as condições de temperatura impostas (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018). De qualquer forma, o material de adição está relacionado com o objetivo da peça final ou da união soldada. A velocidade que o metal de adição é fornecido para a poça fundida também é um parâmetro influente no processo final. Para o processo PCGTAW, existe como variável a quantidade de alimentação de metal durante a corrente de pico e a corrente de base.

- Aporte Térmico

A quantidade de energia térmica fornecida a junta soldada é uma medida da energia transferida por unidade de comprimento de solda, geralmente dada pela unidade [KJ/mm]. Esta energia é diretamente proporcional a tensão e corrente e inversamente proporcional a velocidade de soldagem. Como apenas uma parte desta quantidade de energia é transferida para a peça, se faz necessário uma multiplicação por um fator, chamado de eficiência, o qual cada processo de soldagem apresenta seu valor único. Para processos GTAW, é possível considerar um valor médio de 0,6 (adimensional) (KUTELU; SEIDU *et al.*, 2018).

É importante também ressaltar que a taxa de resfriamento está diretamente ligada com a quantidade de energia fornecida à peça. Quanto maior a quantidade de calor, mais lenta é a taxa de resfriamento. Por outro lado, quanto menor a o aporte térmico, mais rápida será a taxa de resfriamento. Conseqüentemente, como o pré-aquecimento e a temperatura de interpasse, o aporte térmico é uma característica importante que influencia a taxa de resfriamento, e que pode afetar as propriedades mecânicas e a microestrutura metalúrgica da solda e da zona termicamente afetada (SUBODH; SHASHU, 2011).

2.2.5 Metalurgia da soldagem

A operação de soldagem causa alterações localizadas no material devido a utilização de um gradiente de temperatura elevado que é transferido ao material. Para compreender todas as alterações metalúrgicas em uma solda, se faz necessário o entendimento de alguns conceitos básicos iniciais como ZF (Zona Fundida), ZTA (Zona Termicamente Afetada), MB (Metal Base), Diluição e Reforço, dispostos na Figura 8 e Figura 9 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012) da seguinte maneira:

- Zona Fundida (ZF)

Também caracterizada como poça fundida, é a região onde o material foi fundido durante a soldagem. É a região onde o material atingiu as maiores temperaturas.

- Zona Termicamente Afetada (ZTA)

É a região na qual não ocorreu o processo de fusão fundida do metal base, mas a microestrutura e/ou as propriedades do material foram alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. Nesta região, as temperaturas são elevadas o suficiente para ultrapassar as temperaturas críticas de mudança de fase do metal base.

- Metal Base (MB)

É a região do metal base mais afastado da zona fundida, a qual não é afetada pelo ciclo térmico gerado pela soldagem.

- Diluição

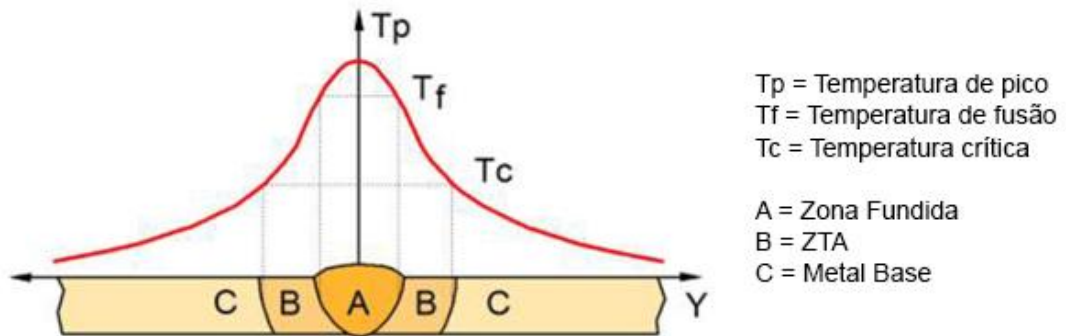
A ZF é formada por uma mistura líquida do metal base e do metal de adição na poça de fusão. Define-se como coeficiente de diluição a proporção com que o metal base participa da zona fundida, sendo a massa fundida do metal base pela massa total do cordão de solda.

- Reforço

É o metal de solda em excesso da quantidade necessária para preencher uma junta. Por mais que ainda seja uma mistura do material de adição com o metal base, é formada predominantemente pelo metal de adição fundido e solidificado.

Na Figura 8 são abordados esses conceitos, apresentando uma macroestrutura esquemática da seção transversal de um cordão de solda, sendo possível identificar a ZTA e sua curva de temperatura.

Figura 8 - Macroestrutura esquemática de um cordão de solda

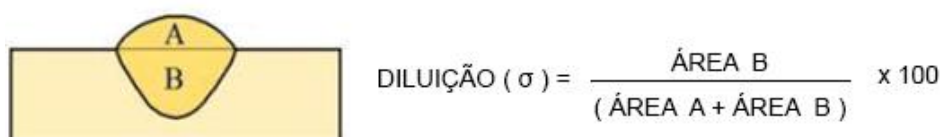


Fonte: Adaptado de Modenesi; Marques; Santos (2012).

Após a solidificação, a zona fundida apresenta uma microestrutura resultante das interações ocorridas no metal líquido como a absorção de gases provenientes na atmosfera de soldagem no momento da fusão, reações com outros componentes da superfície e interior da peça e metal de adição, além de possíveis transformações ocorridas durante o resfriamento da solda, como precipitados (LANCASTER, 1999).

A diluição é, conceitualmente, a fração das áreas proporcionais às quantidades de metal base e de adição (denominado também de reforço) solidificados, obtidos por uma macrografia da seção transversal da solda, demonstrados na Figura 9. Na soldagem multipasse, a diluição obtida é apenas um valor médio, pois a diluição apresenta variação em função da quantidade de passes, tendendo a ser maior no passe de raiz e menor nos passes de acabamento. A quantidade do valor de diluição é diretamente proporcional a quantidade de energia transferida para a peça (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Figura 9 - Aspecto da seção transversal de um cordão de solda



Fonte: Adaptado de Modenesi; Marques; Santos (2012).

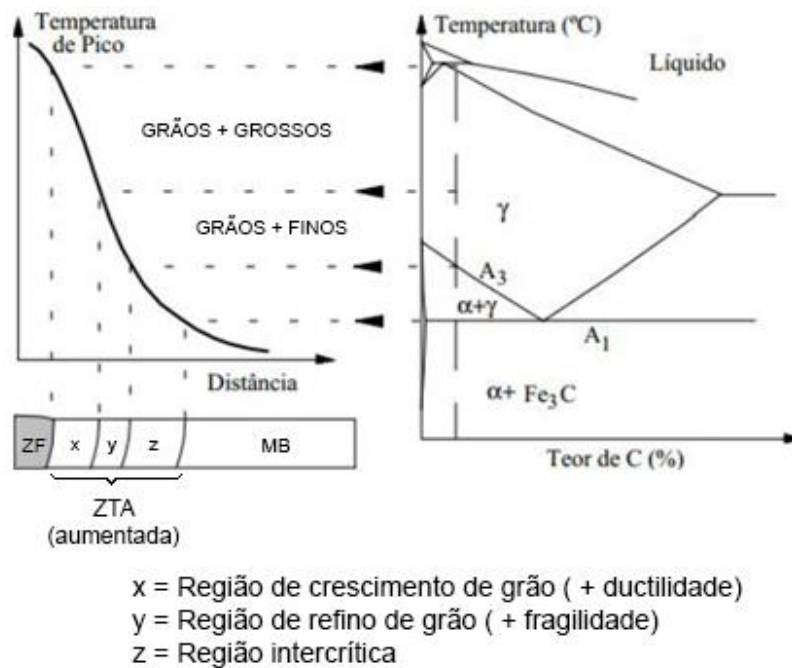
Além disso, para o caso do processo de soldagem em manufatura aditiva (soldagem em vários passes), o aquecimento dos passes já depositados por um novo passe causa mudanças adicionais na estrutura da zona fundida. É possível afirmar que esta estrutura será constituída por inclusões e, eventualmente, poros e outras descontinuidades decorrentes da segregação e da formação de precipitados diversos em uma matriz de grãos colunares e grosseiros (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

A velocidade de resfriamento da estrutura soldada é um fator importante na determinação da microestrutura a ser gerada. É comum a microestrutura de aços sofrerem transformações de fase durante o resfriamento.

A distribuição de energia térmica em uma junta soldada é de extrema importância para compreender como a metalurgia de soldagem ocorre em um componente soldado. Quanto maior a velocidade de resfriamento de um aço, mais frágil ela fica, e maior a tendência de gerar microestrutura martensítica, sendo necessário o revenimento e outros tratamentos térmicos especiais, em função dos elementos de liga (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Uma maneira de alterar a estrutura cristalina de um material metálico é o fornecimento de energia térmica e a velocidade que essa energia é dissipada, afetando diretamente a região de crescimento de grão (PADILHA, 2000).

A região de crescimento de grão e velocidade de resfriamento está descrito graficamente na Figura 10. É importante ressaltar que a quantidade de carbono influencia diretamente no comportamento microestrutural do aço e cada material terá um comportamento diferente. A representação da Figura 10 está retratada de maneira geral para aços hipoeutetóides.

Figura 10 - Região de crescimento de grão



Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch (2020).

Durante o resfriamento final de uma estrutura soldada, a austenita presente no aço é decomposta em diferentes agregados de ferrita e carbonetos, podendo formar martensita dependendo da composição química e condições de resfriamento (resfriamento rápido). O elevado tamanho de grão da austenita e o resfriamento rápido associado com a maioria das condições de soldagem dificultam a nucleação da ferrita, a qual tende a ocorrer com super-resfriamentos relativamente elevados, favorecendo a formação de martensita. Além disso, a grande quantidade de inclusões favorece a nucleação intragranular da ferrita. Os diferentes tipos de constituintes formados na ZF têm importante papel na determinação das propriedades mecânicas da solda, particularmente a sua tenacidade. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Por sua vez, o processo de soldagem GTAW, devido à grande quantidade de energia térmica envolvida em seu processo, pode induzir muitas trincas na ZTA da solda de materiais com elevado carbono, o que é prejudicial ao desempenho estrutural de ferramentas e matrizes. Reduzir a quantidade de energia fornecida ao material soldado resulta na diminuição de trincas na ZTA e na zona fundida (EBRAHIMNIA; BAGHJARI *et al.*, 2018).

2.3 Manufatura Aditiva de Peças Metálicas

A ASTM define como “Manufatura Aditiva” MA (em inglês, *Additive Manufacturing – AM*) como o conjunto de tecnologias que utiliza uma abordagem camada por camada para criação de peças com forma livre; da base ao topo, dando forma física a um modelo em três dimensões previamente desenvolvida em um arquivo digital (ASTM, 2015).

Um processo de manufatura aditiva por soldagem de uma peça metálica é demonstrado na Figura 11, utilizando um braço robótico para a confecção da geometria e controle das camadas.

Figura 11 - MA de um componente metálico utilizando braço robótico



Fonte: Carter (2020).

Muito difundida em nossa sociedade com as “impressoras 3D”, as quais utilizam filamento de polímero como material primário de confecção de suas peças, a manufatura aditiva também atua em processos de fabricação de componentes metálicos, com algumas diferenças significativas. A classificação destes processos é mostrada a seguir.

2.3.1 Técnicas de manufatura aditiva

Para a confecção de peças utilizando os processos MA, inicialmente é necessário a confecção digital da peça, por Softwares CAD (*Computer Aided Design*), passando então para Softwares CAM (*Computer Aided Manufacturing*), o qual divide a peça em várias camadas e gera um código guia para o dispositivo a ser feita a soldagem. A etapa em CAM pode ser substituída por softwares das máquinas de solda, robôs ou até mesmo manualmente (para peças mais simples), conforme demanda.

Com base no padrão ASTM, os processos de MA são classificados em sete categorias (ASTM, 2015):

- I – Fotopolimerização em cuba (*VAT Photopolymerisation*);
- II – Laminação de Folha (*Sheet Lamination*);
- III – Jateamento de ligante (*Binder Jetting*);
- IV – Jateamento de material (*Material Jetting*);
- V – Extrusão de Material (*Material Extrusion*);
- VI – Fusão em Leito de Pó (*PDB - Powder Bed Fusion*) e
- VII – Deposição de energia direta (*DED - Direct Energy Deposition*)

Dentre as categorias demonstradas, as metodologias mais comuns de manufatura aditiva para componentes metálicos são: fusão em leito de pó, laminação de folha e deposição de energia direta.

Outras metodologias como Jateamento de ligante e de material também admitem materiais metálicos, porém para situações que exigem uma demanda específica.

- Fusão em Leito de Pó (*PDB - Powder Bed Fusion*)

Este processo consiste no espalhamento do material em forma pó sobre uma mesa, de maneira homogênea e espessura controlada. Essa espessura do espalhamento de pó será a altura da camada que será construída. Existem diferentes mecanismos para permitir isso, como um rolo ou uma lâmina. Após esta primeira deposição, uma fonte de calor é utilizada para sinterizar as partículas de pó, solidificando a geometria demandada. Após a união das partículas da primeira

camada, outra camada de pó é espalhada por cima da anterior e o processo ocorre novamente e sucessivamente para todas as próximas camadas. A fonte de calor utilizada para esses procedimentos normalmente é o Laser, mas também podem ser utilizadas fontes de Feixe de Elétrons (GIBSON; STUCKER; ROSEN, 2010).

- Laminação de Folha (*Sheet Lamination*);

É uma forma de manufatura aditiva a qual utiliza dos princípios do empilhamento e laminação em folhas de materiais com espessuras muito finas para produzir peças tridimensionais camada a camada. As camadas de material podem ser fundidas usando uma variedade de métodos, os quais energia térmica e sonora são comumente usados como fonte. O método mais adequado depende do material em questão, com papel, polímeros e metais, todos usados na laminação de folhas.

- Deposição de energia direta (DED - *Direct Energy Deposition*)

Este método abrange várias terminologias, como: “modelagem de rede projetada a laser, fabricação de luz direcionada, deposição direta de metal e revestimento a laser 3D”. Máquinas de MA por DED consistem basicamente em um bico - tocha de soldagem, por exemplo - montado em um braço multieixo, o qual deposita o material fundido na superfície especificada, onde se solidifica ponto a ponto, formando a geometria desejada. Além da criação de peças, é comumente utilizado também para reparar ou adicionar material adicional aos componentes existentes (GIBSON; STUCKER; ROSEN, 2010).

A deposição de energia direta requer arame ou matéria-prima em pó e uma fonte de energia, normalmente um feixe de elétrons, arco de plasma ou laser (DINOVITZER; CHEN *et al.*, 2019).

Dentre os principais métodos de utilização da deposição direta de energia, está o processo de soldagem WAAM, demonstrado a seguir.

2.3.2 Processo de manufatura aditiva WAAM

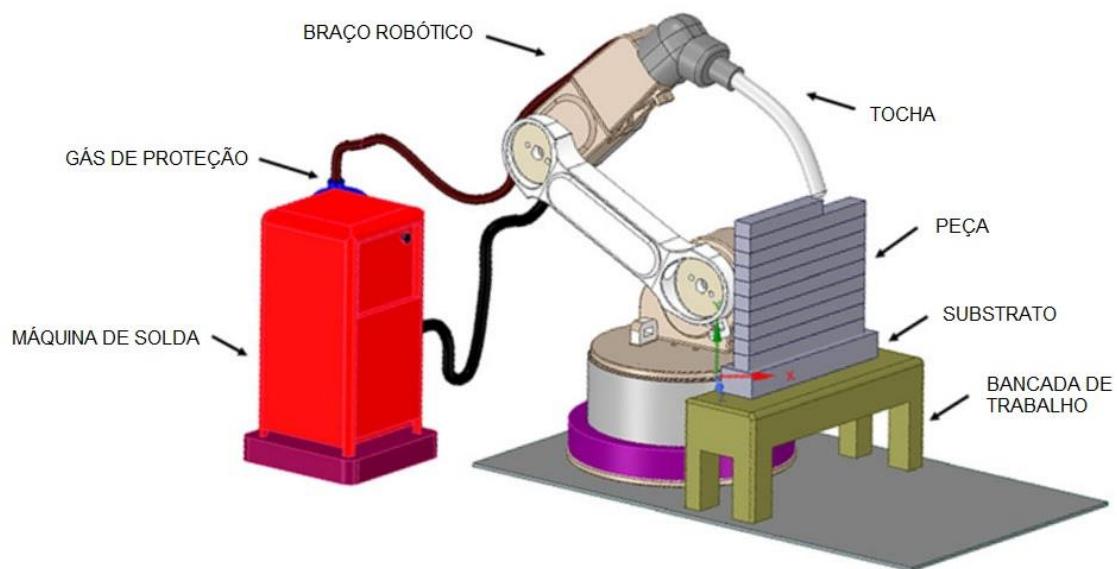
O Processo de fabricação aditiva de arco elétrico (WAAM – Em inglês, *Wire Arc Additive Manufacturing*), ou processo de soldagem WAAM, consiste na união da tecnologia de manufatura aditiva com o processo de soldagem, que adota o material

e a fonte de calor proveniente da tecnologia de soldagem somado ao método da teoria MA. É um processo de deposição de energia direta que usa matéria-prima de arame metálico, analogamente a impressão 3D de polímero. Porém, se faz necessário uma fonte de energia de maior intensidade, para alcançar o ponto de fusão deste metal. Essa fonte de energia pode ser alcançada de diversas formas, incluindo soldagem a arco elétrico, como os processos GMAW e GTAW, e arco plasma PAW. (DING; PAN *et al.*, 2015).

Comparado com o modo de processamento tradicional de montagem de matéria-prima (remoção de material ou métodos de solidificação tradicionais), o WAAM é um método de fabricação “*bottom-up*” (de baixo para cima) por meio do acúmulo de materiais (PARVARESH; MIRESMAEILI; YAZDIZADEH, 2020).

A Figura 12 demonstra um esquemático para melhor visualização do processo WAAM.

Figura 12 – Desenho esquemático de manufatura WAAM



Fonte: Adaptado de Raut; Taiwade (2021).

Ultimamente, a demanda por manufatura aditiva de arco de arame (WAAM) tem aumentado consideravelmente, tornando-se uma alternativa promissora à manufatura subtrativa. Estudos mostram que as propriedades mecânicas do material do arco de arame manufaturado aditivamente são comparáveis ao material forjado ou fundido (RAUT e TAIWADE, 2021). Contudo, além dos parâmetros de controle do processo

de soldagem propriamente dito, é necessário controlar alguns fatores intrínsecos do processo de manufatura aditiva.

2.3.3 Parâmetros de deposição do Processo WAAM

Seja qual for o processo de MA, o principal desafio para todos os processos MA com alimentação de arame vem das tensões residuais e distorções geradas durante o processo MA. Esses fenômenos são causados pela entrada excessiva de energia, alta taxa de deposição e grande gradiente de temperatura durante os processos de MA com alimentação de arame. (DINOVITZER; CHEN *et al.*, 2019) Desse modo, entender seus parâmetros e características é primordial para o resultado desejado ao criar uma peça.

Além dos parâmetros intrínsecos do processo de soldagem como velocidade de soldagem, taxa de alimentação do arame, distância de trabalho, tensão e corrente do arco, se faz necessário a estratégia de deposição e planejamento do caminho de soldagem. Esse caminho que a tocha percorre entre as camadas é um termo comumente chamado de “*toolpath*”, do inglês caminho da ferramenta (tocha de soldagem).

2.3.3.1 Geração do caminho da tocha

Vários níveis de estudo de geração de *toolpath* são vistos na literatura, desde a criação de softwares para um algoritmo de planejamento de caminho até estudos de caso para garantir qual a melhor trajetória capaz de gerar o caminho de ferramenta mais contínuo, sem sequências de início e parada, garantindo assim o preenchimento completo no espaço (DING; PAN *et al.*, 2014). Conhecer e interpretar o melhor caminho da tocha para a confecção dos cordões de solda se faz necessário para minimizar ou até mesmo evitar alguns defeitos intrínsecos do processo de soldagem, onde cada caminho apresenta sua vantagem e desvantagem.

A literatura apresenta um estudo de um resumo dessas vantagens e desvantagens por alguns métodos de geração de *toolpath*, demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Sumário de métodos de caminhos de tocha para MA

MÉTODO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Varredura Paralela	+A	-B, -C, -D
Zigue-Zague	+A	-B, -C, -D
Contorno de forma	+B	-A, -C
Espiral	+C	-A
Curva Fractal	+C	-A, -D
Contínuo	+C	-A, -D
Híbrido	+A, +B	-C, -D
Principais indicadores de desempenho de métodos de geração de caminho de ferramenta		
A - Fácil implementação e algoritmo simples		
B – Precisão geométrica boa		
C – Menos passes da tocha de soldagem		
D – Menos elementos de passes		

Fonte: Adaptado de Ding; Pan et al. (2014).

A técnica de varredura paralela baseia-se na projeção de raios planares ao longo de uma direção. As regiões do plano são preenchidas por um conjunto de linhas de varredura com largura finita. É comumente empregado em sistemas de MA comerciais devido à sua simples implementação e adequação (DUNLAVEY, 1983; DING; PAN *et al.*, 2014).

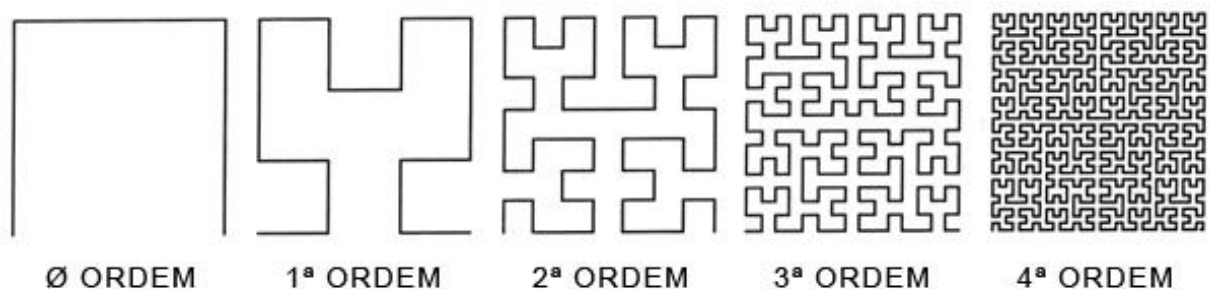
A geração de caminho de ferramenta em zigue-zague é o método mais popular usado em sistemas MA comerciais. Enquanto ele preenche geometrias linha por linha ao longo de uma direção como a abordagem de varredura paralela, a abordagem em ziguezague combina as linhas paralelas separadas em uma única passagem contínua que reduz significativamente o número de passagens do caminho da ferramenta (YANG; LOH *et al.*, 2002). Desse modo, a produtividade do processo de MA é otimizado, reduzindo os movimentos de transição necessários da máquina, mas comprometendo em partes a precisão do contorno da peça devido aos erros de discretização em qualquer aresta que não seja paralela à direção do movimento da ferramenta (DING; PAN *et al.*, 2014).

A geração do *toolpath* por contorno de forma, o qual também é um método típico, pode resolver o problema de qualidade geométrica acima de forma eficaz,

seguindo a tendência geométrica dos contornos de fronteira, uma vez que este pode ser gerado por métodos de comando numérico computadorizado (interpolação CNC) (YANG; LOH *et al.*, 2002).

Outro método de planejamento do caminho da ferramenta é baseado em curvas de preenchimento do espaço fractal. Estudos aplicando caminhos de ferramenta baseados em curva de Hilbert ao processo de modelagem por deposição fundida verificaram ser úteis na redução do encolhimento durante os processos de fabricação de MA (BERTOLDI; YARDIMCI *et al.*, 1998). No entanto, o grande número de movimentos de viragem na direção do caminho que são produzidos usando esta estratégia não são adequados para WAAM (DING; PAN *et al.*, 2014). Na Figura 13 é possível visualizar as curvas de Hilbert, as quais demonstram uma estratégia de *toolpath* de preenchimento do espaço fractal gerado por algoritmo exponencial em *software MatLab*®.

Figura 13 - Geração de caminho por curvas de Hilbert



Fonte: Bertoldi; Yardimci *et al.* (1998).

De maneira simples, um caminho único e contínuo também é considerado um planejamento de caminho de ferramenta. Pode ser uma mistura de formas geométricas (polígonos) junto com zigue-zagues. Porém empregar esta técnica puramente curvas baseadas em ziguezague teria um problema de precisão de superfície (ZHANG; CHEN *et al.*, 2003). A literatura ressalta a importância de preencher o contorno da camada com movimentos vetoriais em métodos de WAAM (DING; PAN *et al.*, 2014).

Um exemplo de estratégia de planejamento de caminho híbrido é a combinação de contorno e padrão de zigue-zague é comumente desenvolvida para atender aos requisitos de precisão geométrica e eficiência de construção (DING; PAN *et al.*, 2014). Estudos mostram o desenvolvimento de algoritmos de imagem para MA

baseados em soldagem. A abordagem planejada inclui um caminho em ziguezague interno que é mais rápido e universal e um caminho vetorial de contorno que é muito útil para manter a precisão e qualidade da superfície (ZHANG; CHEN *et al.*, 2003).

2.3.3.2 Aporte térmico em processos WAAM

Outro parâmetro para confecção de peças metálicas por manufatura aditiva, por mais que seja indireto, é a pausa de tempo entre a confecção das camadas, devido a quantidade de energia transferida para a peça. Não respeitar essa pausa sem o ajuste de corrente e/ou tensão, transfere para a peça a mesma quantidade de energia já transferida anteriormente. Como o cordão já está com uma parcela da energia anterior, a enorme quantia de energia térmica transferida para a peça provoca um descontrole da poça fundida. Autores demonstraram que, caso não houver essa pausa entre os passes, é necessário 20% de decréscimo da fonte de calor para produzir uma deposição uniforme. (DINOVITZER; CHEN *et al.*, 2019)

Também é ressaltado pela literatura erros de geometria induzidos pelas camadas inferiores, sendo somados à medida que outras camadas são adicionadas. Para superar o problema da irregularidade superfície induzida por procedimentos de início e término de arco, é ajustada a deposição parâmetros nas porções inicial e final dos caminhos de solda para controlar de forma flexível o cordão de solda geometria (ZHANG; CHEN *et al.*, 2003).

2.3.4 Vantagens do processo WAAM

Em comparação com outras fontes de fusão, WAAM oferece uma economia significativa de custos e uma taxa de deposição mais alta. No entanto, existem desafios significativos associados ao WAAM, como microestruturas e propriedades mecânicas indesejáveis, altas tensões residuais e distorção (RAUT e TAIWADE, 2021). Desta forma, se faz necessário um maior número de estudos e pesquisas para trabalhar com os desafios citados, otimizando os parâmetros do processo e o tratamento térmico pós-deposição.

Todavia, a literatura demonstra méritos ao método WAAM quanto a alta eficiência de produção, relativo baixo custo de equipamento e alto grau de automação, conquistando espaço rapidamente nos setores da indústria aeroespacial e biomédica (BHARAT KUMAR; ANANDAKRISHNAN, 2020)

Além disso, pelo fato do processo WAAM utilizar uma fonte de calor (arco elétrico) em um braço multieixo, faz com que essa metodologia de fabricação tenha a capacidade de fabricar peças de grande tamanho e estruturas complexas. Por outro lado, justamente devido a esta elevada entrada de calor a arco tradicional, a formação do perfil de metal fundido é de difícil controle, resultando em baixa precisão dos componentes, sendo necessário o estudo do perfil de formação de cordões de solda com baixo consumo de calor. (HEJRIPOUR; BINESH *et al.*, 2019)

Pesquisadores tem investigado a precisão das peças produzidas pela WAAM, desde o controle do tamanho e frequência da gota fundida até sistemas de controle que incluiu planejamento, implementação de sistema e pós-processamento adotando soldagem a arco (ZHANG; CHEN *et al.*, 2003).

Algumas outras vantagens são registradas ao utilizar WAAM em relação a outras formas de MA metálico, como o baixo custo de capital associado às máquinas e a flexibilidade na composição do material. Os sistemas WAAM podem ser construídos a partir de componentes disponíveis comercialmente, incluindo um sistema robótico controlado por computador, uma fonte de energia de soldagem, uma tocha de soldagem e um sistema de alimentação de arame. Este relativo baixo custo inicial torna WAAM uma solução possível na produção em grande escala, bem como em pequenas oficinas de máquinas para fins de manufatura e reparo. Além disso, os arames de metal são mais baratos, mais facilmente disponíveis e mais seguros de manusear do que a alternativa de pó de metal, mantendo baixos os custos operacionais e de capital (DINOVITZER; CHE, *et al.*, 2019). Os processos de alimentação de arame AM, incluindo WAAM, fornecem uma taxa de deposição mais alta do que outras formas de fabricação de aditivos metálicos, como sistemas baseados em pó (DING; PAN *et al.*, 2015).

Estudos também demonstram outras vantagens na aplicação de tecnologia de planejamento automatizado no caminho da tocha de soldagem. Para a obtenção um cordão de deposição uniforme e contínuo com o mínimo de intervenção manual, aplica-se a otimização do processo, melhorando a precisão da superfície e minimizando os defeitos causados pelo tamanho impreciso (DWIVEDI; KOVACEVIC, 2004). Assim, com o aprimoramento das técnicas e estudos ao longo dos tempos, o método WAAM mostra uma tendência de cada vez mais contribuir para o cenário da fabricação mecânica.

2.4 Aços Ferramentas

Normalmente empregado em processos de conformação a quente de metais, como em matrizes de forjamento, extrusão e fundição sob pressão (BARBOSA; MESQUISTA, 2007), a literatura define aço ferramenta como qualquer aço carbono, ou aço rápido, capaz de ser endurecido e temperado, apresentando assim propriedades de elevada dureza. Geralmente são fundidos em fornos elétricos e produzidos sob práticas já conhecidas com a finalidade de atender a requisitos especiais. Aços ferramenta também são usados em uma ampla variedade de outras aplicações onde a resistência ao desgaste, resistência, tenacidade e outras propriedades são selecionados para o melhor desempenho (ROBERTS; ROBERT e KENNEDY, 1998).

Existe uma diferenciação importante de aços ferramenta de baixa liga endurecidos por têmpera e revenimento dos aços ferramenta de alta liga já endurecidos. Embora associar estes dois aços seja válido, a literatura recomenda a utilização de aços de alta liga para utilização que demanda precisão, e aços de baixa liga apenas para ferramentas manuais (ROBERTS; ROBERT e KENNEDY, 1998). As propriedades mecânicas como uma alta dureza atrelada a uma boa tenacidade e a resistência a abrasão, são propriedades desejadas no material de fundamental importância para a correta escolha do aço. Porém, algumas características gerais como por exemplo a homogeneidade de composição química e microestrutura, são determinantes para a garantia destas propriedades (OLIVEIRA, 2018).

Na utilização em matrizes e conformação a quente, por exemplo, a resistência a deformação plástica do aço ferramenta é essencial, pois retarda falhas por desgaste, deformação plástica e fadiga térmica (BARBOSA; MESQUISTA, 2007).

De maneira geral pode-se definir os aços ferramenta como uma classe de aços utilizados para transformação de outros materiais e com uma importante aplicação dentro da indústria. A correta escolha do aço ferramenta para trabalhar em condições de trabalho a frio e trabalho a quente, é a garantia de que o desempenho esperado será atendido (OLIVEIRA, 2018).

2.4.1 Classificação dos aços ferramenta

Aços ferramenta estão classificados de acordo com a AISI (*American Iron and Steel Institute*) em função da aplicação comercial demandada pela indústria. Devido suas propriedades de elevada resistência ao desgaste, alta dureza e alta resistência à deformação plástica, é comum observar a utilização de aços ferramenta em aplicações genéricas, não-ferramental, como molas, ímãs, rolamentos ou mesmo aplicações estruturais (ROBERTS; ROBERT; KENNEDY, 1998).

Embora exista esta enorme quantidade de aços ferramentas, o Quadro 2 demonstra a classificação de aços ferramenta mais comuns utilizados comercialmente.

Quadro 2 - Classificação geral de aços ferramentas

Classe AISI	Classe comum	Definição	Aplicação comum
W	W2, W360, W390	Temperável em água	Matrizes de cunhagem
S	S1, S2, S3, S6, S7	Resistente a impacto (Médio C)	Facas para corte
P	P20, P50, P240	Aços para moldes e matrizes	Moldes
H	H11, H12, H13, H20	Trabalho a quente	Matrizes quentes
D	D2, D3, D5, D6, D7	Trabalho a frio (Alto C, Cr)	Conformação mecânica
O	O1, O2, O3, O6	Temperável ao óleo	Ferramentas de corte e dobra
A	A1, A2, A3, A6	Temperável ao ar	Conformação mecânica
T	T1, T15	Aço rápido, ligado ao W	Ferramenta de corte
M	M2, M35	Aço rápido, ligado ao Mo	Ferramenta de corte

Fonte: Adaptado de Roberts; Robert; Kennedy (1998) e Maciel; França; Naves (2004).

A classificação das ferramentas fabricadas por metalurgia do pó determinados por similaridade entre composição química e aplicações a serem submetidas, como classe aço rápido, aços para trabalho a frio, aços para trabalho a quente (conhecido mundialmente pelo termo em inglês *hot work steel*), aços para moldes de injeção, ligas para mercado aeroespacial, automotivo e aplicações especiais, além de aplicações em energia, óleo e gás (PAZ, 2016).

Desse modo, a classificação dos aços ferramenta apresenta níveis de maior detalhamento. Porém, apesar de existir essa extensa classificação, a indústria de ferramentaria utiliza uma quantidade reduzida de tipos de aços, os quais apresentam

propriedades e desempenho consagrados ao longo do tempo, como por exemplo, o H13, D6 e M2 (GABARDO, 2018).

Uma vez compreendido a classificação dos aços ferramenta, se faz necessário revisar um pouco mais sobre o material a ser estudado.

2.4.2 Aço ferramenta VP50IM

O aço VP50IM, próximo a norma AISI P50, foi desenvolvido especialmente para a fabricação de moldes para a injeção de termoplásticos. Sua usinabilidade elevada ocorre pelo seu fornecimento ocorrer no estado esferoidizado, para posterior envelhecimento, ou solubilização e envelhecimento, dispensando o tratamento térmico final. Solubilizado, possui dureza de 30-35 HRC e envelhecido, 40-42 HRC (VILLARES, 2004).

A literatura compara o aço VP50IM ao AISI P20, dois aços ferramenta amplamente utilizados na indústria de injeção de plástico, pela grande compatibilidade de propriedades mecânicas relacionadas a confecção de matrizes de injeção de plástico (PRECIADO; BOHORQUEZ, 2006).

A composição química nominal do aço VP50IM fornecida pelo fabricante é observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química Aço VP50IM fornecida pelo fabricante

Elemento	Si	Mn	Mo	Ni	Al	Cu	S
[%]	0,3	1,5	0,3	3,0	1,0	1,0	0,1

Fonte: Villares (2004).

O aço VP50IM foi desenvolvido para fornecer uma excelente resposta a soldagem, com arames de solda desenvolvidos especialmente para processos de soldagem TIG. Todavia, o fabricante recomenda o envelhecimento da matriz após deposições do cordão de solda para aumento de dureza e homogeneização. Com isso, as diferenças de dureza entre a região de solda e o corpo da peça são desprezíveis. Deste modo, a resposta ao espelhamento e a texturização não se modificam ao longo do cordão de solda (VILLARES, 2004). De qualquer forma, a literatura recomenda que, após a soldagem em um molde de injeção, deve-se aplicar polimento para o metal de solda não apresentar diferenças significativas na

composição e dureza em relação ao substrato em que foi soldado, para as marcas dos cordões de solda não serem reveladas à peça a ser injetada.

Para aços ferramenta em geral, um substrato endurecido pode ser sensível às tensões de tração residuais acumuladas que podem eventualmente induzir trincas (ROBERTS; ROBERT; KENNEDY, 1998), sendo necessário estudar sobre a soldagem de aços ferramentas em geral.

2.4.3 Soldagem de aço ferramenta

Devido à alta dureza, alto teor de carbono e, na maioria das vezes, apresentarem microestrutura martensítica, estes materiais são muito sensíveis ao choque térmico produzido na soldagem por fusão. Para minimizar a quantidade de energia transferida para a peça, estudos de diferentes entradas de calor são utilizados para deposição para reduzir os efeitos à metalurgia do material, reduzindo sua zona termicamente afetada (EBRAHIMNIA; BAGHJARI, *et al.*, 2018).

Segundo a literatura, para a obtenção de bons resultados na soldagem de aços ferramenta, é necessário posicionar corretamente o revenimento do passe e sempre utilizar passes de alta sobreposição na segunda camada com a mesma energia de soldagem em todos os passes. A soldagem de passagem única não é recomendada para reparar aços ferramenta, dado as diferenças de dureza e microestrutura que a ZTA e o material soldado apresentam em relação ao metal base, prejudicando a qualidade da superfície espelhada e da textura (SUAREZ; SUAREZ; PRECIADO, 2015).

Uma solda em uma superfície a ser texturizada, como uma matriz de injeção de plástico, por exemplo, deve ser feita com um metal de adição de composição semelhante de preferência com teor de carbono ligeiramente menor que o metal base. Pré-aquecer o metal base apresenta influência positiva em relação à diminuição da diferença de dureza entre a base e os metais de solda (PRECIADO; BOHORQUEZ, 2006).

Outro fator a ser levado em consideração é a fissuração por hidrogênio. Durante a soldagem, o hidrogênio proveniente de umidade por exemplo, são dissociadas no arco, onde é absorvido pela poça de fusão difundindo-se no aço, atingindo regiões da ZF e da ZTA, promovendo fragilização da microestrutura devido

sua presença. Esse fenômeno adjunto de tensões residuais ou externas promove fissuras e/ou trincas por fragilidade (LANCASTER, 1999).

A fissuração por hidrogênio é inevitável quando ocorrem três fatores combinados: (i) presença de hidrogênio na região da solda; (ii) formação de microestrutura de elevada dureza, capaz de ser fortemente fragilizada pelo hidrogênio; (iii) solicitação de tensões residuais e externas (LANCASTER, 1999). Devido o aço ferramenta apresentar dureza relativamente elevada, é necessário a atuação para minimizar a chance de fissuração, como do controle da velocidade de resfriamento principalmente em processos de MA em aços ferramenta.

2.4.4 Manufatura aditiva de aços ferramenta

Além dos cuidados relacionados a soldagem de aço ferramenta, utilizar tais aços para MA na confecção de ferramentas necessita de uma atenção maior em relação aos parâmetros de soldagem, em principal na quantidade de calor.

A entrada de calor ideal pode resultar em melhores propriedades microestruturais e mecânicas em peças confeccionadas por WAAM. A redução do aporte de calor contribui com a precisão geométrica da peça depositada e a taxa de deposição, assim como a relação largura/altura pode ser menor com menor aporte térmico, devido a poça fundida ter um tempo mínimo para se espalhar (RAUT; TAIWADE, 2021). Definir parâmetros do processo de soldagem com a finalidade de controle da taxa de energia térmica depositada à peça soldada se faz necessário para a confecção de uma ferramenta por manufatura aditiva.

Em manufatura aditiva de aços ferramentas, se faz necessário o controle de alguns parâmetros não primários, como exemplo o tempo a temperatura e tempo interpasse. Apesar de não ser uma variável parametrizada diretamente em máquina, estudos demonstram que a variação de temperatura ou tempo do interpasse apresenta influência no tamanho de grão gerado durante a solidificação, devido mudança no tratamento intrínseco ocorrido, mudando microestrutura gerada e por consequência, as propriedades mecânicas da peça final (RAFIEAZAD; NEMANI *et al.*, 2021). Ao efetuar MA em aços ferramentas, é comum observar a estrutura martensítica parcialmente temperada devido ao reaquecimento quando uma nova camada depositada, além do fluxo térmico repetitivo facilitar a difusão dos elementos

de liga, levando ao engrossamento dos precipitados, podendo ocasionar a fragilização de corpos de prova submetidos a ensaios de tração devido à concentração de tensões geradas nestas regiões (HACKENHAAR; MAZZAFERRO *et al.*, 2022).

Devido ao grande aporte térmico envolvido em peças de MA, estudos são realizados para avaliar a distribuição da temperatura no material depositado, muitas vezes utilizando elementos finitos. Para caminhos de tocha onde há ida e volta sem pausa, observa-se uma concentração de temperatura e calor foi observada nos pontos de virada do caminho de deposição do metal (GOKHALE; KALA, 2021). Desse modo, entender e estudar os parâmetros do processo de MA é essencial para a fabricação de ferramentas utilizando este processo de fabricação.

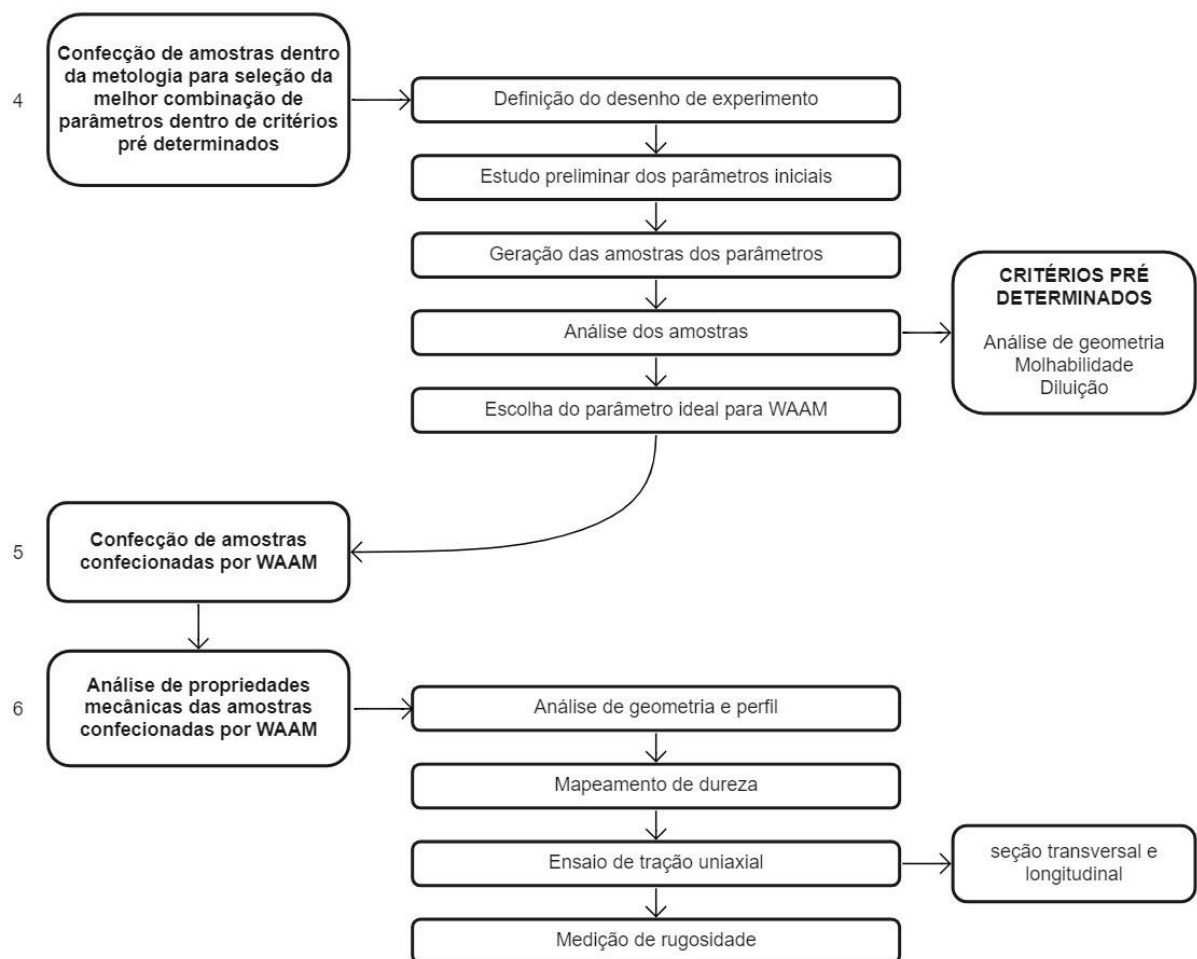
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa-qualitativa e de caráter exploratório, que utiliza procedimentos de forma experimental.

Os procedimentos e metodologias utilizados para a preparação e confecção das amostras de aço VP50IM são explicitados neste capítulo. São descritos os métodos de caracterização da geometria e microestrutura, além dos métodos de preparação e de realização dos ensaios de microdureza e tração, para determinação da resistência mecânica do empilhamento realizado por cordões soldados camada a camada.

Para alcançar os objetivos do trabalho, as etapas 4 e 6 demonstradas na estrutura do trabalho pela Figura 4, foram subdivididas. Esta subdivisão é demonstrada na Figura 14.

Figura 14 - Metodologia de preparação das amostras



Fonte: Autoria Própria (2021).

3.1 Planejamento do Experimento (DOE)

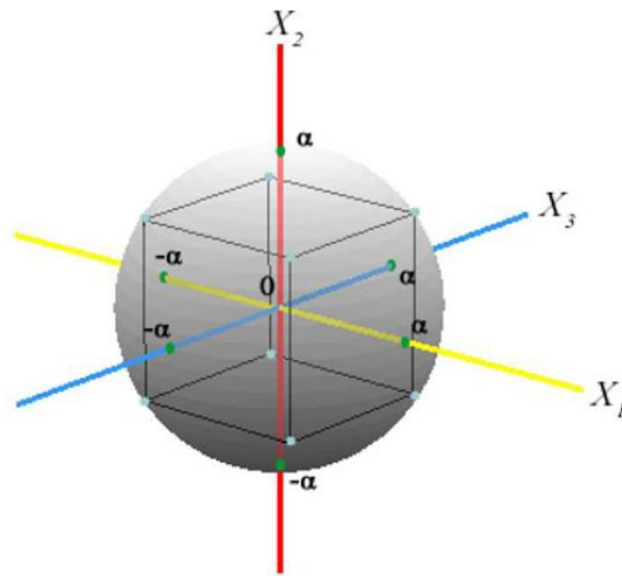
Para o planejamento do experimento (do inglês, *Design of Experiment - DoE*), optou-se pela criação de um experimento de superfície de resposta central composto. Essa metodologia, denominada de Desenho de Experimento Central Composto Completo, é uma metodologia estatística, derivada do método fatorial, conhecida como experimento de superfície de resposta CCC - Central Composto Completo (do inglês, *Central Composite Circumscrip*).

Nesta metodologia estatística, é determinado valores de níveis baixo, médio e alto das variáveis a serem intercaladas. Estes valores são dispostos em um cubo, no qual seus eixos são as variáveis a serem mescladas e seus vértices são os valores dos parâmetros já intercalados. Caso a quantidade de variáveis estudadas seja maior que três, são criados níveis nos eixos de modo a ser possível a intersecção de todas as variáveis.

A metodologia CCC fornece também os chamados pontos-estrela (do inglês, *star-points*). Estes pontos estão a alguma distância do centro (identificado pela letra grega alfa " α "), sendo esta distância o raio da esfera circunscrita no cubo. Os pontos-estrela estabelecem novos extremos para as configurações de baixo e alto para todos os fatores, extrapolando assim os valores de baixo e alto pré-estabelecidos, aumentando o envelope de pontos contemplados, sendo possível desta maneira aumentar o campo amostral a ser estudado (MINITAB, 2021).

A Figura 15 ilustra a metodologia de desenho de experimento CCC, de fácil visualização ao fazer uma analogia entre eixos, planos e seus pontos dispostos. Nesta figura, temos um exemplo de estudo de três variáveis (X_1 , X_2 e X_3), utilizando dois níveis previamente selecionados de baixo e alto (vértices do cubo) e os pontos estrela ($-\alpha$ e α) extrapolando o cubo, formando uma esfera com o cubo inscrito. Nesta configuração, temos um total de 20 combinações possíveis para os parâmetros, já com as réplicas e com os valores extrapolados.

Figura 15 - Representação gráfica do DoE - CCC



Fonte: MINITAB (2021).

Os pontos-estrelas são calculados via *software* a partir do valor “ α ”. O valor “ α ” é uma função do número de variáveis estudadas (n) e está demonstrado na Equação 3.1.

$$\alpha = (2^n)^{1/4} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Estudou-se cinco variáveis ($n=5$), as quais foram:

- Corrente de pico;
- Corrente de base;
- Alimentação de arame durante corrente de pico;
- Alimentação de arame durante corrente de base e
- Velocidade de soldagem.

Deste modo, com o valor dos parâmetros estudados (n) igual a cinco, obtém-se o valor de $\alpha = 2,38$. Seguidamente se faz necessário um estudo preliminar para determinação dos valores de níveis baixo, médio e alto das variáveis de entrada, para dar continuidade a execução da metodologia DoE – CCC.

3.1.1 Estudo preliminar

Inicialmente efetuou-se um estudo preliminar de características de cordão e reforço de solda, para analisar quais os melhores parâmetros iniciais para efetuar o

desenho do experimento. Para essa seleção inicial, optou-se pelo método OFAT (do inglês, *one factor at time*), o qual é variado um parâmetro por vez, com a finalidade de compreensão da variação do parâmetro isoladamente. Desse modo, antes de partir para a análise multifatorial de maior complexidade, é possível estimar valores iniciais para o estudo com uma maior assertividade.

Após a análise da literatura, executou-se alguns testes arbitrários, sendo possível alcançar bons resultados de inspeção visual e estabilidade (continuidade) do arco elétrico. Com isso, confeccionou-se nove cordões de solda, com seus respectivos parâmetros observados na Tabela 2, onde variou-se parâmetros corrente de pico (C_p), corrente de base (C_b), alimentação de arame na corrente de pico (V_{ap}), alimentação de arame na corrente de base (V_{ab}) e velocidade de soldagem (V_s).

Tabela 2 - Parâmetros do estudo preliminar

AMOSTRA	C_p [A]	C_b [A]	V_{ap} [m/min]	V_{ab} [m/min]	V_s [cm/min]
1	200	100	2,2	1,1	25
2	200	100	2,6	1,3	25
3	200	100	2,6	1,3	20
4	225	125	2,6	1,3	15
5	175	75	2,6	1,3	15
6	175	75	2,6	1,3	25
7	225	125	2,6	1,3	25
8	175	75	2,2	1,1	20
9	200	100	2,6	1,3	15

Fonte: Autoria Própria (2022).

As amostras dispostas na Tabela 2 estão registrados na Fotografia 1. Como é possível analisar na imagem, alguns parâmetros não obtiveram continuidade (amostra 06, por exemplo), já sendo descartados da escolha dos parâmetros iniciais. Os valores de frequência foram mantidos constantes durante todo o processo, sendo tempo de pico igual o tempo de base, no valor de 0,1 segundos. Esta variável se manteve constante durante todo o trabalho.

Fotografia 1 – Amostras iniciais provenientes do estudo preliminar



Fonte: Autoria Própria (2022).

Nesse primeiro estudo, analisou-se apenas visualmente, de maneira rápida, propriedades como estabilidade do arco, estabilidade do cordão (constância), inspeção visual e geometria. Desse modo, foi possível entender um pouco mais sobre a ordem de grandeza dos parâmetros essenciais para o estudo, determinando valores de níveis para executar o planejamento do experimento.

3.1.2 Definição dos níveis e parâmetros iniciais

Uma vez realizado o estudo preliminar, foi possível determinar os valores nível baixo, médio e alto, Tabela 3. Esses valores são necessários para as entradas dos valores a serem gerados pelo DoE-CCC no *software Minitab*[®].

Tabela 3 – Parâmetros dos níveis selecionados

NÍVEL	C_p [A]	C_b [A]	V_{ap} [m/min]	V_{ab} [m/min]	V_s [cm/min]
Baixo	175	75	2,2	1,1	15
Médio	200	100	2,4	1,2	20
Alto	225	125	2,6	1,3	25

Fonte: Autoria Própria (2022).

Determinado os valores dos níveis das variáveis, obtém-se pelo *software Minitab*[®] o cálculo e a distribuição da combinação das propriedades, demonstrado na Tabela 4 pelas 52 amostras.

Para evitar erros sistemáticos, o conjunto de experimentos inicial foi disposto em ordem aleatória e realizado na ordem demonstrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do experimento para utilização da metodologia CCC

NÍVEL	C_p [A]	C_b [A]	V_{ap} [m/min]	V_{ab} [m/min]	V_s [cm/min]	NÍVEL	C_p [A]	C_b [A]	V_{ap} [m/min]	V_{ab} [m/min]	V_s [cm/min]
1	175	125	2,2	1,3	25	27	225	125	2,6	1,1	15
2	175	75	2,6	1,3	15	28	200	100	2,4	1	20
3	200	100	2,4	1,2	20	29	200	40	2,4	1,2	20
4	175	75	2,2	1,1	15	30	200	100	2,4	1,2	20
5	175	75	2,2	1,3	15	31	175	75	2,6	1,1	25
6	225	125	2,2	1,1	25	32	225	125	2,6	1,3	25
7	200	100	2,4	1,2	8	33	225	75	2,2	1,1	25
8	175	75	2,2	1,3	25	34	200	100	2,4	1,2	20
9	200	100	1,9	1,2	20	35	225	75	2,6	1,1	15
10	175	125	2,6	1,3	25	36	175	75	2,6	1,1	15
11	175	125	2,6	1,3	15	37	140	100	2,4	1,2	20
12	200	100	2,4	1,2	20	38	175	125	2,6	1,1	25
13	225	125	2,2	1,3	25	39	200	100	2,9	1,2	20
14	225	75	2,2	1,3	25	40	175	75	2,2	1,1	25
15	225	125	2,6	1,1	25	41	175	75	2,6	1,3	25
16	260	100	2,4	1,2	20	42	225	75	2,2	1,1	15
17	200	100	2,4	1,2	20	43	225	125	2,6	1,3	15
18	200	100	2,4	1,2	20	44	225	75	2,2	1,3	15
19	200	100	2,4	1,2	20	45	200	100	2,4	1,2	32
20	175	125	2,6	1,1	15	46	200	100	2,4	1,2	20
21	200	100	2,4	1,43	20	47	225	75	2,6	1,3	25
22	175	125	2,2	1,3	15	48	225	75	2,6	1,1	25
23	175	125	2,2	1,1	15	49	225	125	2,2	1,1	15
24	175	125	2,2	1,1	25	50	200	100	2,4	1,2	20
25	200	160	2,4	1,2	20	51	225	75	2,6	1,3	15
26	200	100	2,4	1,2	20	52	225	125	2,2	1,3	15

Fonte: Autoria Própria (2022).

Para selecionar o parâmetro ideal a ser utilizado no trabalho, analisou-se as 52 amostras a partir dos seguintes ensaios:

- Inspeção visual;
- Estabilidade de arco elétrico;
- Medição de geometria de reforço;

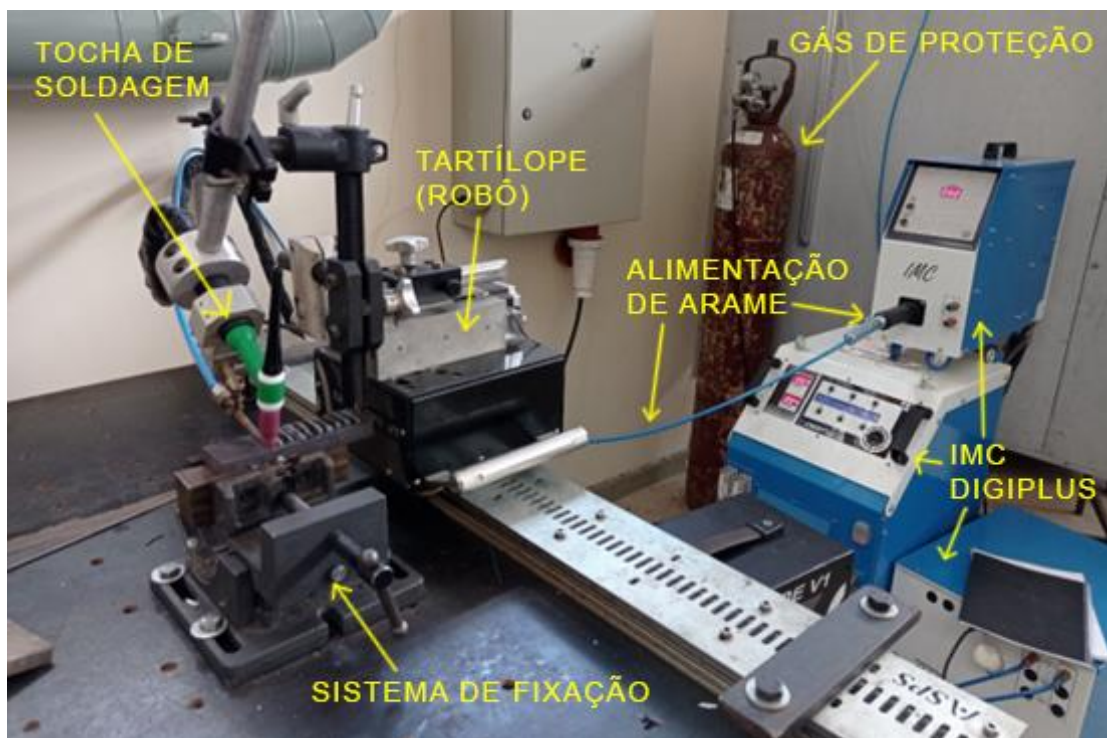
- Medição de molhabilidade;
- Medição de diluição e
- Medição de razão entre áreas de seção transversal.

Uma vez definido quais os parâmetros a serem estudados, partiu-se para a determinação da metodologia de preparação e fabricação das amostras.

3.2 Preparação das Amostras

A máquina utilizada no processo de confecção dos cordões de solda foi a Multiprocessos Arco Inteligente IMC® DIGIplus A7 ACPO3C. Os parâmetros utilizados na máquina estão dispostos no Quadro 3. O deslocamento da tocha durante a soldagem foi realizado pelo equipamento Tartílope V1, capaz de movimentar-se em velocidade constante no eixo X, possibilitando uma soldagem uniforme longitudinalmente. O equipamento é observado na Fotografia 2.

Fotografia 2 - Maquinário utilizado para confecção das amostras



Fonte: Autoria própria (2022).

Para o estudo inicial dos parâmetros, o material utilizado como base dos cordões de solda foi uma chapa de aço carbono SAE 1045 com dimensões de 150mm de comprimento por 75mm de largura e 12mm de espessura, de modo que os cordões apresentassem comprimento aproximado de 65mm. Antes dos ensaios, todas as

chapas foram submetidas a um processo de abrasão leve, com esmerilhadeira Bosch® GWS 900W e lixa-disco flap grão 80, para remoção de imperfeições e camada de óxido remanescente. Antes do começo da deposição do cordão de solda inicial de cada chapa, realizou-se pré-aquecimento do material utilizado como base a 200°C. Para a deposição dos 52 cordões da Tabela 4, foram necessárias 4 chapas, demonstradas na Fotografia 3.

Fotografia 3 – Metal base utilizado para amostras



Fonte: Autoria Própria (2022).

O material utilizado para deposição foi o arame sólido VH50IM de diâmetro 1,2mm e composição química observada na Tabela 5. Para mapeamento dos elementos químicos presentes no material depositado utilizou-se o método qualitativo de espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Este dispositivo está disponível no microscópio eletrônico de varredura (MEV), observado na

Fotografia 8.

Tabela 5 - Composição química medida por EDS do material de adição (arame 1,2mm)

Elemento	Ni	Mn	Si	Cr	Mo
[%]	2,7	1,8	0,9	0,3	0,3

Fonte: Autoria Própria (2022).

Para efetuar análise dos cordões, necessita-se inicialmente realizar a preparação metalográfica da seção transversal destes.

3.3 Preparação Metalográfica

Uma vez depositados os cordões, utilizou-se do corte dos mesmos com a finalidade de estudar a macro e microestrutura dos cordões. O ensaio metalográfico teve início com o corte dos corpos de prova utilizando-se uma máquina de corte (Buehler® IsoMet 4000), de arrefecimento controlado pelo fluido (Buehler® Cool 3 10-6001), com avanço de 5,0 mm/min e 4000 rpm. O equipamento utilizado é demonstrado na Fotografia 4.

Fotografia 4 – Equipamento de corte semiautomático Buehler® IsoMet 4000



Fonte: Autoria Própria (2021).

Após realizado o corte das amostras fez-se o lixamento das amostras depende se a análise será macro ou a microestrutural.

3.3.1 Análise macroestrutural

Para análise macroestrutural, o lixamento das amostras se fez possível em uma lixadeira semiautomática Buehler Vector com água como fluido de trabalho para as lixas. A lixa utilizada foi de 220 mesh, com uma carga de aproximadamente de 15 N mantendo a amostra fixa, contraria à rotação da lixa com rotações de 500 rpm. O equipamento mencionado é demonstrado na Fotografia 5.

Fotografia 5 – Lixadeira automática Buehler® Vector



Fonte: Autoria própria (2021).

Para uma análise macro, utilizou-se o Estereomicroscópio ZEISS® modelo Stemi 508, demonstrada na Fotografia 6, a qual pode ampliar as imagens entre 6,3 e 50x, oculares focalizáveis de 10X/23, câmera de captura, polarização para iluminação refletida e fonte de luz com braços tipo pescoço de ganso.

Fotografia 6 – Microscópio estereoscópio binocular ZEISS® Stemi 508



Fonte: Autoria própria (2021).

3.3.2 Análise da microestrutura

Analogamente à análise macro, para o lixamento utilizou-se o mesmo equipamento. Porém, as lixas variam de 220 até 2000 mesh, com uma carga programada de 15 N mantendo a amostra fixa, contrária à rotação da lixa. Após lixado

o material, iniciou-se o polimento dos mesmos, utilizando a mesma máquina, porém modificando sua função. Para tal, desliga-se a água e utilizou-se lubrificante Schneider® LubBlue de baixa viscosidade, e suspensão de diamante Stuers® DiaDuo de granulometria 3 μm e 0,25 μm com rotações 200 rpm.

Para análise de microestrutura, utilizou-se o microscópio ótico ZEISS®, demonstrado na Fotografia 7, e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) TESCAN Oxford®,

Fotografia 8.

Fotografia 7 - Microscópio ótico ZEISS®



Fonte: Autoria própria (2021).

Fotografia 8 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN Oxford®



Fonte: Autoria Própria (2021).

3.3.3 Ataque químico

Após o polimento realizou-se o ataque químico com Nital 5% (ácido nítrico e álcool etílico), com a superfície imersa no mesmo por aproximadamente 10 segundos, com o intuito de revelar as microestruturas do material por meio de ataque químico. Uma vez realizado este procedimento, lavou-se a amostra com água e álcool, fazendo a secagem posteriormente.

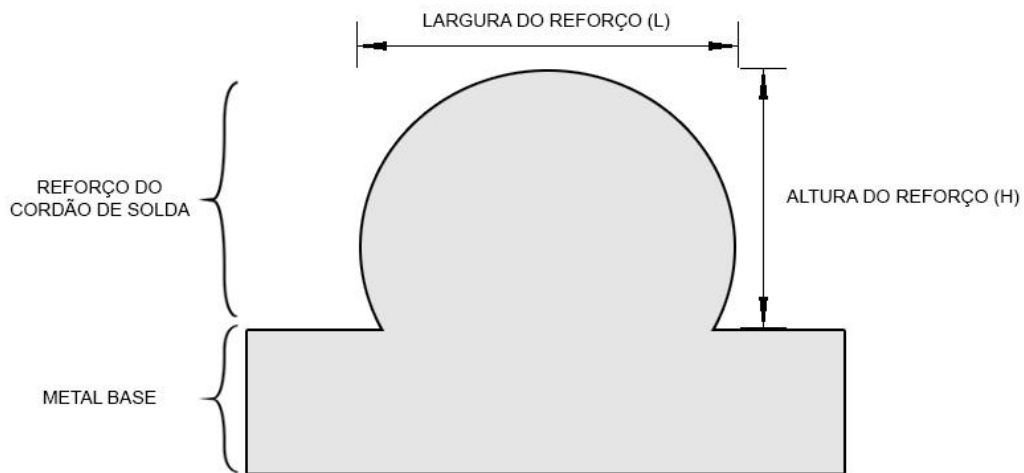
3.4 Análise de Geometria

A análise de geometria do cordão tem como objetivo determinar medidas físicas de base e a altura do reforço, por meio de medições na seção transversal.

Para a medição da geometria do cordão de solda, foi necessário efetuar a medição de altura (H) e largura (L) do reforço do cordão de soldagem, demonstrado na Figura 16. Para a altura do cordão, considerou-se a parte superior do metal base até o ponto mais alto do cordão naquela seção transversal. Para a largura, considerou-se as duas extremidades laterais do cordão naquela seção transversal.

Para o estudo deste trabalho, foi analisada a razão entre essas duas grandezas, buscando valores próximos a 1 (um), evidenciando que o reforço do cordão de soldagem se aproxima do preenchimento de um “quadrado”.

Figura 16 - Análise de geometria do cordão de solda simples



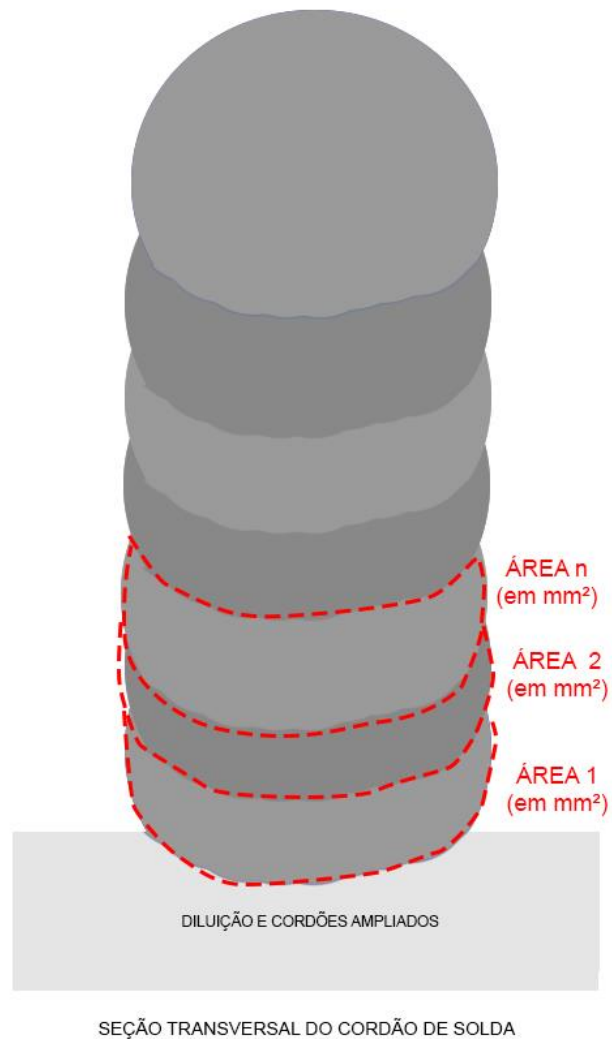
SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DE SOLDA

Fonte: Autoria Própria (2022).

Para efetuar as medições descritas, utilizou-se o *software* ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1.

Após a determinação do melhor parâmetro, realizado o empilhamento final, para determinação e quantificação das medidas das camadas do material empilhado, utilizou-se a metodologia demonstrada na Figura 17 para medição de todas as áreas de cada cordão depositado, utilizando os *softwares* mencionados anteriormente.

Figura 17 - Análise de geometria do cordão de solda camada a camada



Fonte: Autoria Própria (2022).

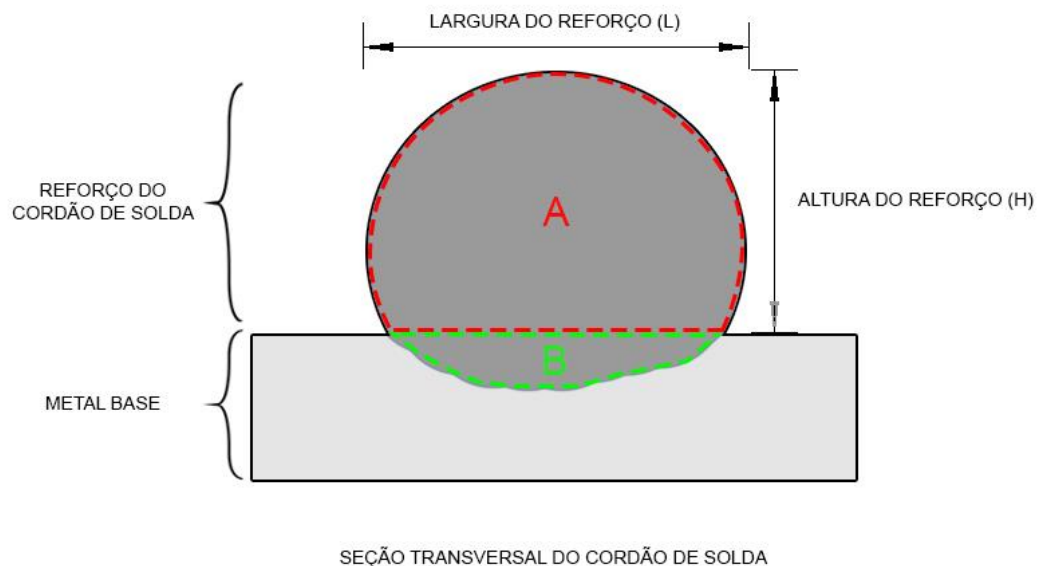
Deste modo, é possível determinar uma porcentagem de área a qual cada cordão de solda contribui para a confecção do empilhamento total final.

3.5 Análise de Diluição

A diluição do cordão de solda no metal base é a quantidade de material fundido abaixo da linha do metal base, representado pela área B na Figura 18. Entender sobre a diluição do cordão de solda é necessário devido ser diretamente proporcional a quantidade de energia fornecida para a peça. Quanto maior a diluição, maior a quantidade de energia fornecida para a peça que está recebendo este cordão.

Para efetuar as medições da diluição do cordão de solda, utilizou-se o *software* ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1, medindo a área A (área acima do Metal Base) e a área B (área abaixo do Metal Base), demonstrada na Figura 18.

Figura 18 - Análise de diluição do cordão de solda



Fonte: Autoria Própria (2022).

O valor da diluição no metal base, em porcentagem, é obtido pela Equação 3.2, cujo é uma função das áreas demonstradas na Figura 18.

$$\text{DILUIÇÃO } (\sigma) = \frac{\text{ÁREA B}}{(\text{ÁREA A} + \text{ÁREA B})} \times 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

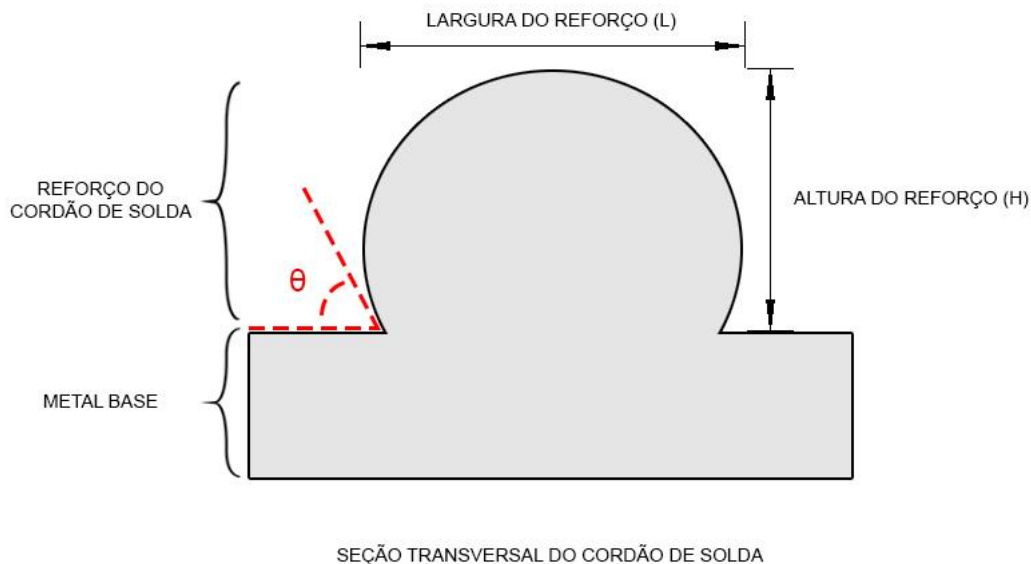
Além da verificação da diluição do reforço do cordão de solda, analisou-se também a diluição dos elementos químicos ao longo dos cordões empilhados, utilizando metodologia de ensaio de EDS, demonstrado anteriormente.

3.6 Análise de Molhabilidade

A análise de molhabilidade do cordão de solda no metal base se faz necessária para verificar se o cordão apresenta características construtivas de formação de uma estrutura. Devido a finalidade do trabalho é o empilhamento dos cordões de solda, um ângulo de molhabilidade tão próximo quanto possível de 90° é o alvo buscado para a construção de uma parede o mais constante possível.

Para efetuar as medições da molhabilidade do cordão de solda, utilizou-se o *software* ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1, fazendo uma medida direta do ângulo (θ) formado entre o metal base e a iminência tangencial do cordão de solda, demonstrado Figura 19.

Figura 19 - Análise de molhabilidade do cordão de solda



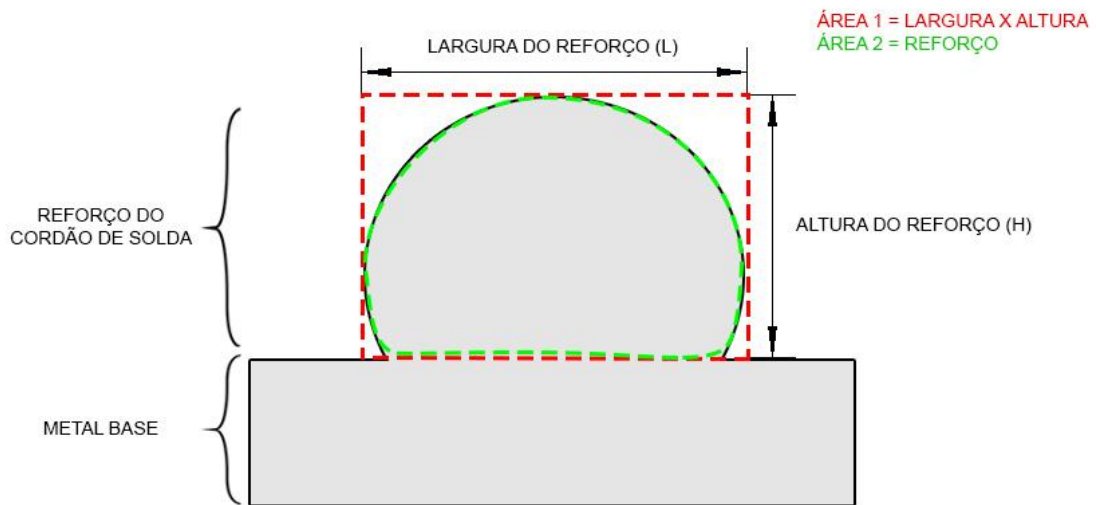
Fonte: Autoria Própria (2022).

3.7 Análise de Área Inscrita

Para verificar se o cordão de solda apresenta condições passíveis de construção de uma estrutura, utilizou-se uma referência de área preenchida dentro da área máxima transversal que o cordão apresenta. Utilizou-se o *software* ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1, fazendo a medida da área do cordão (ÁREA 2) e área entre base e altura (ÁREA 1).

O procedimento de identificação e medição de áreas descrito anteriormente está ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Análise de preenchimento de área do cordão de solda



SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DE SOLDA

Fonte: Autoria Própria (2022).

Foi efetuada também a razão entre as áreas 2 e 1, buscando valores os mais próximos quanto possíveis a 1 (um), significando que a maior quantidade de área foi preenchida dentro do retângulo.

A combinação das abordagens de relação entre razão de altura e base e razão de área inscrita, fornece um caminho metodológico para a seleção do melhor parâmetro para ser possível a formação de uma estrutura em 3D.

3.8 Parâmetros Utilizados no Trabalho

Após efetuado o estudo dos parâmetros, fundamentado na pesquisa inicial de parâmetros e suas análises, definiu-se os demais parâmetros de soldagem utilizados na confecção das amostras soldadas camada a camada, demonstrados no Quadro 3. Todos os resultados para a obtenção dos dados do Quadro 3 estão demonstrados posteriormente no Capítulo 4.

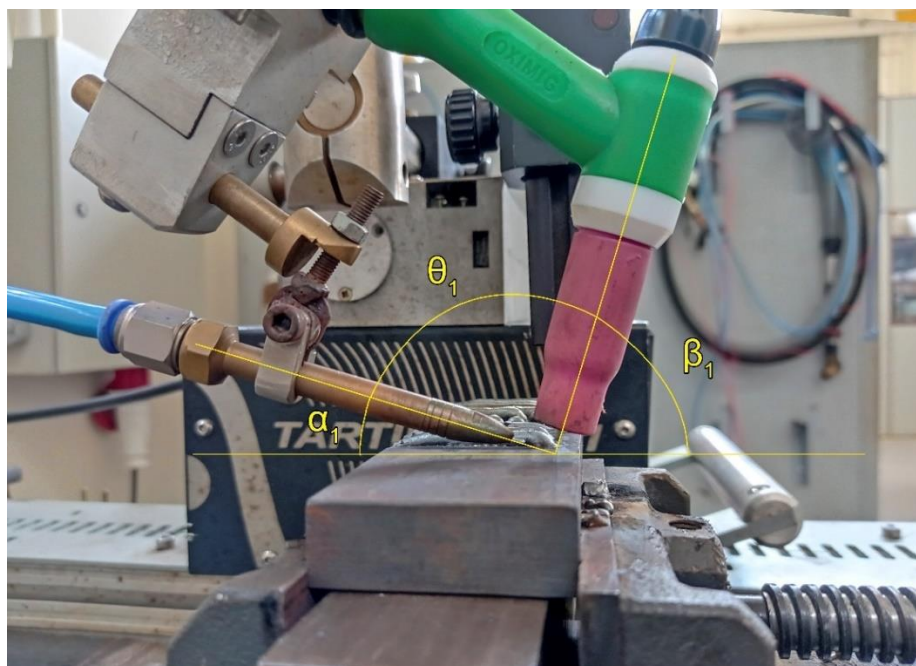
Quadro 3 - Parâmetros utilizados no processo GTAW pulsado

Frequência de pico	10 Hz
Frequência de base	10 Hz
Polaridade	CC -
Gás de proteção	Argônio; 12 L/min
Diâmetro do bocal	10 mm
Eletrodo (W+2%ThO ₂)	Ø 2,4 mm
Ângulo da ponta do eletrodo	60°
Comprimento do arco	3 mm
Arame de alimentação (P20)	Ø 1,2 mm
Ângulo de incidência do arame (α_1)	15° da superfície
Ângulo de incidência da tocha (β_1)	75° da superfície
Ângulo entre tocha e arame (θ_1)	90°

Fonte: Autoria Própria (2022).

É importante ressaltar que os ângulos α_1 , β_1 e θ_1 dispostos no Quadro 3 são de suma importância para alcançar uma geometria de arco favorável para o processo. Foram realizados alguns testes empíricos para determinar estes valores de ângulo reportados. Tais valores estão ilustrados na Fotografia 9.

Vale ressaltar que tais ângulos demonstrados permaneceram constantes em todo o trabalho, desde os estudos iniciais até a confecção das amostras finais.

Fotografia 9 - Ângulos da tocha de soldagem

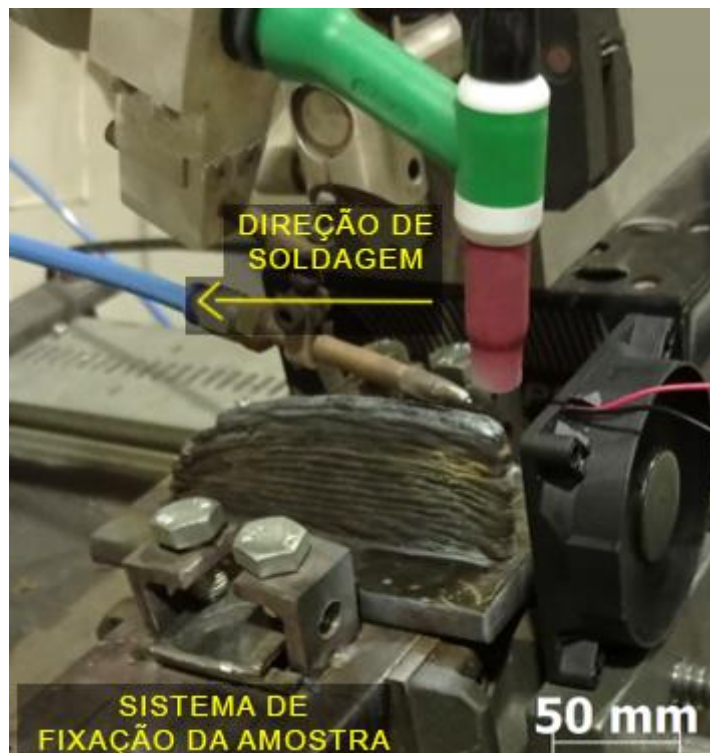
Fonte: Autoria Própria (2022).

Com os parâmetros de soldagem definidos, se faz possível a confecção dos corpos de prova.

3.9 Deposição dos Cordões Camada a Camada

Após a determinação do parâmetro do trabalho, foi realizada deposição dos cordões camada a camada, respeitando sempre o parâmetro previamente selecionado, com controle de temperatura interpasse, com soldagem no mesmo sentido e zerando a altura na iminência do cordão subjacente, conforme demonstrado na Fotografia 10.

Fotografia 10 - Configuração de soldagem camada a camada



Fonte: Autoria própria (2022).

Apesar da literatura fornecer a opção de continuar imediatamente a soldagem multicamada diminuindo a energia depositada (em média 20% da corrente utilizada), optou-se por manter a temperatura interpasse de 100°C para a continuação da confecção da próxima camada. Para auxiliar o alcance deste objetivo, utilizou-se um cooler 12V de modo a se fazer uma convecção forçada leve entre um passe e outro. Durante o processo de soldagem, este dispositivo permaneceu desligado. A Fotografia 11 demonstra detalhes da operação deste equipamento, juntamente com o

sistema de fixação utilizado para impedir movimentos e vibrações indesejadas da amostra durante o procedimento de soldagem.

Fotografia 11 - Esquema de arrefecimento de interpasse dos cordões



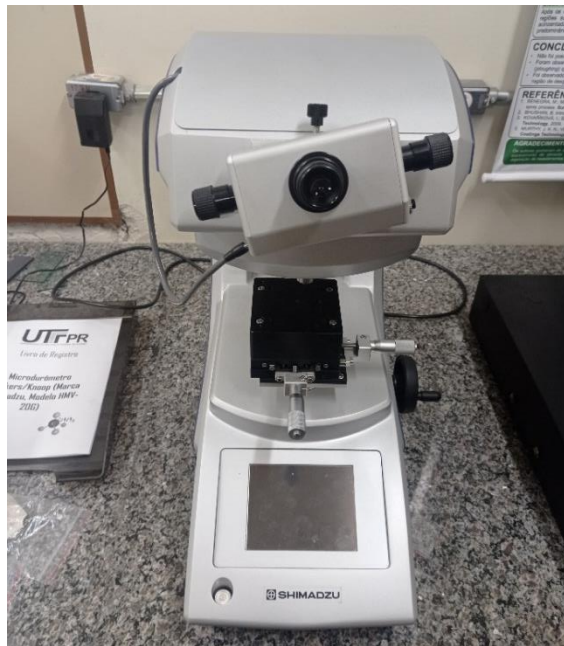
Fonte: Aatoria própria (2022).

Para a medição da temperatura de interpasse, foi utilizado um termopar tipo K, ligado a um multímetro com a função de medição de temperatura.

3.10 Ensaio de Microdureza Vickers

O objetivo do ensaio de dureza por micropenetração Vickers é, além da medição da dureza do cordão de solda, dimensionar a profundidade da ZTA. Para tal, utilizou-se o durômetro de Microescala Shimadzu HMV-G20 *Series*, demonstrado na Fotografia 12. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM E384-11 (2011) - *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, para durezas Vickers com pré carga de 300 gf (gramas-força) e indentador de pirâmide de diamante de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas.

Fotografia 12 – Dispositivo de Microdureza Vickers Shimadzu® HMV-G20



Fonte: Autoria própria (2021).

Posicionou-se a amostra com corte transversal no microdurômetro, utilizando a linha de fusão como referência, centralizando-a com o uso da lente do equipamento e dispendo as medidas transversalmente conforme Tabela 6. Longitudinalmente, serão dispostas 3 séries de medições, espaçadas em 0,5mm, para repetições de medição.

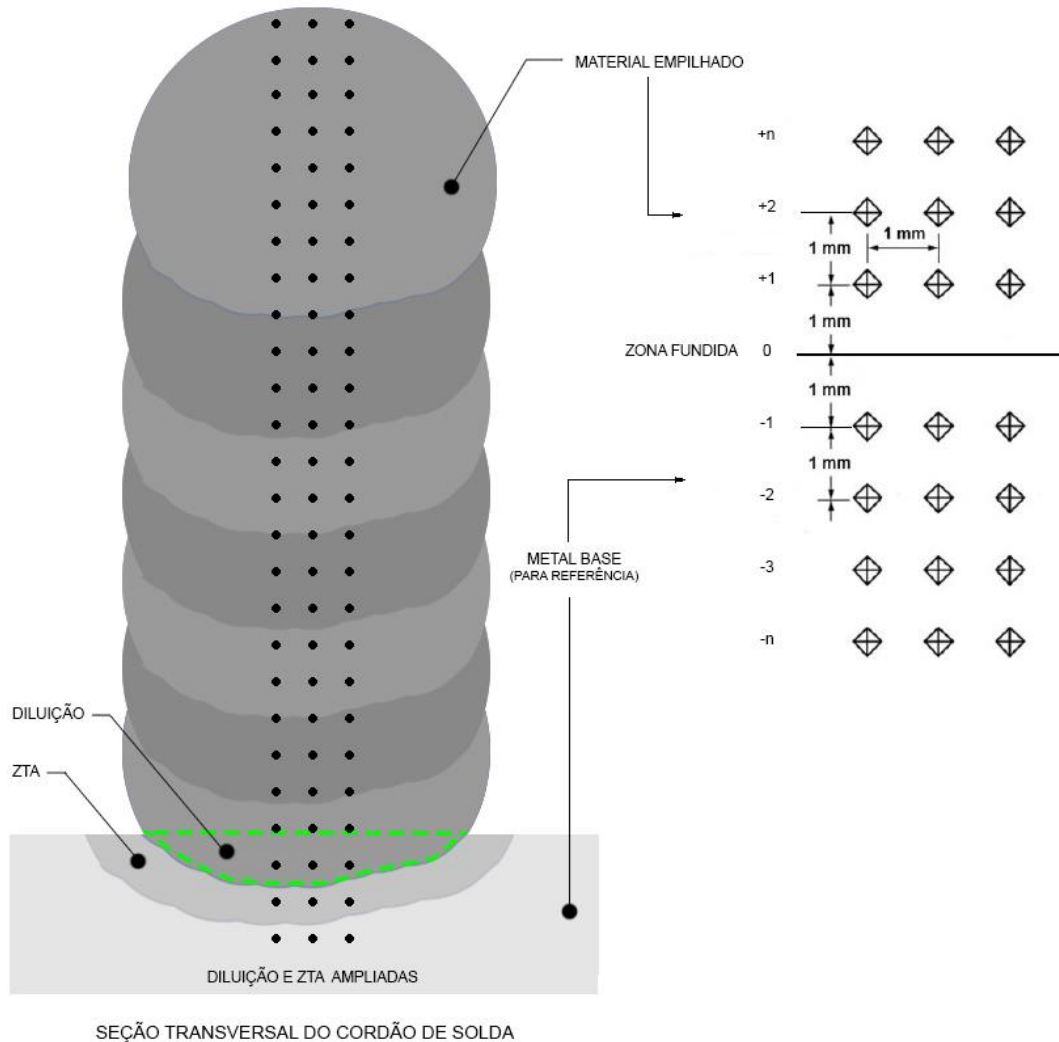
Tabela 6 - Referência de medidas para Microdureza

MEDIDAS	REFERÊNCIA [mm]
+ n	1
+5	1
+4	1
+3	1
+2	1
+1	1
Zona Fundida	0
-1	1
-2	1
-3	1
-n	Até 3 medidas padrão

Fonte: Autoria Própria (2022).

Para melhor visualização e entendimento das medições de microdureza, o procedimento listado anteriormente está ilustrado na Figura 21. Entende-se zona fundida como o limiar entre diluição e metal base.

Figura 21 - Procedimento de medidas para Microdureza



Fonte: Autoria Própria (2022).

Desse modo, foi possível determinar a extensão da dureza no empilhamento e como ela contribui para afetar as propriedades mecânicas do material.

3.11 Ensaio de Tração Uniaxial

Para determinar a tensão de escoamento da peça que estamos fabricando, se faz necessário um ensaio de tração do material. Para tal, utilizou-se a máquina EMIC® Linha DL-10000 de capacidade até 100 kN, apresentada na Fotografia 13.

Fotografia 13 - Máquina de tração EMIC® Linha DL-10000

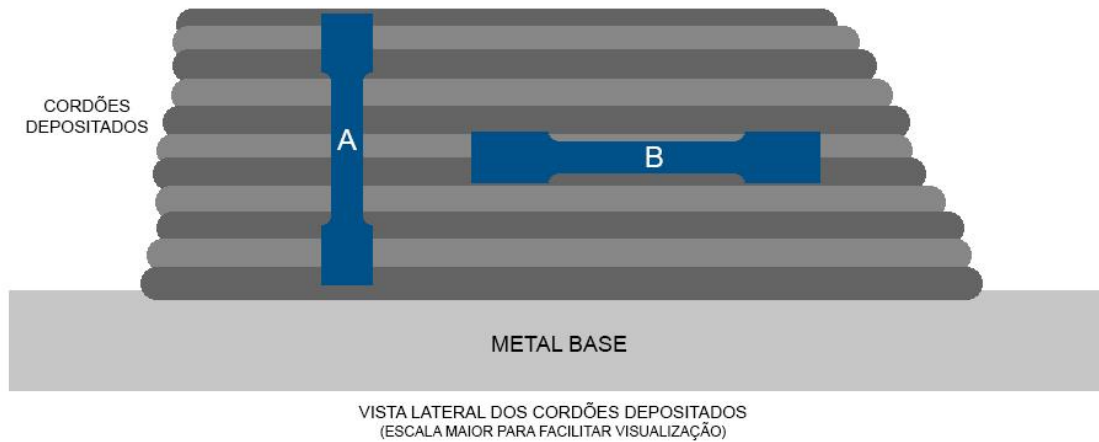


Fonte: Autoria própria (2022).

Com a finalidade de compreender como o sentido de deposição das camadas afeta a tensão de escoamento do material, confeccionou-se dois corpos de prova: Um corpo de prova retirado na seção transversal (corpo A) dos cordões depositados; outro retirado na seção longitudinal (corpo B) dos cordões depositados conforme demonstrada esquematicamente na Figura 22. Para tal, utilizou-se uma variação da norma ASTM E 8M – 04.

Inicialmente, foi comparado as duas tensões de escoamento, para verificação de propriedades mecânicas em ambos os sentidos de deposição, além da quantificação da tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento do material.

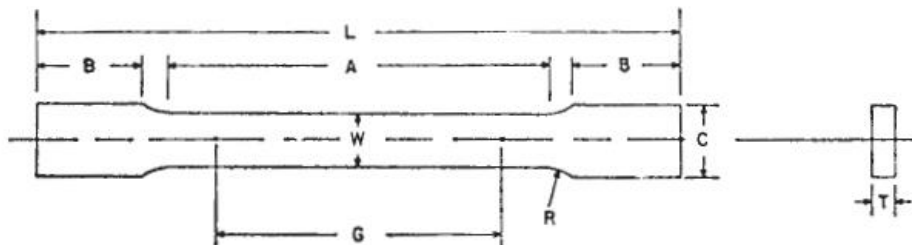
Figura 22 - Esquemático de remoção dos corpos de prova para ensaio de tração A) Transversal B) Longitudinal.



Fonte: Autoria própria (2022).

A variação da norma utilizada para a confecção dos corpos de prova foi necessária devido o dimensional dos cordões de solda. Desse modo, utilizou-se corpos de prova com valores proporcionais à largura nominal de 6mm da norma ASTM E 8M-04, conforme demonstrado na Figura 23.

Figura 23 – Desenho esquemático dos corpos de prova de tração



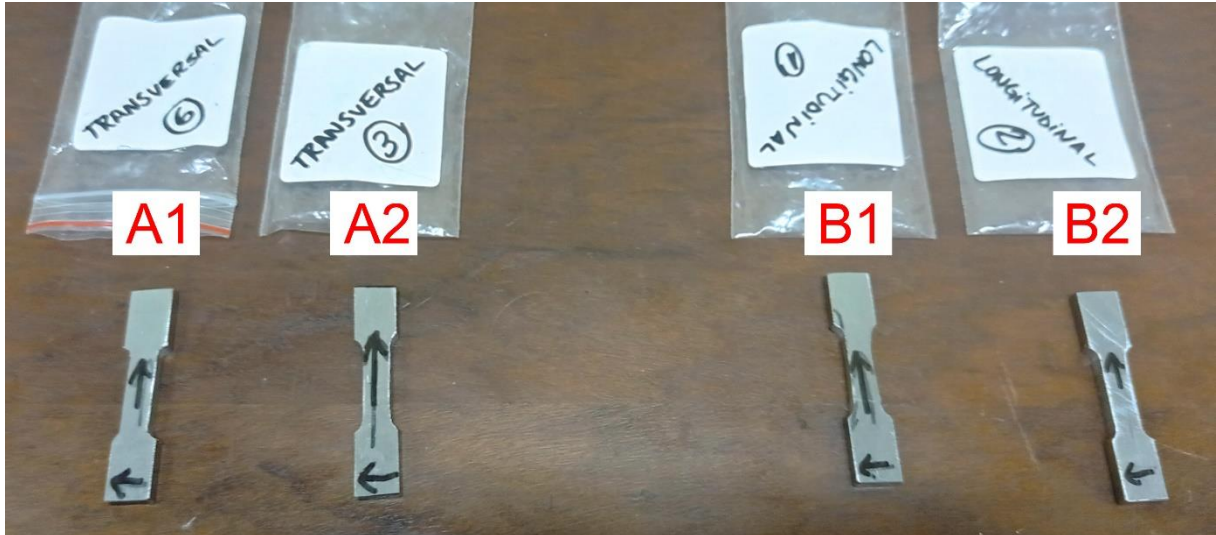
Largura Nominal	ASTM E 8M - 04	UTILIZADOS NO TRABALHO
	6 mm	-
G— Comprimento do medidor	25.0 +/- 0.1	12.5 +/- 0.1
W— Largura	6.0 +/- 0.1	6.0 +/- 0.1
T— Espessura (função do material)		4
R— Raio	6	3
L— Comprimento total	100	50
A— Comprimento da seção reduzida	32	16
B— Comprimento da seção de aperto	30	15
C— Largura da seção de aperto	10	10

Fonte: Autoria própria (2021), fundamentada na norma ASTM E 8M – 04.

Os corpos de prova preparados para o ensaio de tração estão demonstrados na Fotografia 14. Foram executados dois corpos de prova referentes a seção

transversal (A1 e A2) e dois referentes a seção longitudinal (B1 e B2), com dimensional disposto na Figura 23.

Fotografia 14 – Corpos de prova de tração: A1 e A2 seção transversal; B1 e B2 seção longitudinal



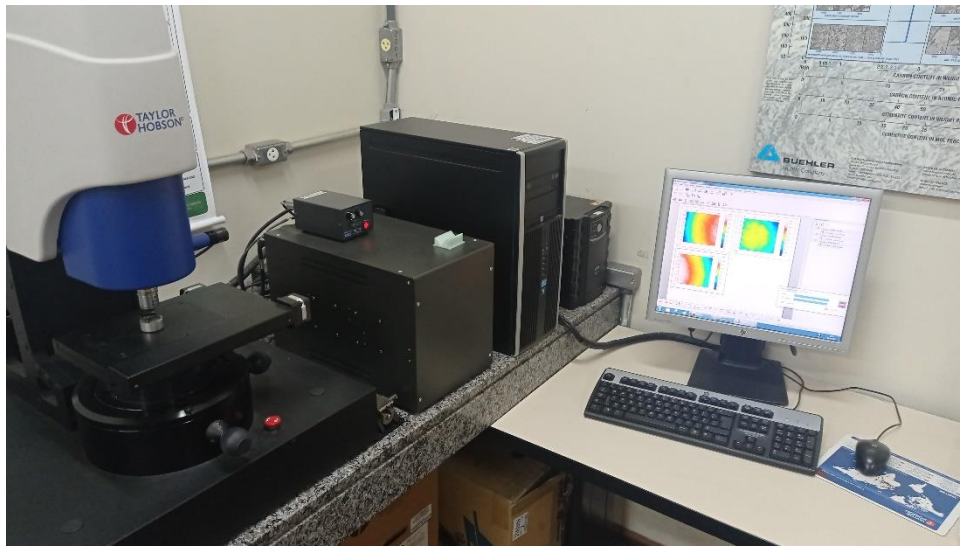
Fonte: Autoria Própria (2022).

Para não haver qualquer interferência do sentido de deposição dos cordões na hora do ensaio, em todas as etapas da fabricação das amostras do ensaio de tração, o sentido de deposição foi devidamente marcado. Desse modo, durante o ensaio de tração, foi possível manter sempre o mesmo sentido de fixação para todas as amostras, evitando assim possíveis discrepâncias de resultado referentes a direção de deposição.

3.12 Análise de Perfilometria Ótica

Para compreender como a deposição camada a camada poderia gerar defeitos no processo de polimento final da peça na utilização de MA na fabricação ou reparo de moldes de matrizes por exemplo, como descontinuidade do polimento pelas camadas ou possíveis diferenças de dureza afetarem o polimento, analisou-se a rugosidade das amostras empilhadas, utilizou-se o perfilômetro ótico 3D da marca *Taylor Hobson® CCI Lite*, com aumentos de 10x e 50x, demonstrado na Fotografia 15.

Fotografia 15 - Perfilômetro ótico 3D CCI Lite Taylor Hobson®



Fonte: Autoria Própria (2021).

Foi seguida a norma ISO 25178 e a ISO 4287 (*Geometrical Product specifications*), a qual determina as especificações geométricas dos produtos, dentre os parâmetros de rugosidade. Para o estudo, escolheu-se os seguintes parâmetros:

- Sa: Desvio aritmético médio do perfil avaliado, com o objetivo de avaliar os desvios dos picos e vales em relação a superfície;
- Sz: Altura máxima do perfil, o qual consiste na soma da altura máxima do maior pico com a maior profundidade do menor vale dentro de uma área pre determinada;
- Sq: Desvio médio quadrático do perfil avaliado;
- Ra: Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição

Escolheu-se os índices Sa, Sz, Sq e Ra para determinar os diferentes tipos de rugosidades, possibilitando a avaliação do polimento do material, em busca de possíveis indícios de não continuidades devido a MA, além de quantizar valores para comparações com a indústria. Todavia, todos os valores possíveis fornecidos pelo equipamento referente as normas ISO 25178 e a ISO 4287 estão demonstrados no trabalho.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Através da confecção das amostras e ensaios realizados previamente explanados, são apresentados neste capítulo os resultados obtidos.

Inicialmente, apresenta-se os resultados do estudo de parâmetro, iniciando pela inspeção visual das 52 amostras confeccionadas, análise de geometria, área inscrita, molhabilidade e diluição, sendo possível a definição do parâmetro ideal para deposição dos cordões camada a camada.

Posteriormente, apresenta-se os resultados do estudo dos cordões depositados camada a camada, iniciando pela inspeção visual das duas amostras realizadas (transversal e longitudinal), análise de geometria, diluição, dureza, tensão de escoamento, mecânica da fratura e rugosidade (perfilometria).

4.1 Resultado do Estudo Dos Parâmetros

4.1.1 Inspeção visual

Executou-se inspeção visual nos cordões depositados pelos parâmetros dispostos na Tabela 4, demonstrado na Fotografia 16. Prontamente é possível identificar alguns parâmetros que ao menos apresentam um melhor aspecto visual, seja pela continuidade/estabilidade do cordão, inconsistência no formato da geometria ou diluição visualmente excessiva.

Vale ressaltar que para evitar erros sistemáticos de parametrização de máquina, aumentando a qualidade da comparação entre amostras, todos os cordões de solda foram confeccionados no mesmo dia, com a garantia dos parâmetros constantes iguais para todas as amostras. Entre um cordão e outro, foi aguardado uma temperatura interpasse de 100°C.

Fotografia 16 - Inspeção visual dos parâmetros soldados



Fonte: Autoria Própria (2022).

Os parâmetros descartados na inspeção visual, visualizados na Fotografia 16, são:

- Nível 7: Devido à baixa velocidade de soldagem, o reforço apresentou um elevado volume, com altura demasiada, de modo que poça fundida entrasse em contato com o eletrodo (tungstênio), fazendo o processo de soldagem cessar quando houve a solidificação da poça fundida;
- Nível 8, 29, 31, 37, 40 e 41: Falta de continuidade no processo de soldagem.

Apesar de não descartados, os níveis 6, 16 e 52 apresentaram já na inspeção visual uma molhabilidade elevada e uma razão de altura/largura baixa, características estas não recomendadas para o estudo.

4.1.2 Geometria

Executou-se posteriormente a medição da base e da altura dos cordões não excluídos pela inspeção visual, para as 52 amostras. Os valores de base (b), altura (h) e a razão (r) da altura pela base estão dispostos na Tabela 7. Um valor ausente - com traço - significa que a amostra foi previamente descartada.

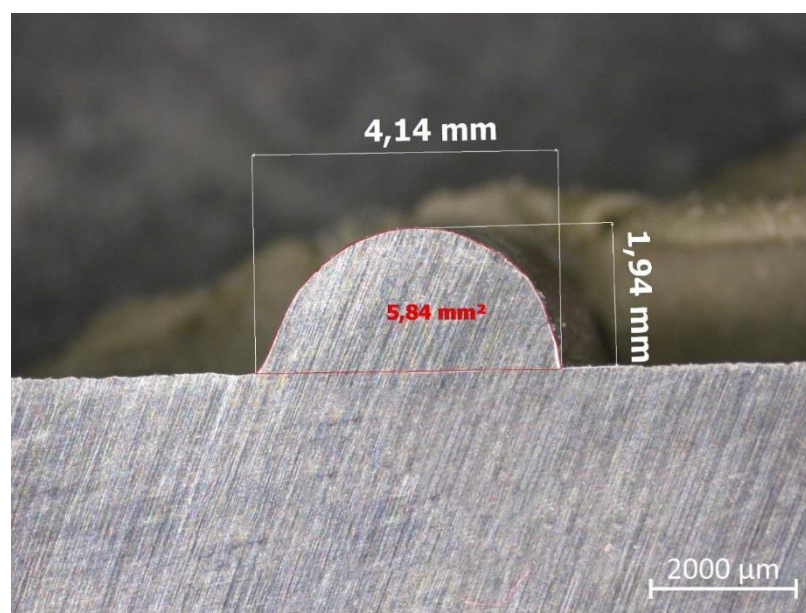
Um exemplo de medição realizada para obtenção das dimensões apresentadas na Tabela 7, pode ser verificado na Fotografia 17. A medida de 4,14mm corresponde a valores de base do cordão (b), a medida de 1,94mm corresponde a altura do cordão (h) e a medida de 5,84mm² corresponde a área ocupada pelo reforço do cordão, em sua seção transversal. Os dados foram mensurados por microscopia ótica, com a metodologia de medição seguida para todas as amostras.

Tabela 7 - Medições de geometria do estudo inicial

NÍVEL	b [mm]	h [mm]	r [mm/mm]	NÍVEL	b [mm]	h [mm]	r [mm/mm]	NÍVEL	b [mm]	h [mm]	r [mm/mm]
1	4,14	1,94	0,469	19	3,56	2,95	0,829	37	-	-	-
2	4,65	3,23	0,695	20	4,72	3,6	0,763	38	3,03	2,86	0,944
3	4,81	2,43	0,505	21	4,73	2,83	0,598	39	4,03	2,68	0,665
4	4,66	2,67	0,573	22	4,92	2,92	0,593	40	-	-	-
5	4,6	2,84	0,617	23	4,56	2,81	0,616	41	-	-	-
6	7,32	1,37	0,187	24	4,01	2,15	0,536	42	4,9	2,64	0,539
7	-	-	-	25	6,02	2,21	0,367	43	5,34	2,73	0,511
8	3,89	2,66	0,684	26	4,23	2,52	0,596	44	6,12	2,5	0,408
9	5,3	1,98	0,374	27	6,72	2,31	0,344	45	3,4	2,06	0,606
10	4,17	2,24	0,537	28	4,85	2,22	0,458	46	4,71	2,31	0,490
11	4,82	2,86	0,593	29	-	-	-	47	4,62	2,12	0,459
12	4,67	2,41	0,516	30	4,88	2,51	0,514	48	4,4	2,111	0,480
13	3,99	2,4	0,602	31	-	-	-	49	5,93	2,48	0,418
14	3,99	2,4	0,602	32	4,31	2,33	0,541	50	3,83	2,63	0,687
15	4,61	2,28	0,495	33	5,47	1,66	0,303	51	5,16	3,19	0,618
16	6,3	1,98	0,314	34	4,36	2,72	0,624	52	8,96	2,03	0,227
17	4,16	2,54	0,611	35	5,37	2,92	0,544				
18	4,03	2,66	0,660	36	3,65	2,79	0,764				

Fonte: Autoria própria (2022).

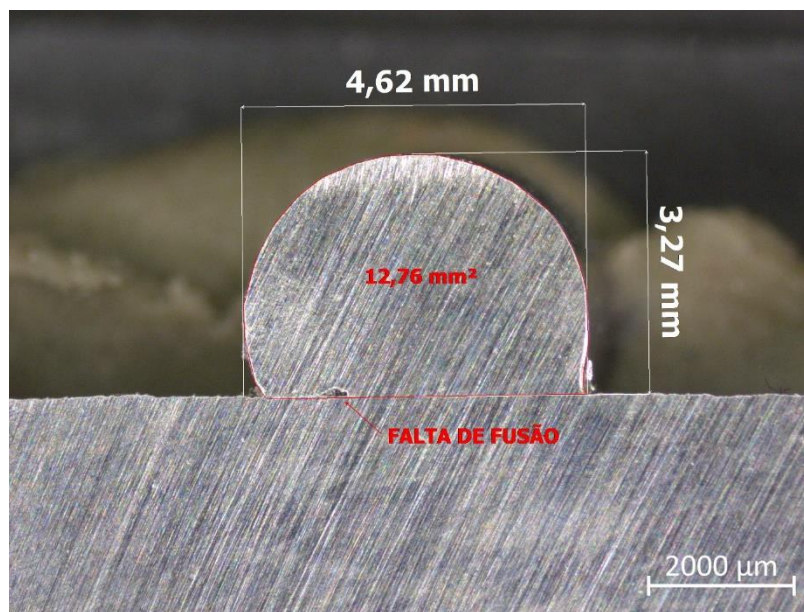
Fotografia 17 - Análise geométrica: Seção transversal parâmetro 01



Fonte: Autoria própria (2022).

Durante a análise de geometria, foi possível analisar alguns defeitos em alguns parâmetros que impossibilitam a continuidade do estudo com estes parâmetros, como porosidade e/ou falta de fusão, conforme demonstrado como exemplo na Fotografia 18. Sendo assim, alguns parâmetros foram descartados, sendo eles: Parâmetros de níveis 02, 08, 20, 21, 22, 30, 35, 36, 45, 48 e 49.

Fotografia 18 - Análise geométrica: Seção transversal parâmetro 02



Fonte: Autoria Própria (2022).

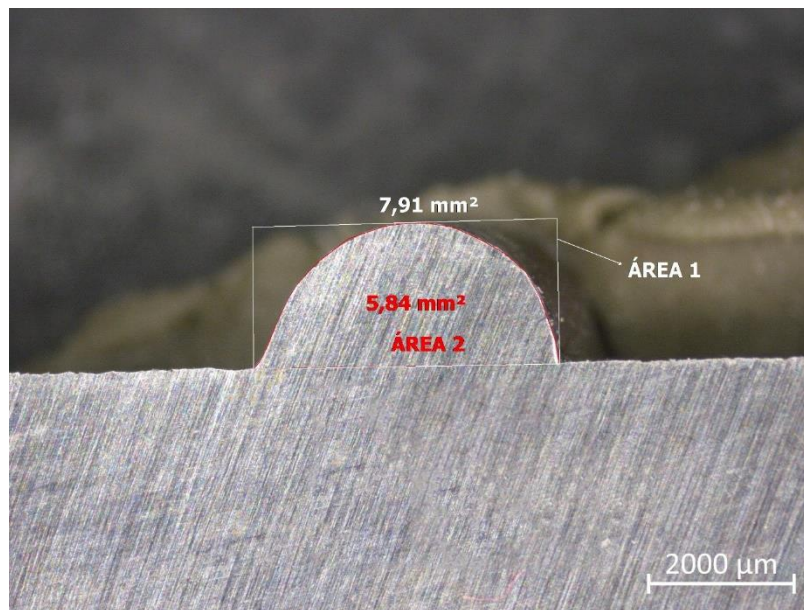
Continuando a análise de geometria da seção transversal dos parâmetros, as amostras a apresentar uma relação de razão altura base (r) abaixo de 0,55 foram descartadas, além das amostras com anomalias descritas anteriormente.

O valor de " r " igual a 1 significa que a seção transversal do reforço da solda apresenta o mesmo valor de altura e base, sendo ideal para a formação de uma geometria aditiva. Valores abaixo de 0,5 significam que a altura é menor que o dobro da largura, formando um retângulo não contribuindo adequadamente para a formação de uma geometria camada a camada. Deste modo, após uma análise dos dados como um todo, optou-se por valores de razão acima de 0,55 com a finalidade da aplicação de mais um filtro nas amostras.

4.1.3 Análise de área inscrita

Conforme metodologia demonstrada na seção 3.7, analisou-se na seção transversal do cordão de solda, a área do envelope do reforço do cordão (área por altura) e a área efetiva do cordão neste envelope, conforme demonstrado na Fotografia 19. Esta metodologia de medição foi seguida para todas as amostras. Apresenta-se apenas uma medição como exemplo por questão de espaço no documento.

Fotografia 19 -Análise de área: Seção transversal parâmetro 01



Fonte: Autoria própria (2022).

Após a medição da ÁREA 1 (área maior) e ÁREA 2 (área menor, inscrita na ÁREA 1), calculou-se a razão entre ÁREA 2 e ÁREA 1. O resultado desta razão ser igual a 1 (um), significa que toda a área possível foi preenchida, algo de excelência para processos de manufatura aditiva. Apesar desta relação ser impossível devido o processo de fabricação utilizado, busca-se valores o tão próximos quanto possíveis de 1 (um).

Os resultados das áreas, assim como suas razões, estão demonstrados e já calculados na Tabela 8. Um valor ausente - com traço - significa que a amostra foi previamente descartada.

Tabela 8 – Relação de áreas inscritas do reforço do cordão

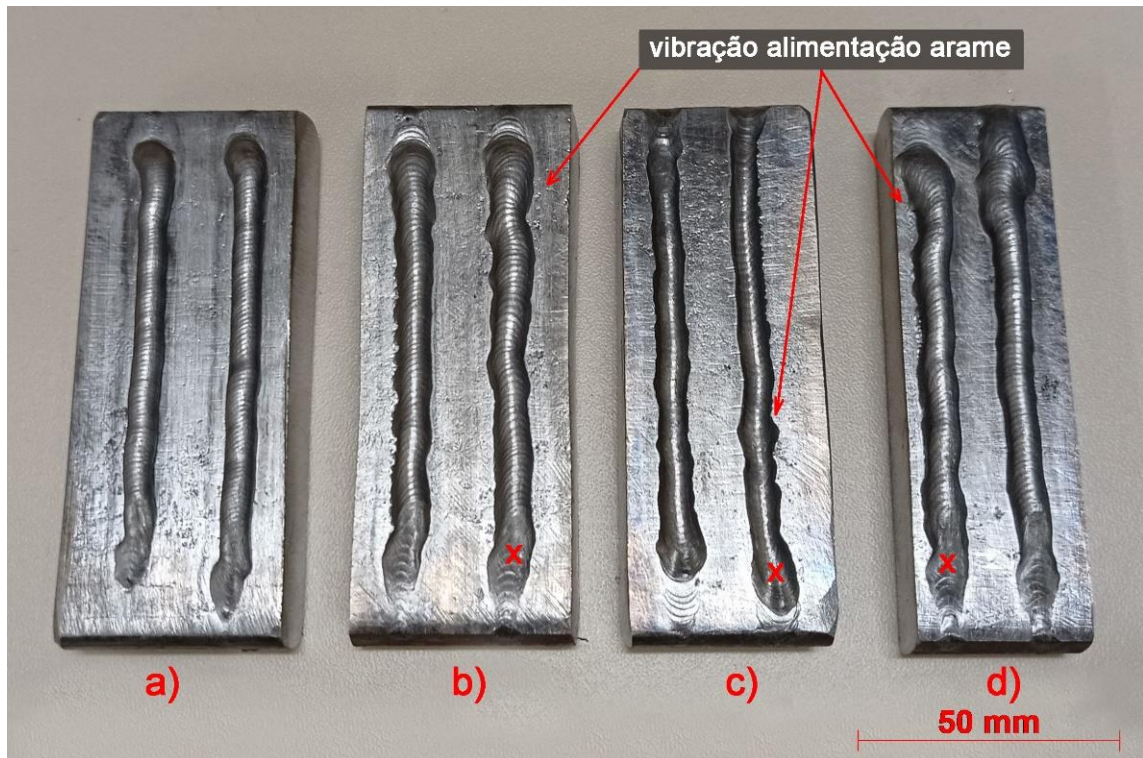
NÍVEL	ÁREA1 [mm]	ÁREA2 [mm]	ÁREA2/ ÁREA1	NÍVEL	ÁREA1 [mm]	ÁREA2 [mm]	ÁREA2/ ÁREA1	NÍVEL	ÁREA1 [mm]	ÁREA2 [mm]	ÁREA2/ ÁREA1
1	-	-	-	19	8,89	10,46	0,85	37	-	-	-
2	-	-	-	20	-	-	-	38	7,26	8,54	0,85
3	8,83	11,75	0,75	21	-	-	-	39	9,09	10,77	0,84
4	10,32	12,59	0,82	22	-	-	-	40	-	-	-
5	10,55	13,03	0,81	23	10,18	12,81	0,79	41	-	-	-
6	-	-	-	24	6,58	8,61	0,76	42	10,01	12,82	0,78
7	-	-	-	25	-	-	-	43	10,91	14,52	0,75
8	-	-	-	26	8,55	10,63	0,80	44	-	-	-
9	-	-	-	27	-	-	-	45	-	-	-
10	7,24	9,25	0,78	28	-	-	-	46	-	-	-
11	11,18	13,68	0,82	29	-	-	-	47	-	-	-
12	8,74	11,36	0,77	30	-	-	-	48	-	-	-
13	7,14	9,41	0,76	31	-	-	-	49	-	-	-
14	7,14	9,41	0,76	32	-	-	-	50	8,12	10,06	0,81
15	-	-	-	33	-	-	-	51	12,79	16,15	0,79
16	-	-	-	34	9,45	11,84	0,80	52	-	-	-
17	8,31	10,51	0,79	35	-	-	-				
18	8,55	10,73	0,80	36	-	-	-				

Fonte: Autoria própria (2022).

Para aplicação de mais um filtro nas amostras selecionadas, optou-se pelas amostras com razão entre ÁREA 2 e ÁREA 1 maior que 0,80. Fundamentado nos resultados obtidos, foi possível selecionar os melhores níveis de parâmetros até então, os quais foram os parâmetros 04, 19, 38 e 39. Para a continuação da escolha do parâmetro ideal, os níveis selecionados foram replicados aos pares, conforme Fotografia 20.

Durante a confecção das amostras réplicas demonstradas na Fotografia 20, houve vibração na alimentação de arame durante a execução do cordão nos níveis 19, 38 e 39, evidenciado pelo aspecto não constante em seu caminho. Todavia, descartou-se os cordões que apresentaram tais vibrações e analisou-se seu par.

Fotografia 20 - Réplica dos níveis seleccionados realizados em pares. a) Nível 04, b) Nível 19, c) Nível 38 e d) Nível 39

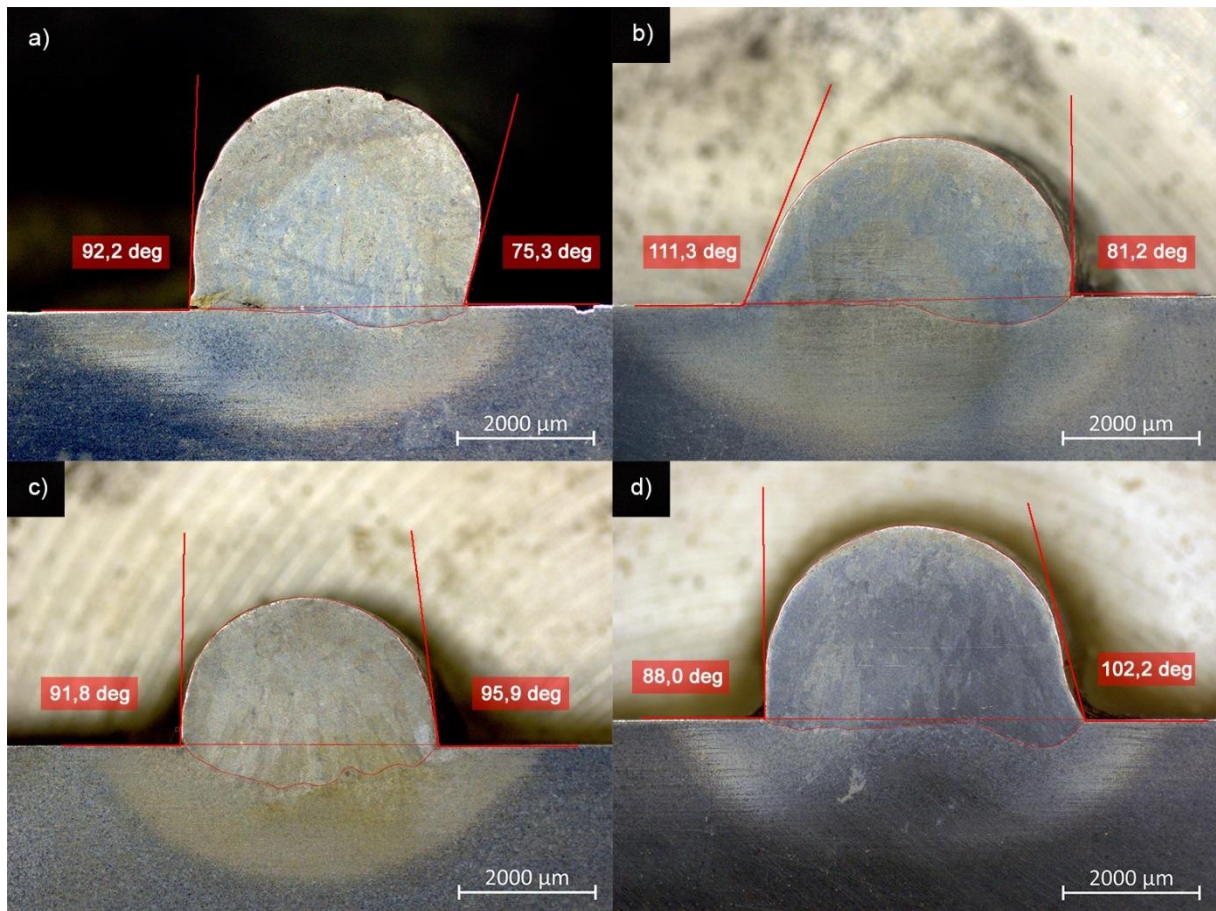


Fonte: Autoria própria (2022).

4.1.4 Molhabilidade

Para análise de molhabilidade dos níveis, mediu-se os ângulos da seção transversal das amostras seleccionadas. As medições estão explanadas na Fotografia 21.

Fotografia 21- Molhabilidade das amostras dos níveis: a) 4 b) 19 c) 38 d) 39



Fonte: Autoria própria (2022).

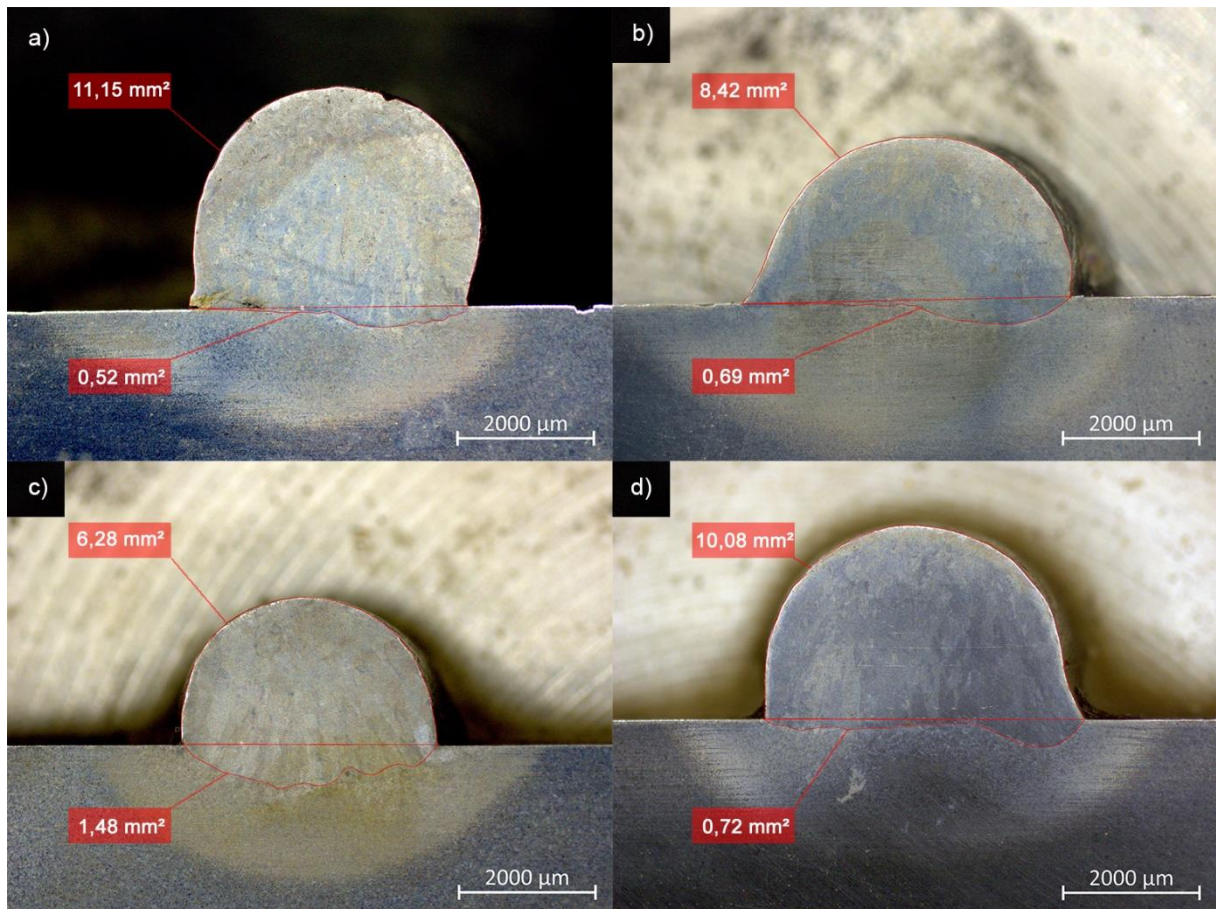
Os valores de molhabilidade demonstrados na Fotografia 21 auxiliam na escolha do parâmetro de forma que, valores mais próximos quanto possíveis de 90 graus se tornem ideais. Valores abaixo de 90 graus podem apresentar porosidade em um empilhamento, tornando-se assim descartáveis. Desta forma, os parâmetros de níveis 38 e 39 tornam-se possíveis candidatos da escolha de parâmetro ideal.

4.1.5 Diluição do reforço no substrato

Por fim, a última propriedade a ser analisada com o objetivo de determinar o parâmetro ideal para o estudo foi a diluição. A diluição do reforço no substrato é essencial para quantificar a quantidade de energia transferida para o substrato. Na manufatura aditiva, valores de baixa diluição são importantes, uma vez que para estruturas empilhadas busca-se o mínimo de transferência de energia térmica para a evitar a interferência de uma camada para a outra.

A Fotografia 22 demonstra as áreas do material de reforço e diluídas dos níveis estudados.

Fotografia 22 - Diluição das amostras de níveis a) 4 b) 19 c) 38 d) 39



Fonte: Autoria própria (2022).

Os valores calculados de diluição calculados, foram:

- Nível 04 = 4,3 %
- Nível 19 = 7,5 %
- Nível 38 = 19,1 %
- Nível 39 = 6,6 %

Com todos os filtros aplicados e dados analisados, é possível determinar o parâmetro ideal para confecção do empilhamento dos cordões.

4.1.6 Definição do parâmetro ideal

Uma vez coletado os dados iniciais, foi possível determinar o valor de parâmetro ótimo para o trabalho de empilhamento. A amostra de nível 04, apesar de apresentar valores menores de diluição, foi descartado por apresentar indícios de falta de fusão do metal base. Esta falta de fusão pode acarretar posteriormente na formação de porosidade e possivelmente uma falta de continuidade nas camadas.

A relação qualitativa entre velocidade de soldagem (v_s) e alimentação de arame (v_a) é diretamente proporcional à estabilidade do arco, sendo possível a mudança de microestrutura e propriedades mecânicas apenas variando a velocidade de soldagem e mantendo a mesma quantidade de energia, o que mudaria a taxa de energia depositada (SU; CHEN *et al.*, 2019).

A literatura demonstra que a largura efetiva de uma parede fabricada por WAAM aumenta com a diminuição da velocidade de soldagem e o aumento da velocidade de alimentação do arame. Ao controlar a velocidade da tocha e a velocidade de alimentação do arame, os grãos colunares grandes são modificados para grãos equiaxiais finos (RAUT; TAIWADE, 2021). A velocidade de soldagem e a corrente contribuem de maneira inversa à entrada de calor. Aumentar a velocidade de deslocamento ou diminuir a corrente causa uma diminuição na profundidade de fusão e um aumento na rugosidade (DINOVITZER; CHEN *et al.*, 2019).

Deste modo, optou-se pelo parâmetro de nível 39, com as seguintes variáveis de parâmetro:

- $C_p = 200 \text{ A}$
- $C_b = 100 \text{ A}$
- $V_{a_p} = 2,9 \text{ cm/min}$
- $V_{a_b} = 1,2 \text{ cm/min}$
- $V_s = .20 \text{ cm/min}$

Utilizou-se destes parâmetros juntamente com o Quadro 3, para realização da deposição dos cordões camada sobre camada.

4.2 Deposição dos Cordões Camada a Camada

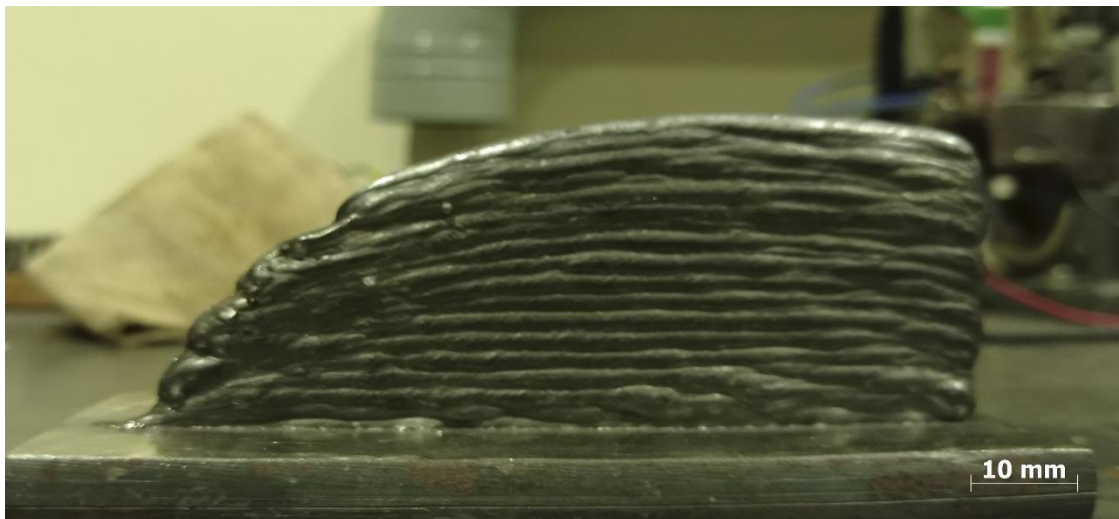
Analogamente a deposição dos cordões únicos, foi confeccionado dois empilhamentos: Um para confecção de corpos de prova na transversal e para análise de rugosidade e seção transversal maior; outro para confecção de corpos de prova longitudinais e análise de perfil menor. Para tal, primeiramente é necessário a inspeção visual destas amostras.

4.2.1 Inspeção visual

Na confecção do empilhamento de cordões, cada cordão gerado era inspecionado isoladamente, entre um passe e outro para verificação da correta aplicação dos parâmetros utilizados, questões de fixação, geometria da peça soldada, ângulos de tocha e alinhamento do sistema de deslocamento. Após a finalização de todos os passes, as amostras foram colocadas para resfriamento ambiente.

As amostras não apresentaram trincas ou porosidades maiores e visíveis a olho nu, seguindo o paralelismo e ortogonalidade esperada como pode ser observado na Fotografia 23 (amostra maior, para retirada de corpos de prova transversais) e na Fotografia 24 (amostra menor, para retirada de corpos de prova longitudinais).

Fotografia 23 - Deposição de cordões para ensaio na transversal



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Fotografia 23 é possível observar um decaimento considerável no final dos cordões do empilhamento. Este evento está relacionado com o fato da soldagem do empilhamento ocorrer em apenas um sentido, aliado com uma interrupção precoce no

momento da execução do 5 passe, que foi replicado para os demais. Para evitar este evento, a literatura recomenda um estudo prévio de caminho da tocha, executando a soldagem de passes em sentidos contrários (DING; PAN *et al.*, 2014). Entretanto, o equipamento utilizado no trabalho (SPS® Tartilope V1) para deslocamento automático da tocha fornece avanço constante apenas em um eixo cartesiano pré-programado, não sendo possível executar um caminho de tocha multidirecional como recomenda a literatura. Deste modo, os pontos de início e finalização dos cordões foram sempre os mesmos, assim como sua direção e sentido, sendo acionados de maneira manual.

Todavia, para manter o nível comparativo, manteve-se os tais parâmetros iguais para todos os cordões realizados no empilhamento.

Fotografia 24 - Deposição de cordões para ensaio na longitudinal



Fonte: Autoria própria (2022).

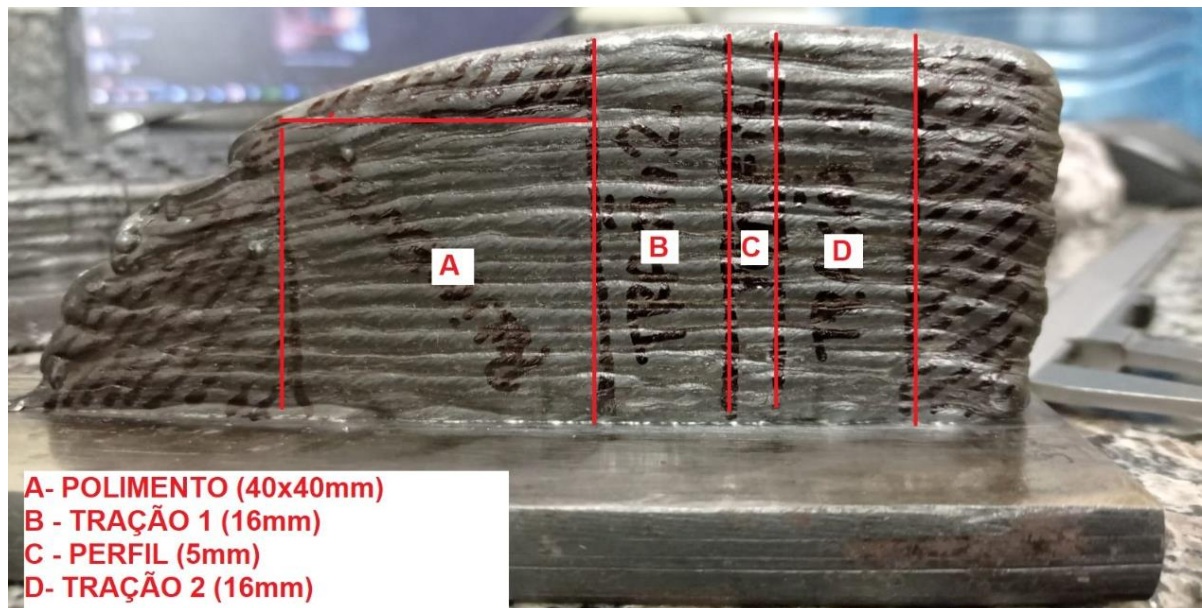
Analogamente à amostra longitudinal, na Fotografia 24 é possível verificar um decaimento da geometria no final da amostra, no qual a operação manual de início e término do processo pode ter contribuído para este decaimento. Todavia, uma vez que o início e o final dos cordões empilhados são descartados devido a máquina operar em regime transiente, este decaimento não apresenta impacto no trabalho final.

4.2.2 Geometria e microestrutura

Para análise da geometria, é necessário um corte em seção transversal da amostra. Os cortes para os ensaios de geometria (seção transversal), ensaio de tração e polimento, estão demonstrados na Fotografia 25 e Fotografia 26. Para a confecção da amostra transversal, retirou-se do empilhamento maior (Fotografia 25) uma fração para ensaio de polimento (a) de tamanho 40x40mm, duas frações para ensaio de

tração (b, d) de tamanho 16x50mm e uma fração para análise de seção transversal (c) de tamanho 5x50mm.

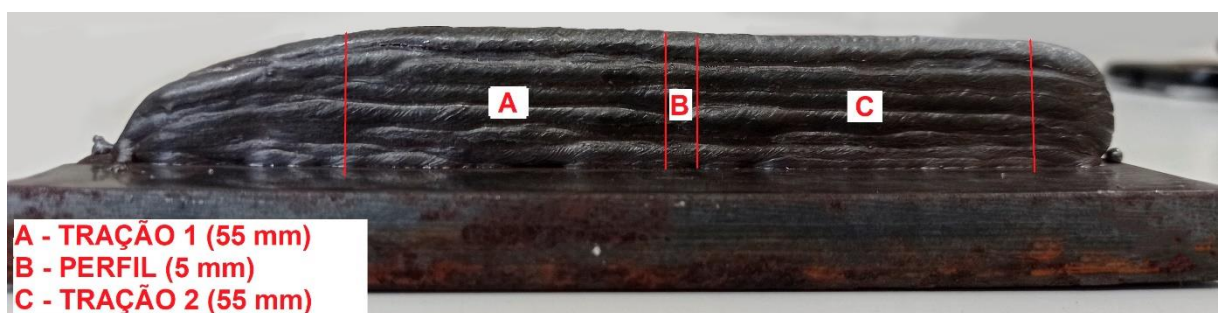
Fotografia 25 - Esquemático para retirada de amostras na transversal



Fonte: Autoria própria (2022).

Analogamente, para os ensaios de geometria na seção longitudinal, retirou-se do empilhamento menor (Fotografia 26) duas frações para ensaio de tração (a, c) de tamanho 55x20mm e uma fração para análise de seção transversal (b) de tamanho 5x20mm.

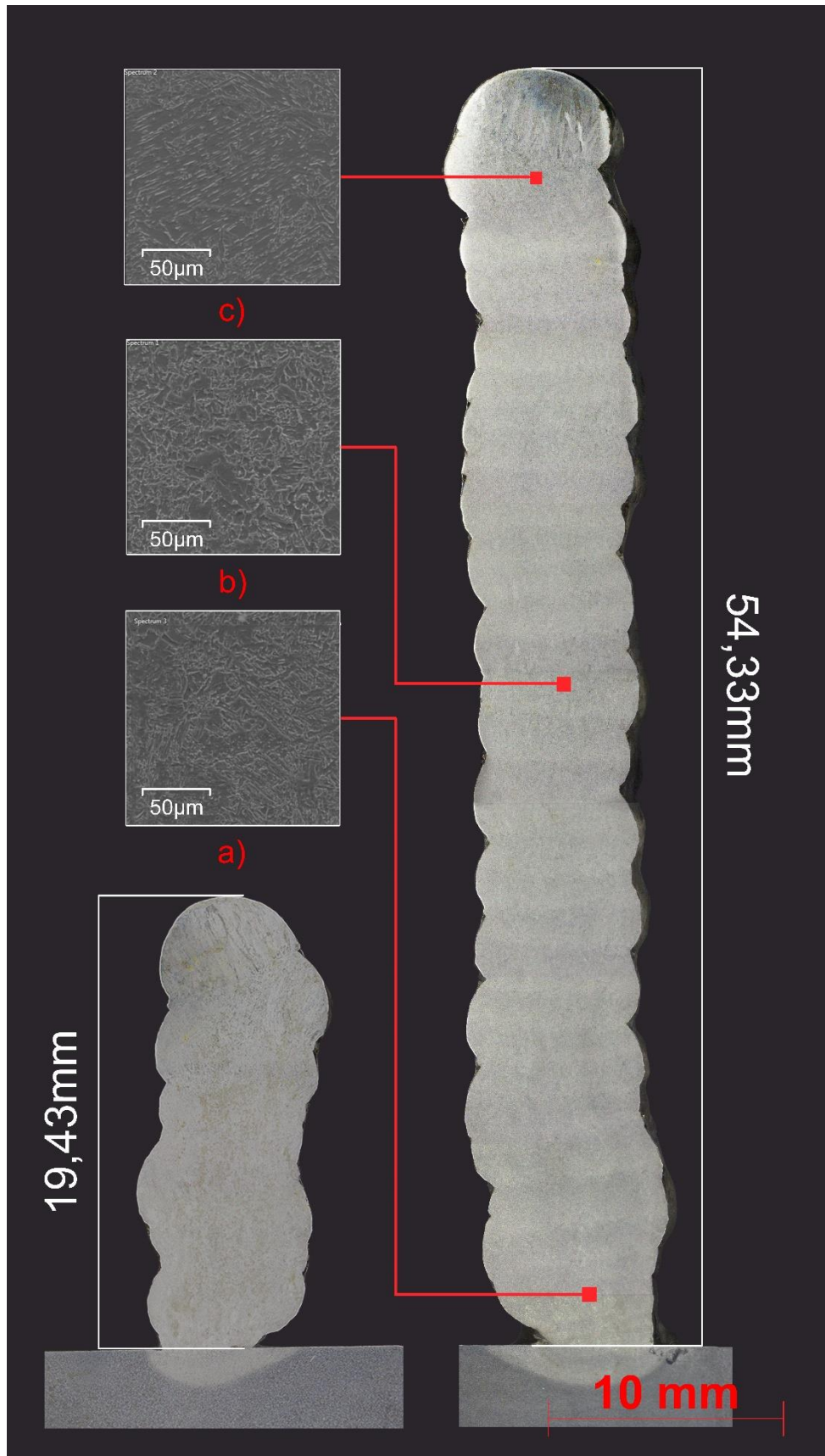
Fotografia 26 - Esquemático para retirada de amostras na longitudinal



Fonte: Autoria própria (2022).

Os ensaios referentes a tração e rugosidade estão demonstrados posteriormente. A análise de seção transversal está disponível na Fotografia 27. Nesta, é possível observar o tamanho total dos cordões de solda, assim como a microestrutura ao longo do empilhamento.

Fotografia 27 - Seção transversal da soldagem camada a camada. a) Microestrutura do início da estrutura, b) Microestrutura do meio da estrutura c) Microestrutura do topo da estrutura



Fonte: Autoria própria (2022).

Foi possível observar ferrita e perlita tanto no começo quanto no meio da estrutura. Em seu topo, nos cordões finais, cementita é visualizada. Esta concepção de cementita pode estar relacionada ao revenimento natural, uma vez este último cordão ser resfriado muito mais lentamente, além de não ser exposto a mais um ciclo térmico.

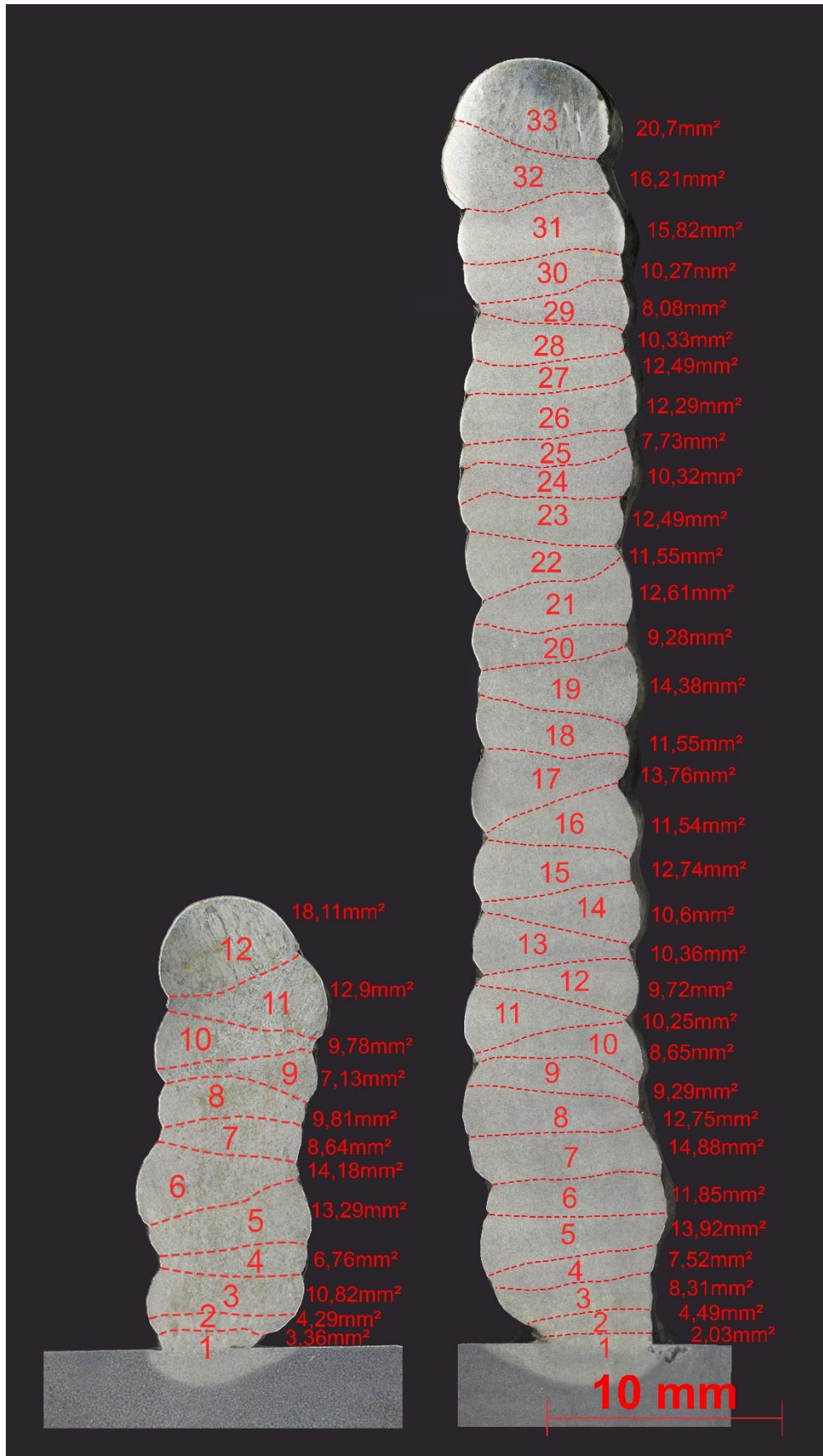
Para uma caracterização do empilhamento de modo mais quantitativo em relação ao comportamento dos cordões empilhados, é necessária uma observação da seção transversal com ataque químico.

4.2.3 Caracterização do empilhamento

Para a caracterização do empilhamento foi utilizado a mesma amostra anterior, agora com um ataque químico utilizando Nital 5% com finalidade de expor os contornos das camadas soldadas e assim ser possível a realização de medições de diluição dos cordões de solda diluídos ao longo do empilhamento.

É de fácil observação na Fotografia 28 que os primeiros cordões apresentam uma tendência de menor tamanho, tanto na amostra maior quanto na amostra menor. Em ambas as amostras, os cordões com maior área são os últimos a serem depositados. Este padrão de tamanho de cordões é também visualizado na literatura, como resultado da influência térmica da camada adjacente à camada anterior, onde a mistura dos materiais soldados e microestruturas são refundidas (XU; MI *et al.*, 2017).

Fotografia 28 – Diluição da soldagem camada a camada



Fonte: Autoria própria (2022).

Os valores de área dos cordões diluídos na amostra transversal e longitudinal ilustrados anteriormente na Fotografia 28, estão distribuídos na Tabela 9. Para facilitar a análise, adicionou-se também um percentual de área do cordão diluído e área acumulada, para melhor visualização do empilhamento.

Tabela 9 – Valores de área dos cordões diluídos nas amostras empilhadas

N° do cordão	AMOSTRA TRANSVERSAL			AMOSTRA LONGITUDINAL		
	Área [mm ²]	% Área [%]	% Área acumulada [%]	Área [mm ²]	% Área [%]	% Área acumulada [%]
33	20,7	6%	100%	-	-	-
32	16,21	4%	94%	-	-	-
31	15,82	4%	90%	-	-	-
30	10,27	3%	86%	-	-	-
29	8,08	2%	83%	-	-	-
28	10,33	3%	81%	-	-	-
27	8,89	2%	78%	-	-	-
26	12,29	3%	75%	-	-	-
25	7,73	2%	72%	-	-	-
24	10,33	3%	70%	-	-	-
23	12,49	3%	67%	-	-	-
22	11,55	3%	64%	-	-	-
21	12,61	3%	60%	-	-	-
20	9,29	3%	57%	-	-	-
19	14,38	4%	54%	-	-	-
18	11,55	3%	50%	-	-	-
17	13,76	4%	47%	-	-	-
16	11,54	3%	44%	-	-	-
15	12,74	3%	40%	-	-	-
14	10,6	3%	37%	-	-	-
13	10,36	3%	34%	-	-	-
12	9,72	3%	31%	18,11	15%	100%
11	10,25	3%	28%	12,9	11%	85%
10	8,65	2%	26%	9,78	8%	74%
9	9,29	3%	23%	7,13	6%	66%
8	12,75	3%	21%	9,81	8%	60%
7	14,88	4%	17%	8,64	7%	52%
6	11,85	3%	13%	14,18	12%	44%
5	13,92	4%	10%	13,29	11%	32%
4	7,52	2%	6%	6,76	6%	21%
3	8,31	2%	4%	10,82	9%	16%
2	4,49	1%	2%	4,29	4%	6%
1	2,03	1%	1%	3,36	3%	3%

Fonte: Autoria própria (2022).

Ao analisar a Tabela 9, observa-se que os primeiros cordões apresentam pouca influência em relação a área total do empilhamento. Para MA, este comportamento muitas vezes se faz indiferente, devido a possível remoção da peça finalizada do material utilizado para substrato. Outra observação é o valor de área de cada cordão. Ao remover da análise os três cordões iniciais e os três cordões finais (extremidades da amostra), cada cordão representa em área, uma média de 3% da área total. A metade do cordão encontra-se também na metade da área, evidenciando um padrão ao executar o empilhamento dos cordões.

A diluição dos elementos químicos ao longo do empilhamento está demonstrada na Tabela 10. As regiões A, B e C, demonstradas na Fotografia 27, correspondem respectivamente às regiões de início, meio e topo da estrutura empilhada. O substrato está demonstrado apenas para fins de comparação.

Tabela 10 - Diluição dos elementos químicos ao longo do empilhamento

	Fe [Wt%]	Ni [Wt%]	Mn [Wt%]	Si [Wt%]	Cr [Wt%]	Mo [Wt%]
Substrato	98,3	-	1,7	-	-	-
Região A	95,4	2,1	1,8	0,1	0,3	-
Região B	95,1	2,4	1,4	0,3	0,3	0,4
Região C	95,1	2,5	1,5	0,3	0,3	0,4

Fonte: Autoria própria (2022).

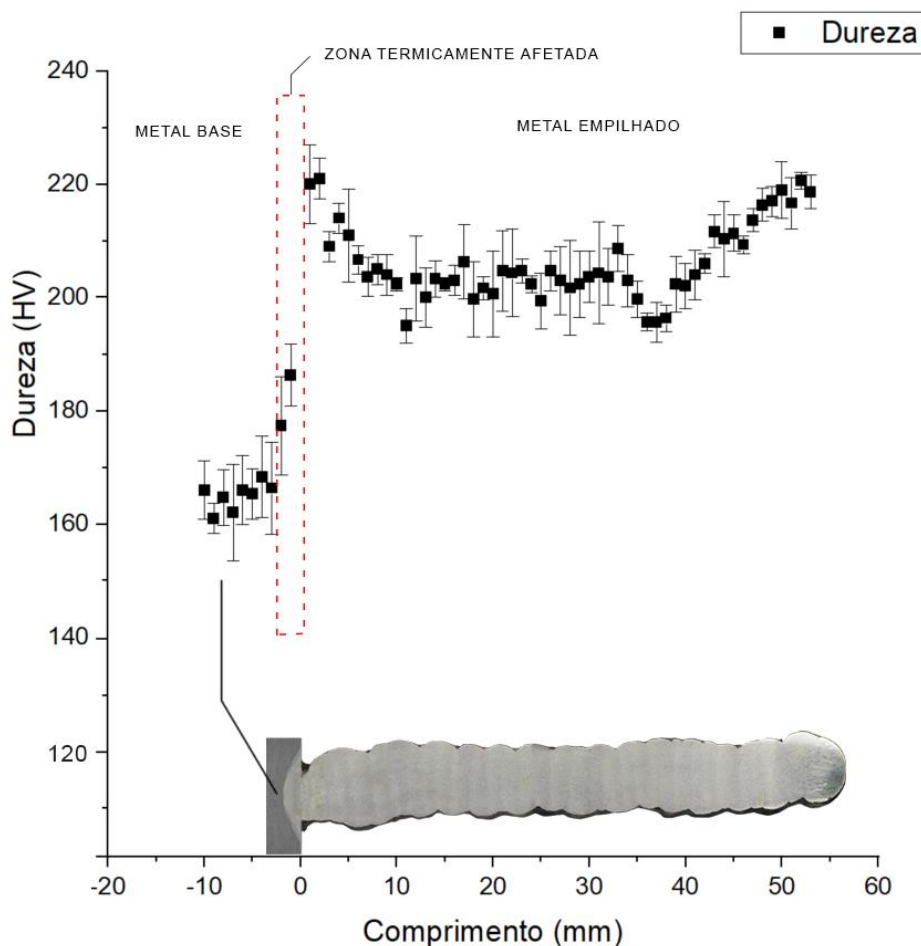
Os dados apresentados na Tabela 10 indicam a maior diluição da composição química do arame do aço VP50IM. Este regime transiente do início do processo causa uma não padronização no início e final da amostra não apenas na diluição, mas também de propriedades mecânicas como visualizado no mapeamento de Microdureza.

O elevado aporte térmico intrínseco do processo de soldagem acarreta em inevitáveis tratamentos térmicos durante o processo (CHIAVERINI, 2008). Na MA, devido a grande quantidade de ciclos térmicos e refundição das camadas anteriores pelas camadas adjacentes ocasiona uma mescla dos elementos químicos, devido este elevado aporte térmico.

4.2.4 Mapeamento de microdureza

A dureza dos corpos de prova foi analisada por ensaio de microdureza Vickers com carga de 300 gf conforme metodologia descrita anteriormente. Com os dados de microdureza retirados, é possível compreender o comportamento da dureza ao longo da seção transversal da amostra soldada camada a camada através de um mapeamento de dureza. Desta forma, é possível determinar a influência da composição da liga sobre as propriedades mecânicas dos cordões soldados graficamente. O Gráfico 1 e Gráfico 2 apresentam o mapa de microdureza Vickers (HV) das amostras soldadas camada a camada, onde o eixo das abcissas representam o comprimento do corpo de prova e o eixo das coordenadas o valor de microdureza.

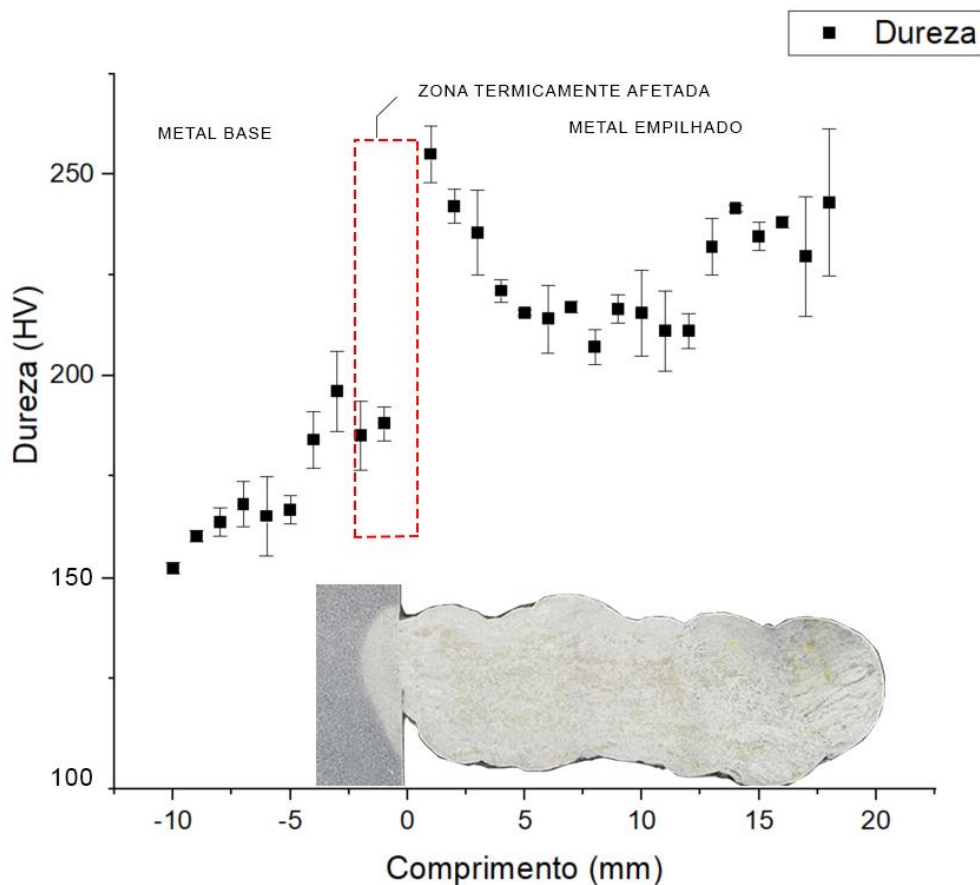
Gráfico 1 - Mapeamento de dureza Amostra 1 (transversal)



Fonte: Autoria própria (2022).

A dureza das amostras soldadas pode estar relacionada à quantidade de energia depositada durante o processo de soldagem, além do tratamento térmico induzido durante a deposição desta energia. É possível observar tanto no Gráfico 1, quanto no Gráfico 2 uma diminuição em média 9% no valor de durezas medidas na região central do corpo de prova. Esta diminuição de dureza pode estar relacionada com a quantidade de energia transferida para a peça durante o regime permanente do estudo. Este decaimento da dureza começa a partir de 5mm, a partir do 3 cordão depositado e permaneceu constante até os últimos dois cordões depositados, onde a dureza volta a aumentar.

Gráfico 2 - Mapeamento de dureza Amostra 2 (longitudinal)



Fonte: Autoria própria (2022).

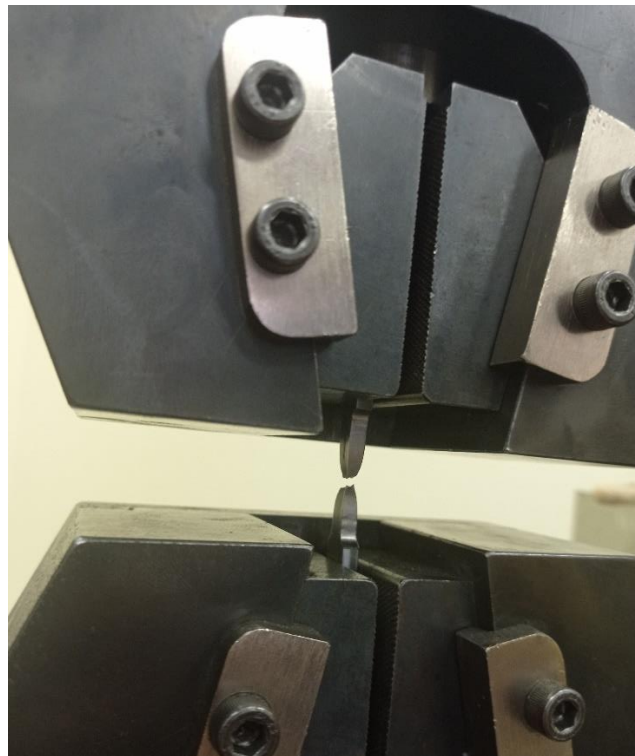
Ao Gráfico 1 e o Gráfico 2, é possível observar que a maneira que o processo de empilhamento se desenvolve, há uma estabilização das propriedades de dureza do empilhamento. O acúmulo de calor afeta a microdureza dos cordões depositados fora do regime permanente. (WU; XUE *et al.*, 2019), ou seja, no começo e no final da solda, onde a taxa de resfriamento dos cordões de solda sofrem alteração.

Devido ao reaquecimento gerado pela nova camada depositada e o fluxo térmico repetitivo, o mecanismo de difusão dos elementos de liga é facilitado, onde a martensita é parcialmente temperada e os precipitados aumentam de volume, ocasionando fragilização dos corpos de prova (HACKENHAAR; MAZZAFERRO *et al.*, 2022). Como várias camadas foram depositadas continuamente uma acima da outra, por mais que tenha sido respeitado o tempo de resfriamento entre camadas, a base sofre mais ciclos térmicos com diferentes taxas de calor entre eles, demonstrando valores de dureza mais elevados no início e final da peça.

4.2.5 Propriedades mecânicas à tração

A Fotografia 29 evidencia a finalização do ensaio de tração, demonstrando o alinhamento do corpo de prova para com a máquina.

Fotografia 29 - Aspecto final do corpo de prova após finalização do ensaio de tração



Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de tração, onde A1 e A2 são corpos de prova na direção longitudinal ao sentido de soldagem e B1 e B2 são corpos de prova na direção transversal ao sentido de soldagem.

O elevado aporte térmico transferido da camada subsequente sobre a camada anterior apresenta influência em parte da ferrita ser dissolvida na austenita, gerando influência nas propriedades de resistência à tração do material. Um contorno de grão colunar é propenso a rachaduras, o que degrada a resistência à tração. Aumentar o tempo de resfriamento ou a velocidade de varredura pode refinar o grão, aumentando a resistência à tração (XU; MI *et al.*, 2017).

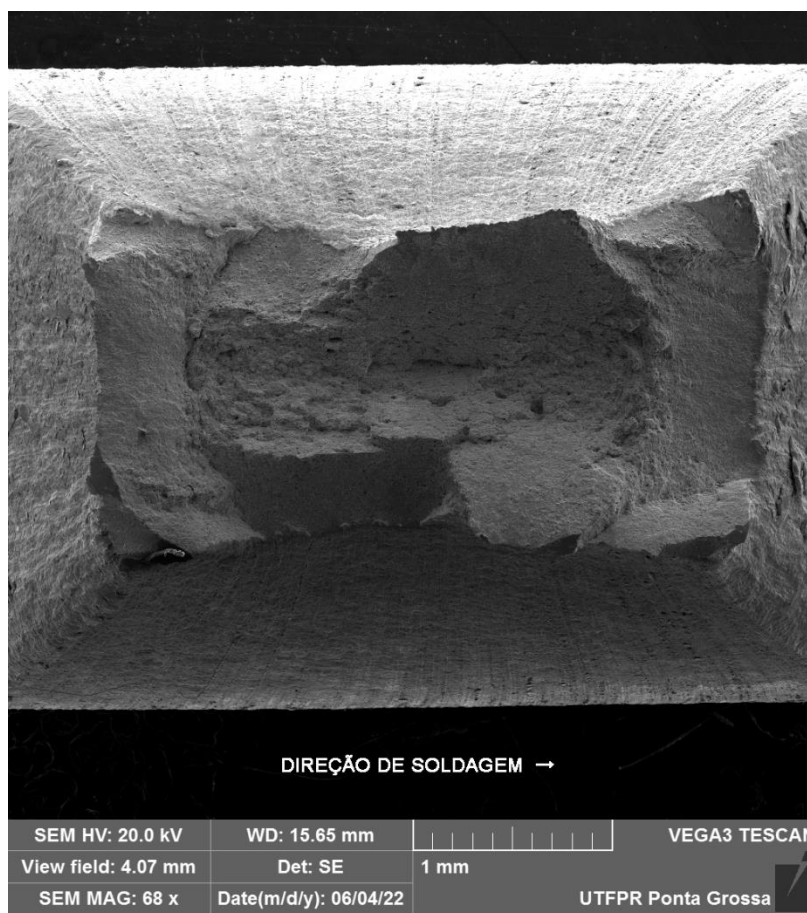
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração uniaxial

	Tensão Escoamento	Tensão Máxima	Redução Área
	[MPa]	[MPa]	[%]
A 1	633,25	642,5	39,1
A 2	562,75	655,9	37,2
B 1	529,80	638,8	34,8
B 2	514,14	634,1	38,0

Fonte: Autoria própria (2022).

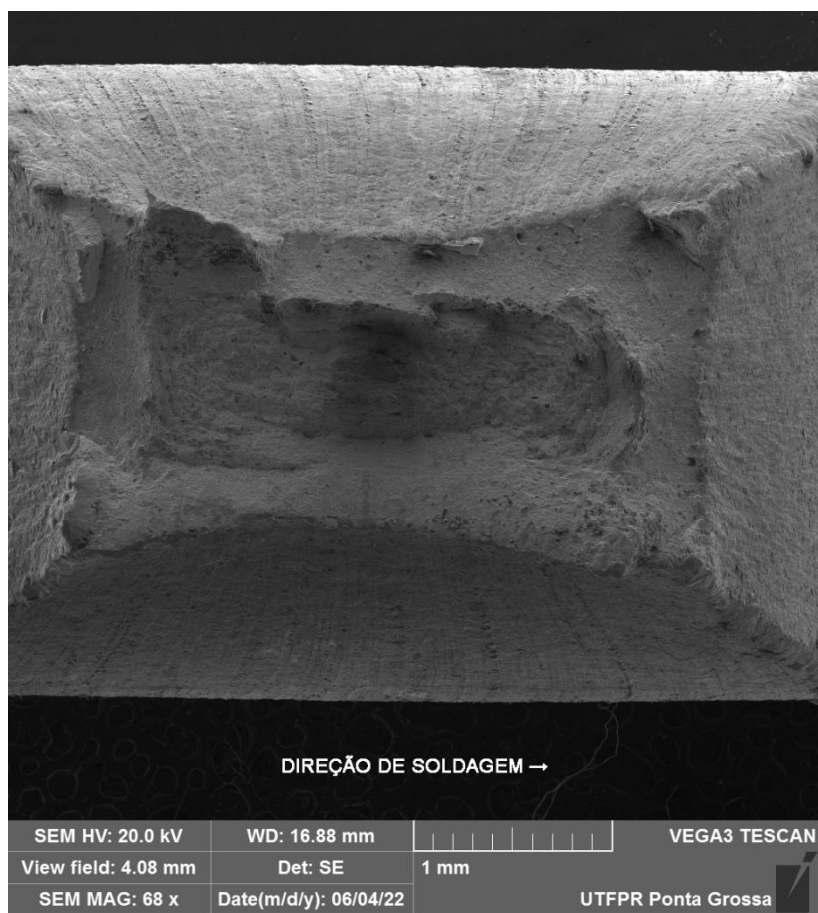
Desse modo, pela análise da Tabela 11, os corpos de prova longitudinais submetidos ao ensaio de tração apresentaram uma tensão de escoamento até 15% maior em relação ao corpo de prova transversais e uma redução de área média até 5% menor. Ao analisar literaturas que desenvolveram a mesma metodologia de ensaios de tração para amostras confeccionadas por MA, é possível observar que o tratamento térmico apresenta influência direta no resultado de ensaios de tração transversal de amostras, de modo a diminuir o acúmulo de calor diminuiu com resfriamentos prolongados melhoram tais propriedades devido os cristais celulares refundidos entre as camadas forem relativamente curtos. Entretanto, o aumento do tempo de espera de resfriamento entre camadas gera mais impurezas e óxidos entre camadas, podendo ser prejudicial para resultados de ensaios de tração transversal comparado com a longitudinal (WU; XUE *et al.*, 2019)

Após ensaio de tração, para continuação da avaliação as propriedades mecânicas à tração, analisou-se também a fratura ocasionada pelo ensaio de tração dos corpos de prova, sendo possível a visualização com mais detalhes da estrição (empescoçamento), conforme demonstra a Fotografia 30 para amostra longitudinal e a Fotografia 31 para amostra transversal.

Fotografia 30 - Fratura corpo de prova longitudinal

Fonte: Autoria própria (2022).

A análise das Fotografias de Fratura indica sinais que a estrição do material foi elevada, fator possivelmente potencializado devido o tratamento térmico de têmpera e revenimento não ser realizado em ambos os corpos de prova. Desta forma, é esperado um material mais resiliente, com uma redução de área e ductilidade maior em comparação com o mesmo material sofrido tratamento térmico (CHIAVERINI, 2008).

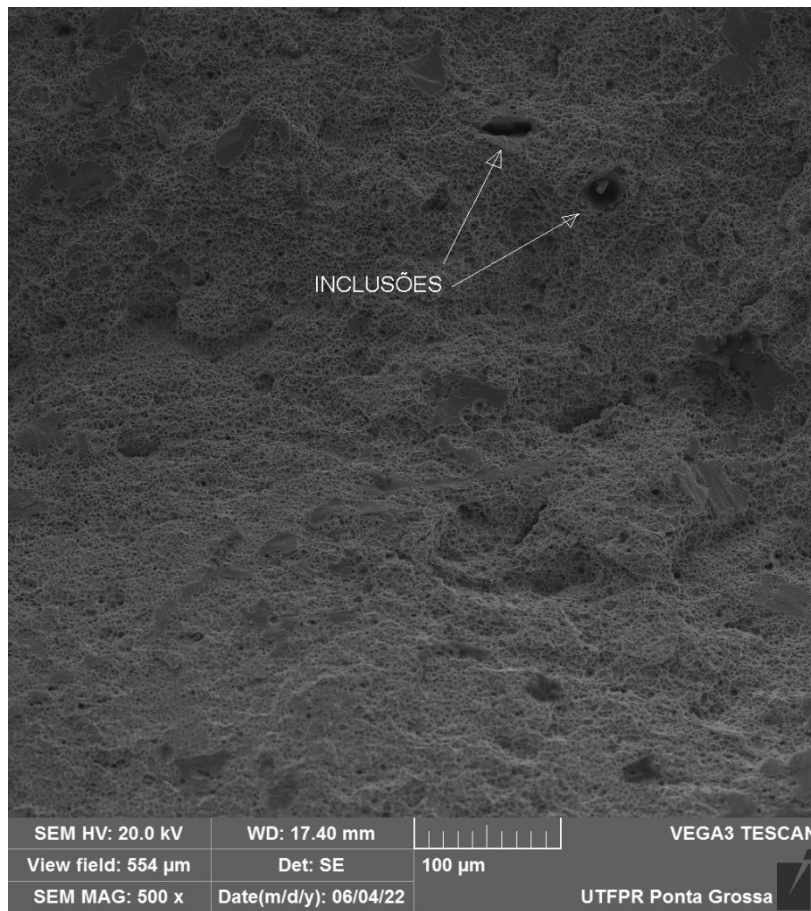
Fotografia 31 - Fratura corpo de prova transversal

Fonte: Aatoria própria (2022).

Para uma investigação com mais detalhes, explorou-se o tipo de fratura (dúctil), em busca de micro trincas ou sinais que evidenciem defeitos de soldagem, microestrutura frágil ou variação de microestrutura entre camadas. Porém, não foram encontrados quaisquer sinais de defeitos ou microestrutura frágil na fratura dos corpos de prova analisados. Todavia, foi possível a visualização da formação de alvéolos (*dimples*) e inclusões, conforme demonstra a Fotografia 32.

Evidenciar a presença de alvéolos se faz necessário para diferenciar um possível mecanismo de propagação da trinca e diferenciar fraturas dúcteis (estáveis, sob cargas crescentes) e frágeis (instáveis, sob cargas críticas atingidas) (ASM INTERNATIONAL, 1993).

Fotografia 32 - Fratura do corpo de prova: Alvéolos e inclusões



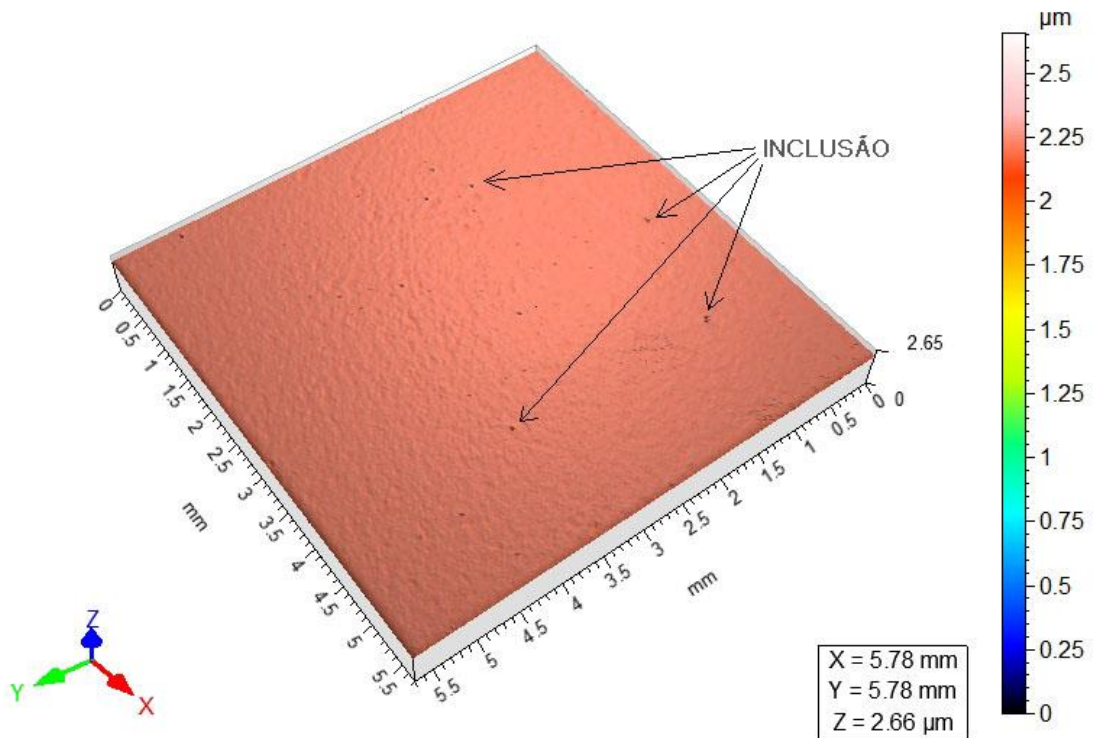
Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.6 Estudo do aspecto superficial do depósito após polimento

A análise de superfície tem como objetivo avaliar a continuidade e constância de valores de rugosidade, tendo em vista que o processo de manufatura aditiva se constitui na confecção de camada a camada, processo este não contínuo.

Na Figura 24 apresenta-se a imagem da superfície obtida por perfilometria. Nesta imagem é possível observar algumas inclusões, mas não foram identificadas quaisquer falhas provenientes do empilhamento dos cordões depositados por MA.

Figura 24 - Análise de Rugosidade com ampliação de 50x



Fonte: Autoria própria (2022).

Os valores de rugosidade obtidos através do ensaio de perfilometria estão demonstrados na Tabela 12. Para a ISO 4287 o perfil de rugosidade foi gerado com filtro gaussiano de 0,8mm.

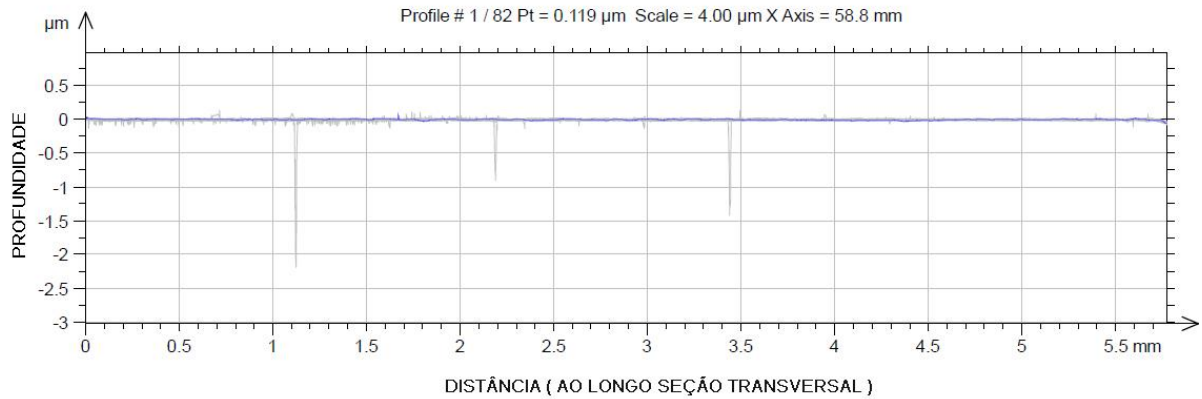
Tabela 12 – Valores de rugosidade atingida com polimento

ISO 4287				
Parâmetros de Amplitude	Principal [μm]	Desvio padrão	mínimo	máximo
Ra	0,00343	0,00102	0,00253	0,0101
Rq	0,00508	0,00433	0,00323	0,0359
Rt	0,103	0,3	0,0189	2,27
Rz	0,0346	0,0525	0,0157	0,415
Rp	0,012	0,00616	0,00715	0,0494
ISO 25178				
Parâmetros de Altura	Principal [μm]			
Sa	0,00417			
Sq	0,0101			
Sz	2,66			
Sp	0,411			
Sv	2,24			

Fonte: Autoria própria (2022).

Com o auxílio do Gráfico 3, resalta-se os pequenos valores de picos e vales na superfície polida, chegando a valores de até 2 μm , valores estes possivelmente relacionados às inclusões demonstradas na Figura 24.

Gráfico 3 - Análise de profundidade de superfície com ampliação de 50x



Fonte: Autoria própria (2022).

A literatura demonstra que soldagem utilizando multipasses, como MA por exemplo, podem promover revenimento nas regiões adjacentes, resultando em níveis de dureza diferenciados e conseqüentemente, variações significativas no acabamento final (BERKENBROCK; JARDIM *et al.*, 2010). Entretanto, demonstrados os resultados do ensaio de rugosidade, não foram encontradas quaisquer evidências de quebra de continuidade por MA nas amostras, demonstrando que é possível obter um polimento de qualidade em peças ou reparos executados por empilhamento utilizando WAAM GTAW pulsado.

5 CONCLUSÕES

Observou-se uma sensibilidade elevada dos parâmetros do processo GTAW pulsado para WAAM, uma alteração mínima de ângulo de tocha ou alimentação do arame também pode acarretar em alteração do resultado final. Ao realizar um experimento desta natureza utilizando tais máquinas e processos, recomenda-se a fabricação de gabaritos de ângulos e batentes, a certificação de eliminar o máximo possíveis folgas e vibrações na alimentação de arame, tocha e metal base, além de uma execução de experimento sistemática e metódica para a garantia dos melhores resultados possíveis.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios demonstrados, conclui-se que:

- A seleção do parâmetro para o estudo apresentou bons resultados, validados pela geometria fabricada, evidenciando que a análise de parâmetros como diluição, molhabilidade e geometria de reforço são fatores importantes ao selecionar o parâmetro $C_p=200A$, $C_b=100A$, $V_{ap}=2,9\text{cm/min}$, $V_{ab}=1,2\text{cm/min}$ e $V_s=20\text{cm/min}$ para a confecção de uma estrutura utilizando MA.
- O mapeamento de dureza ao longo do corpo de prova evidenciou valores de menor dureza nas seções centrais do empilhamento, assim como nas extremidades valores de maior dureza, alcançando até 9% de destoantes. Fato este relacionado com o próprio revenimento intrínseco ao processo de soldagem camada a camada, devido a quantidade de energia transferida para o material.
- Os corpos de prova longitudinais submetidos ao ensaio de tração apresentaram uma média de tensão de escoamento de 598 MPa no sentido longitudinal da deposição dos cordões de solda e 522 MPa no sentido transversal. Ou seja, houve um aumento na tensão de escoamento de até 15% em relação ao sentido de deposição dos cordões empilhados. Deste modo, ao determinar o caminho da tocha na confecção de uma ferramenta aditiva, é importante considerar o sentido da confecção do empilhamento, por ser influenciado na tensão de escoamento da peça final. Os valores de redução de área apresentaram uma média de 37% da área inicial, com uma variação de 5% entre os ensaios no sentido transversal e longitudinal de empilhamento,

evidenciando uma ductilidade levemente maior no sentido longitudinal dos cordões;

- A análise da fratura do corpo de prova do ensaio de tração mostrou evidências de uma fratura dúctil, com alvéolos e algumas inclusões dos elementos químicos do aço. Entretanto, esta ocorrência era esperada uma vez que optou-se por não efetuar tratamento térmico de têmpera e revenimento nas amostras após o processo de soldagem, não tornando o material frágil;
- Os resultados do ensaio de rugosidade através de perfilometria ótica demonstraram uma possibilidade de constância de rugosidade e perfil das amostras polidas, não demonstrando indícios de descontinuidade entre cordões de solda e empilhamento. Apesar da evidência de algumas inclusões, valores de Ra 0,265 foram alcançados utilizando polimento de 0,25µm. Isso demonstra que a viabilidade da confecção e restauração de matrizes utilizando MA, desde que seja possível polimento adequado.

5.1 Recomendações Para Trabalhos Futuros

Durante a realização do presente estudo, percebeu-se algumas linhas de pensamento suplementares à pesquisa, as quais poderiam ser aprofundadas em trabalhos futuros. Algumas dessas ideias são listadas a seguir:

- a) *Avaliar a influência do tratamento térmico de têmpera e revenimento nas propriedades mecânicas.*

Após a realização dos ensaios mecânicos, na coleta de informações, percebeu-se que muitos dos dados catalogados comercialmente possuem o aço ferramenta já com o tratamento térmico. Realizar este estudo com o tratamento térmico seria bom para comparar com o material comercial.

- b) *Avaliação dos parâmetros escolhidos*

Em nosso estudo, utilizou-se uma metodologia de escolha de parâmetros dentre 52 amostras até a seleção de 4 melhores parâmetros ideias. Utilizar outra metodologia para a escolha de outro parâmetro, ou até mesmo escolher outro dos 3 parâmetros faltantes ideais, tornaria possível uma comparação de propriedades mecânicas e geometrias obtidas.

c) *Avaliação da influência da temperatura de interpasse*

O controle da temperatura de interpasse, sem dúvida foi um fator que tomou muito tempo. Conforme citado anteriormente, há estudos na literatura (DINOVITZER; CHEN *et al.*, 2019) que demonstram a possibilidade de diminuição de 20% da energia depositada (corrente) entre passes, gerando bons resultados. Replicar o estudo com a diminuição da energia entre passes leva a uma comparação interessante para a comunidade científica.

Além dos itens propostos, quaisquer variações nos parâmetros já categorizam um estudo diferencial dentro o universo da soldagem, sendo de grande valia para a determinação de parâmetros e propriedades em processos de soldagem GTAW pulsado.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem e inspeção**, São Paulo, 19, Abr/Jun 2014. 190-198.
- ALMEIDA, A. M. D. **Principais barreiras de implementação de manufatura aditiva no brasil**. São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2019.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Standard welding terms and definitions**. Miami: AWS, 2001. 141 p.
- ARPITA, N. B.; VIKRAM, A. P. Influence of process parameters of TIG welding process on mechanical 304LSS Welded Joint. **Research journal of engineering and technology**, v. 3, n. 5, p. 977-984, May 2016.
- ASM INTERNATIONAL. **Metals handbook**. 9. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 12, 1993.
- ASTM. 52900:2015. **Standard terminology for additive manufacturing: General Principles – Terminology**, v. i, p. 1-9, 2015.
- BARBOSA, C. A.; MESQUISTA, R. A. Novo aço ferramenta de alta resistência a quente. **Tecnologia em metalurgia e materiais**, São Paulo, 3, Jan-Mar 2007. 63-68.
- BERKENBROCK, E. *et al.* Análise do Comportamento do Aço AISI P20 Beneficiado e Soldado Utilizado em Moldes de Injeção. **19º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais – CBECiMat**, 2010. 5998-6006.
- BERTOLDI, M. *et al.* Domain decomposition and space filling curves in toolpath planning and generation. **Proceedings of the 1998 solid freeform fabrication symposium**, Austin, Texas, v. University of Illinois at Chicago, 1998.
- BHARAT KUMAR, C. H.; ANANDAKRISHNAN, V. Experimental investigations on the effect of wire arc additive manufacturing process parameters on the layer geometry of Inconel 825. **Materials today: Proceedings**, v. 21, p. 622-627, 2020.
- BROGAN, C. **World's first 3d-printed steel footbridge unveiled by queen máxima in amsterdam**. Imperial College London, 2021. Disponível em: <https://www.imperial.ac.uk/news/226533/worlds-first-3d-printed-steel-footbridge-unveiled>. Acesso em: 28 Agosto 2021.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: An Introduction**. 10th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2020. 944 p.
- CARTER, K. Advantages of wire-arc additive manufacturing. **Thermal processing**, 2020. Disponível em: <https://thermalprocessing.com/advantages-of-wire-arc-additive-manufacturing>. Acesso em: 05 Setembro 2021.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 272 p.

COTTAM, R.; WANG, J. Characterization of microstructure and residual stress in a 3D H13 tool steel component produced by additive manufacturing. **Journal of materials research**, 29, 2014. 1978-1986.

DING, D. *et al.* "A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing". Wollongong: Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers, v. 2729, 2014.

DING, D. *et al.* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Robotics and computer-integrated manufacturing**, 31, 2015. 101-110.

DING, D. *et al.* Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 81, p. 465-481, 2015.

DINOVITZER, M. *et al.* Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure. **Additive manufacturing**, v. 26, p. 138-146, March 2019.

DUNLAVEY, M. R. Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. **ACM Transactions (TOG)**, v. 2, p. 264-273, 1983.

DWIVEDI, R.; KOVACEVIC, R. Automated Torch Path Planning Using Polygon Subdivision for Solid Freeform Fabrication Based on Welding. **Journal of manufacturing systems**, Texas, v. 23, n. 4, p. 278-291, 2004.

EBRAHIMNIA, M. *et al.* Application of a Low Heat Input Deposition Process for Refurbishment of Worn PM Forming Dies Using Fe-Ni Based Filler Metal. **Powder metallurgy progress**, v. 18, p. 116-120, 2018.

FISCHER, U. *et al.* **Manual de tecnologia metal mecânica**. 43. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

GABARDO, J. F. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

GIBSON, I.; STUCKER, B.; ROSEN, D. W. **Additive manufacturing technologies rapid prototyping to direct digital manufacturing**. 2ª. ed. New York: Springer, 2010. 510 p.

GOKHALE, N. P.; KALA, P. Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method. **Materials today: Proceedings**, 44, 2021. 453-459.

GOMES, K. **Portos e navios**, 2020. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/artigos/estudo-e-pesquisa/impressao-3d-no-setor-naval>. Acesso em: 05 Setembro 2021.

GROOVER, M. P. **Introduction to manufacturing processes**. 1ª. ed. Bethlehem: John Wiley & Sons, 2012. 758 p.

HACKENHAAR, W. *et al.* **Effects of different WAAM current deposition modes on the mechanical properties of aisi H13 tool steel.** [S.l.]: International Institute of Welding, 2022.

HEJRIPOUR, F. *et al.* Thermal Modeling and Characterization of Wire Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel. **Journal of materials processing technologies**, v. 272, p. 58-71, 2019.

HOWELL, E. **SPACE.com**, 2014. Disponível em: <https://www.space.com/26899-spacex-3d-printing-rocket-engines.html>. Acesso em: 29 Agosto 2021.

KUTELU, B. J. *et al.* Review of GTAW Welding Parameters. **Journal of minerals and materials characterization and engineering**, v. 6, p. 541-554, 2018.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding**. 6th. ed. England: Woodhead Publishing, 1999. 797 p.

LIPSON, H. **Frontiers in additive manufacturing**. Bridge: , v. 42, 2012.

MACIEL, J. C.; FRANÇA, L. C.; NAVES, G. L. **Aços ferramenta e tratamento térmico**. [S.l.]: Villares Metals, 2004.

MINITAB, S. S. **Minitab statistical software**, 2021. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/>. Acesso em: dezembro 2021.

MODENESI, P. J. **Física da soldagem: Introdução à Física do Arco Elétrico**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 51 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209 p.

OLIVEIRA, W. C. **estudo da viabilidade de uso do aço ferramenta AISI D6 para corte de placas de baterias chumbo-ácido**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2018. 135.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: Microestrutura e Propriedades**. Curitiba: Hemus, 2000. 343 p.

PARVARESH, B.; MIRESMAEILI, R.; YAZDIZADEH, M. Characterization of Wire Arc Additive Manufactured Products: A Comparison Between As-Deposited and Inter-layer Cold Worked Specimens. **Journal of manufacturing processes**, v. 57, p. 61-71, 2020.

PAZ, V. F. **Estudo e caracterização metalográfica da resistência ao desgaste em aços ferramenta sinterizados, temperados a vácuo, utilizados em matrizes de estampagem**. Dissertação de Mestrado: UFRGS. Porto Alegre, 2016.

PRECIADO, W. T.; BOHORQUEZ, C. E. N. Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels. **Journal of materials processing technology**, 2006. 244-250.

RAFIEAZAD, M. *et al.* On Microstructure and Mechanical Properties of a Low-Carbon Low-Alloy Steel Block Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. **Journal of materials engineering and performance**, 30, 2021. 4937-4945.

RANGESH, A.; O'NEIL, W. The foundations of a new approach to additive manufacturing: Characteristics of free space metal deposition. **Journal of materials processing technology**, 212, 2012. 203-210.

RAUT, L. P.; TAIWADE, R. V. Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions. **Journal of materials engineering and performance**, v. Springer, June 2021.

ROBERTS, G. A.; ROBERT, A. C.; KENNEDY, R. **Tool steels**. 5th. ed. [S.I.]: ASM, 1998. 820 p.

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L. S. Uma metodologia para parametrização do processo GMAW. **Soldagem & inspeção**, São Paulo, v. 17, p. 271-277, Jul/Set 2012.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**: melhor entendimento, melhor rendimento. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 288 p.

SILVA, F. L. D. S. **Desenvolvimento de estratégias para MA via soldagem a arco**. Florianópolis: UFSC, 2017.

SU, C. *et al.* Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM. **Applied surface science**, 486, 2019. 431-440.

SUAREZ, S. A.; SUAREZ, A. M.; PRECIADO, W. T. Arc Welding Procedures on Steels for Molds and Dies. **Procedia engineering**, v. 100, p. 584-591, 2015.

SUBODH, K.; SHASHU, A. S. Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 Stainless Steel Joints. **Materials and Design**, v. 32, n. 6, p. 3617-3623, June 2011.

TALKINGTON, J. E. **Variable polarity gas metal arc welding**. Ohio: Ohio State University, 1998. 226 p.

TEWARI, S. P.; GUPTA, A.; PRAKASH, J. Effect of Welding Parameters on the Weldability of Material. **International journal of engineering science and technology**, INDIA, v. 2, n. 4, p. 512-516, 2017.

THOMPSON, S. M. *et al.* An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. **Additive manufacturing**, Oct 2015. 36-62.

VILLARES. **ISOMAX VP50IM**. [S.I.]: Villares Metals, 2004.

WEMAN, K. **Welding processes handbook**. 2. ed. Stockholm: Woodhead Publishing, 2012. 270 p.

WU, W. *et al.* Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing. **Metals**, n. 9, 2019. 109.

XU, X. *et al.* Morphologies, microstructures, and mechanical properties of samples produced using laser metal deposition with 316 L stainless steel wire. **Optics and lasers in engineering**, 94, 2017. 1-11.

YANG, Y. *et al.* Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered. **Rapid prototyping journal**, v. 8, p. 30-372, 2002.

YOUSEFIEH, M.; SHAMANIAN, M.; SAATCHI, A. Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method. **Journal of alloys and compounds**, Isfahan, IRÃ, v. 509, p. 782-788, 2011.

ZHANG, W. *et al.* The Forming Profile Model for Cold Metal Transfer and Plasma Wire-Arc Deposition of Nickel-Based Alloy. **Journal of materials engineering and performance**, 2021. 4872–4881.

ZHANG, Y. *et al.* Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. **Journal of materials processing technology**, v. 135, p. 347-357, April 2003.