

Felipe Ribeiro Teixeira

**UM ESTUDO HOLÍSTICO DA PARAMETRIZAÇÃO
EFICAZ E EFICIENTE DA MANUFATURA ADITIVA
POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) DE PAREDES
FINAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

Felipe Ribeiro Teixeira

**UM ESTUDO HOLÍSTICO DA PARAMETRIZAÇÃO EFICAZ E
EFICIENTE DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A
ARCO (MADA) DE PAREDES FINAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

UBERLÂNDIA - MG

2023

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

T266
2023 Teixeira, Felipe Ribeiro, 1992-
UM ESTUDO HOLÍSTICO DA PARAMETRIZAÇÃO EFICAZ E
EFICIENTE DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
(MADA) DE PAREDES FINAS [recurso eletrônico] / Felipe
Ribeiro Teixeira. - 2023.

Orientador: Américo Scotti.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.103>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Scotti, Américo ,1955-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

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


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 355, PPGEM				
Data:	21/03/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	19:00
Matrícula do Discente:	11913EMC005				
Nome do Discente:	Felipe Ribeiro Teixeira				
Título do Trabalho:	Um Estudo Holístico da Parametrização Eficaz e Eficiente da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) de Paredes Finas				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se no Auditório Prof. Raimundo Lucier - Cidade Universitária Prof. José da Silveira Neto/UFPA a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Henara Lillian Costa Murray - FURG; Luiz Eduardo dos Santos Paes - FEMEC/UFU; Carlos Alberto Mendes da Mota - UFPA; Eduardo de Magalhães Braga - UFPA; Otavio Fernandes Lima da Rocha - IFPA; e Américo Scotti - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que a Prof. Henara Lillian Costa Murray e o Prof. Luiz Eduardo dos Santos Paes participaram da defesa por meio de videoconferência, desde a cidade de Rio Grande/RS e Uberlândia/MG, respectivamente. Os demais professores e o Discente participaram *in loco*.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Américo Scotti, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Américo Scotti, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/03/2023, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ALBERTO MENDES DA MOTA, Usuário Externo**, em 21/03/2023, às 18:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Otávio Fernandes Lima da Rocha, Usuário Externo**, em 21/03/2023, às 18:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo dos Santos Paes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/03/2023, às 18:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **HENARA LILLIAN COSTA MURRAY, Usuário Externo**, em 21/03/2023, às 18:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Magalhães Braga, Usuário Externo**, em 21/03/2023, às 19:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4351675** e o código CRC **965430F0**.

Dedico,

Aos meus pais.

A minha esposa, Luana, e minha filha, Julia.

A meu irmão, Murilo, e aos meus afilhados, Ítalo e Carlos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu refúgio e minha fortaleza em quem confio.

Ao professor Américo Scotti, pelas orientações, conselhos e incentivos ao longo dos anos de doutorado.

Aos professores Louriel Vilarinho, Ruham Reis e Valtair Ferraresi, pelo conhecimento repassado durante as disciplinas.

Aos professores Luiz Paes e Vladimir Ponomarev, pelo auxílio prestado durante o período de estágio em docência.

Aos engenheiros, técnicos e alunos do Laprosolda/UFU, pela ajuda e pelos momentos de descontração compartilhados.

Aos meus colegas de pós-graduação Fernando Scotti, Vinicius Lemes, Rafael Ferreira e Leandro da Silva, pelo apoio durante a realização de experimentos, discussões, aprendizado e, principalmente, pela amizade.

Aos membros da banca, que doaram tempo e experiência para aperfeiçoar esta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 157715/2019-1), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Código de Financiamento 001) e à PETROBRAS (Projeto SEI nº 23117.018175/2019-80), pelo suporte financeiro.

A minha família, por todo amor, carinho e compreensão diante da distância mantida durante a realização deste trabalho.

TEIXEIRA, F. R. **Um Estudo Holístico da Parametrização Eficaz e Eficiente da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) de Paredes Finas. 2023.** 155 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

Este trabalho visou avaliar como diferentes variáveis do processo GMA (Gas Metal Arc) se relacionam entre si e como estas podem afetar a funcionalidade de paredes finas de aço depositadas com Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Na primeira etapa da tese, avaliou-se a possibilidade de parametrizar paredes finas usando a abordagem envelope de trabalho, mas considerando um envelope pré-existente feito com um material diferente e comum (mais barato), visando tornar essa abordagem mais econômica e funcional. Em seguida, abordou-se o efeito combinado entre a temperatura intercamadas com a velocidade de deslocamento sobre aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas de mesma largura efetiva, depositadas usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo. Na última etapa da tese, foi proposta uma metodologia que possibilitou uma comparação sistemática de diferentes gases de proteção para que, na sequência, fosse avaliado o efeito de três diferentes misturas à base de argônio sobre aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas de aço inoxidável. O estudo dos aspectos operacionais envolveu, nas três etapas como um todo, a avaliação de sinais elétricos (corrente e tensão), velocidade de alimentação, perfis de temperatura, tempos de deposição, aspecto superficial e regularidade da transferência metálica. As características geométricas das paredes foram quantificadas a partir do software do escâner 3D empregado para digitalizar as paredes ou por meio de um código desenvolvido em linguagem Python. Microscopia óptica e ensaios de microdureza foram utilizados para promover o estudo dos aspectos metalúrgicos. Os resultados mostraram ser viável selecionar parâmetros para paredes finas (sem tecimento) depositadas por MADA com um número muito pequeno de experimentos quando utilizado um envelope de trabalho pré-existente para outro material. Ao avaliar o efeito combinado entre a temperatura intercamadas (TI) com a velocidade de deslocamento (VD), verificou-se que o aumento de TI com VD diminuiu a largura externa, ondulação lateral (melhor acabamento superficial), altura da camada e tempos de produção para a mesma largura efetiva, independentemente da abordagem de resfriamento considerada. Porém, para a mesma combinação de parâmetros, um menor tempo de produção é alcançado utilizando-se resfriamento ativo por quase imersão. A metodologia proposta para avaliar o efeito de diferentes gases de proteção possibilitou a confecção de paredes finas com o maior número possível de variáveis constantes e a maior regularidade de transferência metálica possível entre os diferentes gases. Com isso, a mudança dos gases de proteção pode ser

avaliada de uma forma consistente. Em resumo, alternativas que viabilizam uma parametrização robusta, eficiente e eficaz de paredes finas para usuários do processo foram propostas e confirmadas neste trabalho.

Palavras-Chave: Manufatura Aditiva; Soldagem a Arco; Operacionalidade; Características geométricas; Metalurgia; Pirometria; Controle; Temperatura Intercamadas; Aço ARBL; Aço Inoxidável Austenítico.

TEIXEIRA, F. R. **A Holistic Study of Effective and Efficient Parameterization in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Thin Walls**. 2023. 155 p. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

ABSTRACT

This work aimed at evaluating how different variables of the GMA (Gas Metal Arc) process relate to each other and how they can affect the functionality of thin steel walls deposited with Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). In the first stage of the thesis, the possibility of parameterizing thin walls for a feedstock is based on a pre-existing working envelope made with a different and ordinary (cheaper) material. Then, it was discussed the combined effect between interlayer temperature and travel speed on operational, geometrical and metallurgical features of thin walls with the same effective width, deposited using or not an active cooling approach. In the last stage of the thesis, a methodology was proposed to allow a systematic comparison of different shielding gases so that, then, the effect of three different argon-based blends on operational, geometric and metallurgical features of thin stainless-steel walls could be evaluated. The study of operational features involved, in the three stages of work, the evaluation of electrical signals (current and voltage), wire feed speed, temperature profiles, deposition times, surface aspect and metal transfer regularity. The geometrical features of the walls were quantified from the 3D scanner software used to digitize the walls or through a code developed in Python language. Optical microscopy and microhardness tests were used to assess the metallurgical features. The results showed that it is feasible to select parameters for thin walls deposited through WAAM with a lower number of experiments, using a pre-existing working envelope for another ordinary material. Evaluating the combined effect between interlayer temperature (IT) and travel speed (TS), it was verified that the increase of IT with TS decreased the external width, surface waviness (better surface finishing), layer height and deposition times for the same effective width, regardless of the cooling approach considered. However, for the same parameter combination, a shorter deposition time is achieved using near immersion active cooling. The proposed methodology to evaluate the effect of different shielding gases allowed the building of thin walls with a higher number of constant variables and metal transfer regularity between different blends. Thus, the change in shielding gases can be evaluated in a consistent way. In summary, alternatives were proposed and confirmed in this work to allow robust, efficient and effective parameterization of thin walls for process users.

Keywords: Additive Manufacturing; Arc Welding; Operability; Geometrical features; Metallurgy; Pyrometry; Control; Interlayer Temperature; HSLA steel; Austenitic Stainless Steel.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

AC – Altura da camada
AF - Ferrita acicular
ARBL - Alta Resistência Baixa Liga
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
AWS – American Welding Society
CA – Correção do comprimento de arco
CD - Correção dinâmica
CMT - Cold Metal Transfer
CNC - Controle Numérico Computadorizado
 Cr_{eq} - Cromo equivalente
D - Densidade do gás de proteção
DBCP - distância bico de contato peça
DED - Directed Energy Deposition
DLAP - Distância entre a lâmina d'água e o topo da peça
E - Energia do arco por unidade de comprimento
 E_m – Média da energia do arco por unidade de comprimento
 F_{cc} - Frequência de curto-circuito
FS(A) - Ferrita de segunda fase alinhada
GMA – Gas Metal Arc
GMAW – Gas Metal Arc Welding
GTA – Gas Tungsten Arc
GTAW – Gas Tungsten Arc Welding
H – Hipótese
 I_m - Corrente média
 I_{RMS} - Corrente RMS
 I_S - Corrente de soldagem
ISO - *International Organization for Standardization*
 IV_{cc} - Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito
L – Largura da parede
LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LC – Largura da camada
 L_{efe} - Largura efetiva
 L_{ext} - Largura externa
MA - Manufatura Aditiva

MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
NC - Número de camadas depositadas
Nieq - Níquel equivalente
OE – Objetivo específico
OL – Ondulação lateral
P – Potência
PBF - Powder Bed Fusion
PF - Ferrita poligonal
PF(G) - Ferrita de contorno de grão
PI - Potencial de ionização do gás de proteção
PO - Potencial de oxidação do gás de proteção
QC – Questão científica
RAQI – Resfriamento ativo por quase imersão
RMS - Root Mean Square
RN – Resfriamento natural
S - área da secção transversal do arame
 t_{aa} - Tempo de arco aberto
 t_{ad} - Tempo ativo de deposição
 t_{cc} - Tempo de curto-circuito
TD – Taxa de deposição
 T_D - Tempo de deposição de uma camada
 td_8 – Tempo de deposição e de espera após a deposição de oito camadas
 T_E - Tempo de espera entre as camadas para alcançar uma dada temperatura intercamadas
TF – Taxa de fusão do arame
TI – Temperatura intercamadas
 T_{TD} - Tempo total de deposição
U – Tensão
 U_m - Tensão média
 U_{RMS} – Tensão RMS
 U_S – Tensão de soldagem
VA - Velocidade de alimentação do arame
 VA_{alvo} - Velocidade de alimentação do arame alvo
 VA_{config} - Velocidade de alimentação do arame configurada na fonte de energia
 VA_m – Média da velocidade de alimentação do arame
VD - Velocidade de deslocamento da tocha

V_D - Velocidade de deslocamento do arame

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing

ΔE - Diferença de energia do arco por unidade de comprimento

ΔOL – Diferença de ondulação lateral

Δt_{ad} – Diferença de tempo ativo de deposição

$\propto t_{aa}$ – Desvio padrão do tempo em arco aberto

$\propto t_{cc}$ – Desvio padrão do tempo em curto-circuito

$\Delta T/\Delta L$ - Variabilidade da temperatura ao longo do comprimento da camada

λ_c – Comprimento amostral

η - Viscosidade dinâmica

ρ - Densidade do material

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Objetivo Geral	19
1.3 Apresentação da Tese	19
CAPÍTULO II - TRANSPORTABILIDADE DA ABORDAGEM DE ENVELOPE DE TRABALHO PARA A SELEÇÃO DE PARÂMETROS E OTIMIZAÇÃO DE PAREDES FINAS DEPOSITADAS COM MADA	21
2.1 Introdução, Questões Científicas e Objetivos específicos	21
2.2 Revisão Bibliográfica: Mapas operacionais e Envelopes de trabalho	22
2.3 Metodologia	26
2.3.1 Planejamento experimental para construção do envelope de trabalho de referência ..	29
2.3.2 Determinação do número de camadas de largura intermediária sobre o substrato para execução do planejamento experimental	32
2.3.3 Medição das características geométricas das paredes.....	35
2.3.4 Análise microestrutural e de microdureza	37
2.4 Resultados e discussões	37
2.4.1 Desenvolvimento do envelope de trabalho de referência	37
2.4.2 Validação do envelope de trabalho de referência	43
2.4.3 Explorando o potencial da abordagem de envelope de trabalho para a transportabilidade de parâmetros	50
2.4.4 Avaliação das diferenças físico-químicas entre os arames AWS ER70S-6 e AWS ER90S-B3	52
2.4.5 Aspectos metalúrgicos das paredes para análise de transportabilidade.....	56
2.4.6 O uso da abordagem de envelope de trabalho como ferramenta de seleção de parâmetros	60
2.5 Considerações finais	64
CAPÍTULO III - EFEITO COMBINADO DA TEMPERATURA INTERCAMADAS COM A VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO SOBRE CARACTERÍSTICAS DE PAREDES FINAS DEPOSITADAS POR MADA, USANDO DUAS ABORDAGENS DE RESFRIAMENTO.....	65
3.1 Introdução, Questões Científicas e Objetivos Específicos.....	65
3.2 Revisão Bibliográfica	67
3.2.1 Temperatura intercamada	67
3.2.2 Gerenciamento térmico em MADA	68
3.3 Metodologia.....	71

3.3.1 Estratégia de medição da temperatura intercamadas.....	74
3.3.2 Determinação das características geométricas das paredes.....	76
3.3.3 Caracterização metalúrgica	78
3.4 Resultados e Discussões	78
3.4.1 Testes preliminares	78
3.4.2 Testes principais.....	85
3.5 Considerações finais	95
CAPÍTULO IV - INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO EM MADA DE PAREDES FINAS SOBRE ASPECTOS OPERACIONAIS, GEOMÉTRICOS E METALÚRGICOS.....	97
4.1 Introdução, Questões Científicas/Tecnológicas e Objetivos específicos	97
4.2 Revisão Bibliográfica: Propriedades dos gases de proteção	99
4.3 Metodologia.....	106
4.3.1 Método de parametrização estabelecido para comparação sistemática de diferentes gases de proteção.....	109
4.3.2 Métodos utilizados para avaliar a regularidade da transferência metálica.....	110
4.3.3 Caracterização metalúrgica	112
4.4 Resultados e Discussões	114
4.4.1 Testes preliminares	114
4.4.2 Testes principais.....	117
4.5 Considerações finais	135
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	137
CAPÍTULO VI - TRABALHOS FUTUROS	142
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
APÊNDICE - Análise crítica dos ciclogramas de tensão x corrente.....	151

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

É imprescindível para qualquer empresa garantir a continuidade operacional de suas atividades. Para isso, torna-se vital a reposição de peças e componentes mecânicos em tempo hábil para cumprir prazos de serviços de montagem e manutenção, e, assim, minimizar a possibilidade de lucro cessante. No setor de petróleo e gás este desafio pode ser ainda maior, já que muitos dos equipamentos e peças utilizadas são de difícil aquisição e/ou de longo prazo para entrega.

Para acelerar a reposição de peças e permitir a continuidade operacional de suas unidades, a indústria busca alternativas capazes de diminuir significativamente o tempo de fabricação e entrega de seus componentes funcionais. Dentre os processos capazes de satisfazer a demanda para acelerar a reposição de peças e permitir a continuidade operacional de suas unidades, destacam-se os processos de manufatura aditiva (MA). De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (2015), a manufatura aditiva é um processo de união de materiais para construir objetos a partir de dados de um modelo 3D, normalmente, utilizando-se deposição de camada sobre camada, em oposição aos métodos de manufatura subtrativa.

Além de possuir potencialmente um menor tempo de produção (*lead-time*) em relação aos processos convencionais de fabricação (fundição, usinagem e forjamento), os processos de manufatura aditiva são capazes de construir geometrias extremamente complexas, que muitas das vezes são inviáveis pelas rotas de fabricação convencionais. Esta característica expande a liberdade de projeto e permite a construção de componentes funcionais com base na eficiência de suas funções e não nas limitações de fabricação. A redução de custos com estoque, já que se torna possível imprimir sob demanda e eliminar os gargalos da cadeia de suprimentos, e a redução do desperdício de material, em comparação com os processos de manufatura subtrativa, são consideradas outras vantagens agregadas aos processos de MA.

Em termos da deposição de componentes metálicos, duas categorias dos processos de MA ganharam reconhecimento industrial, os processos com Deposição por Energia Direcionada (Directed Energy Deposition - DED) e os processos com Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion – PBF). A Figura 1.1 exhibe uma classificação em termos da fonte de calor, do processo de deposição e da matéria-prima utilizada para as duas categorias mencionadas. É importante

entender que, apesar de ambas as categorias mencionadas serem voltadas para a construção de componentes metálicos, cada categoria dispõe de um nicho específico de aplicação, o qual é estabelecido em função das vantagens e limitações de cada um de seus processos.

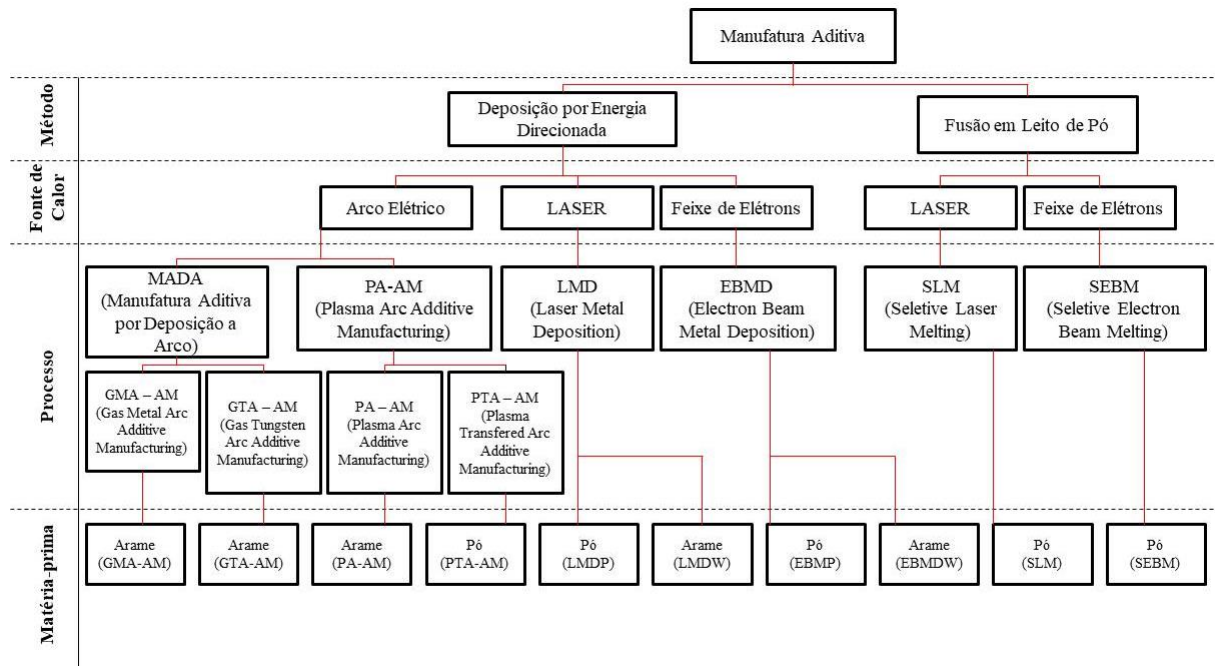


Figura 1.1 – Classificação dos principais métodos e processos utilizados em manufatura aditiva de metais (Adaptado de Américo Scotti, notas de aula)

Os processos com Fusão em Leito de Pó são utilizados em geral para a construção de peças pequenas, complexas e com alto valor agregado, pois, ainda que sejam capazes de fabricar geometrias complexas e com alta resolução, apresentam uma baixa taxa de deposição de material e um elevado custo para aquisição de equipamento e material. Os processos de Deposição por Energia Direcionada, por sua vez, são utilizados para a fabricação de componentes metálicos maiores, devido à sua maior taxa de deposição. Quando comparados aos processos PBF, os processos DED apresentam uma menor “resolução” e um menor custo de aquisição de equipamentos e insumos. Assim, para os seguimentos industriais cuja maioria dos componentes a serem fabricados são de médias ou grandes dimensões, os processos DED passam a ser considerados mais viáveis pelo menor tempo de construção, mesmo à custa de uma menor resolução.

Conforme observado na Figura 1.1, os processos DED apresentam três subcategorias em termos da fonte de calor, isto é, arco elétrico, LASER e feixe de elétrons. Dentre estes, os processos a arco elétrico têm se destacado por apresentarem equipamentos mais simples e convencionalmente usados em soldagem, o que garante uma maior familiaridade por parte de

empresas, operadores e organismos de certificação. Os processos a arco elétrico também despertam interesse por serem executados fora de uma câmara, em comparação aos processos com feixe de elétrons, e por apresentarem menores despesas relacionadas à aquisição, operação e manutenção de equipamentos.

Dentre os processos DED que utilizam arco elétrico como fonte de calor, encontram-se aqueles que realizam a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), como é caso dos processos GMAW (Gas Metal Arc Welding) e GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Nesta condição, estes são utilizados para realizar deposição seletiva de material, camada sobre camada, até que a peça seja totalmente construída, e não mais com o propósito de unir juntas (Soldagem). Desta forma, estes processos tiveram na Figura 1.1 os seus acrônimos modificados de GMAW para GMA (Gas Metal Arc) e de GTAW para GTA (Gas Tungsten Arc), permanecendo apenas os termos que caracterizam a física do arco.

O processo GTA apresenta um excelente controle da energia transferida para a peça devido à independência estabelecida entre a fonte de calor e o metal de adição. No entanto, além de apresentar uma menor taxa de deposição em relação ao processo GMA, o GTA ainda pode apresentar dificuldades operacionais, quando requeridas curvas muito fechadas ou quando existe a necessidade de uma inversão rápida de movimento para a execução de uma deposição bidirecional, por exemplo. Desta forma, o processo GMA, mais especificamente a variante Cold Metal Transfer (CMT), pode ser identificada como a mais utilizada dentre os processos MADA, em virtude de sua alta taxa de deposição, do baixo calor imposto e do baixo nível de respingos. Em complemento, Yehorov et al. (2019) afirma que o processo CMT se destaca por cumprir três importantes aspectos para MADA de paredes finas:

1. Minimizar a pressão do arco para evitar o colapso lateral da poça de fusão. Para um determinado material e espessura de parede, isso pode ser alcançado usando menores níveis de corrente, comprimento do arco, razão entre os tempos de arco aberto e de curto-circuito, e composição do gás que favoreça a emissão catódica concentrada na linha central do arco;
2. Garantir a formação de uma poça de fusão com volume adequado para uma determinada taxa de deposição e corrente (um volume de poça muito pequeno significa baixo calor transferido para a camada anterior, e uma poça muito grande tende a colapsar). Sempre existe uma faixa adequada de volumes da poça (para um determinado material, espessura da parede e energia do arco);
3. Possibilitar que o material abaixo de cada camada em deposição está o mais frio possível, para que a transferência de calor através da parede seja mais fácil. Quanto mais rápida for a transferência de calor da poça da camada em deposição,

menor e menos fluida (mais viscosa) se torna a poça, evitando o colapso da mesma para os lados.

Ainda tratando de trabalhos que apontem o diferencial do CMT frente a outros processos de curto-circuito controlado, vale destacar um estudo conduzido por Costa et al. (2012) envolvendo a soldagem de juntas em V com progressão ascendente. Quando consideradas a mesma velocidade de alimentação e quantidade de material depositada por unidade de comprimento, os autores identificaram valores de tensão muito menores com CMT em relação à transferência por curto-circuito convencional e outros dois processos derivativos (STT – *Surface Tension Transfer*, RMD – *Regulated Metal Deposition*). Esse resultado pode ser um indicativo de menor aporte térmico frente a estes processos e, assim, conferir um diferencial ao CMT.

Segundo Posh et al. (2017), os efeitos benéficos do processo CMT são alcançados por meio de um movimento mecânico periódico do arame-eletrodo que é realizado durante todo o processo para modular o destacamento das gotas de forma combinada a um controle totalmente digital, desempenhado por uma fonte inversora de soldagem. Para isso, um servo motor incorporado à tocha é utilizado para realizar a retração do arame e auxiliar no destacamento das gotas. Essencialmente, um ciclo CMT pode ser dividido em dois estágios, curto-circuito e arco aberto, conforme ilustrado pela Figura 1.2. De acordo com o ciclo CMT ilustrado, em princípio, o arame avança em direção à poça de fusão até que a fase de curto-circuito seja iniciada e o arco extinto. Durante esta fase, a corrente é mantida em um patamar mais baixo para garantir uma transferência suave da gota para a poça por força devido à tensão superficial, enquanto que a tensão de arco tende a zero, em função do curto-circuito estabelecido. Ainda durante a fase de curto-circuito, o servo motor inicia o movimento de retração do arame de forma a auxiliar no destacamento da gota por meio do afastamento físico entre a ponta do arame e a poça (ainda em baixa corrente, o que evita formação de respingos no instante do destacamento). Com o destacamento, o arco sofre um processo de reignição, dando origem à fase de arco aberto, e a corrente é aumentada ao mesmo tempo em que o arame continua com seu movimento de retração. Em um determinado instante, a corrente atinge um patamar máximo, o qual é mantido constante por certo tempo até que uma nova gota seja formada na ponta do arame, o qual inverte seu movimento e passa a se mover em direção à poça de fusão. Posteriormente, a corrente é reduzida e o arame continua a se mover em direção à poça de fusão, levando a uma redução gradativa do comprimento de arco e, conseqüentemente, da tensão. Finalmente, ocorre um novo curto-circuito, a tensão tende a zero e a corrente é reduzida para um patamar ligeiramente mais baixo. Nesse instante, o ciclo recomeça. Vale mencionar que, dependendo do

material e da linha sinérgica utilizada, o formato da onda de corrente imposta pelo CMT pode variar.

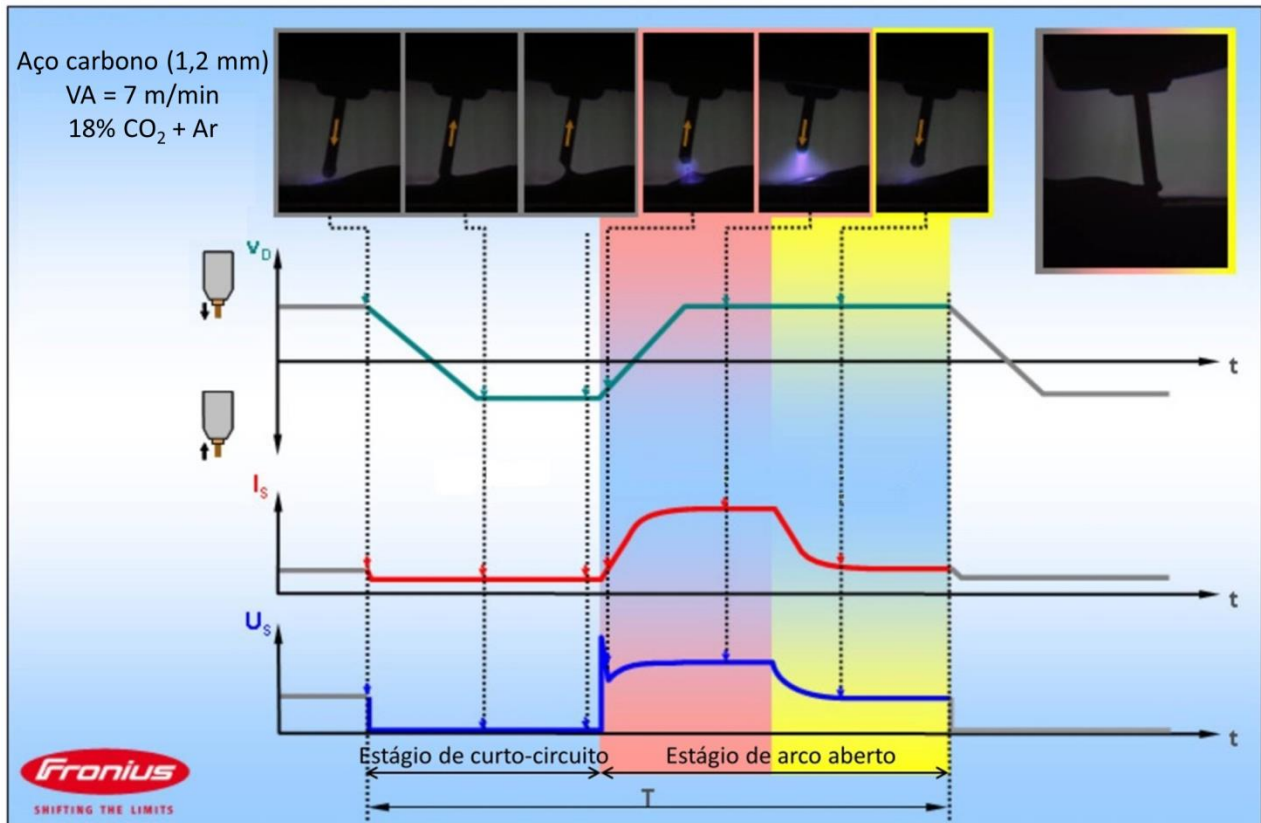


Figura 1.2 – Esquema dos sinais da velocidade de deslocamento do arame (V_D), da corrente (I_S) e da tensão (U_S) de soldagem para um ciclo do processo CMT (Adaptado de Posh et al. (2013), apud Trommer (2009))

Apesar das vantagens agregadas a MADA com a variante CMT, certas dificuldades precisam ser contornadas para garantir uma aplicação mais ampla desta tecnologia. Para demonstrar uma visão geral das limitações enfrentadas nos processos MADA, Wu et al. (2018) realizaram uma síntese de acordo com alguns materiais, conforme pode ser visto na Figura 1.3.

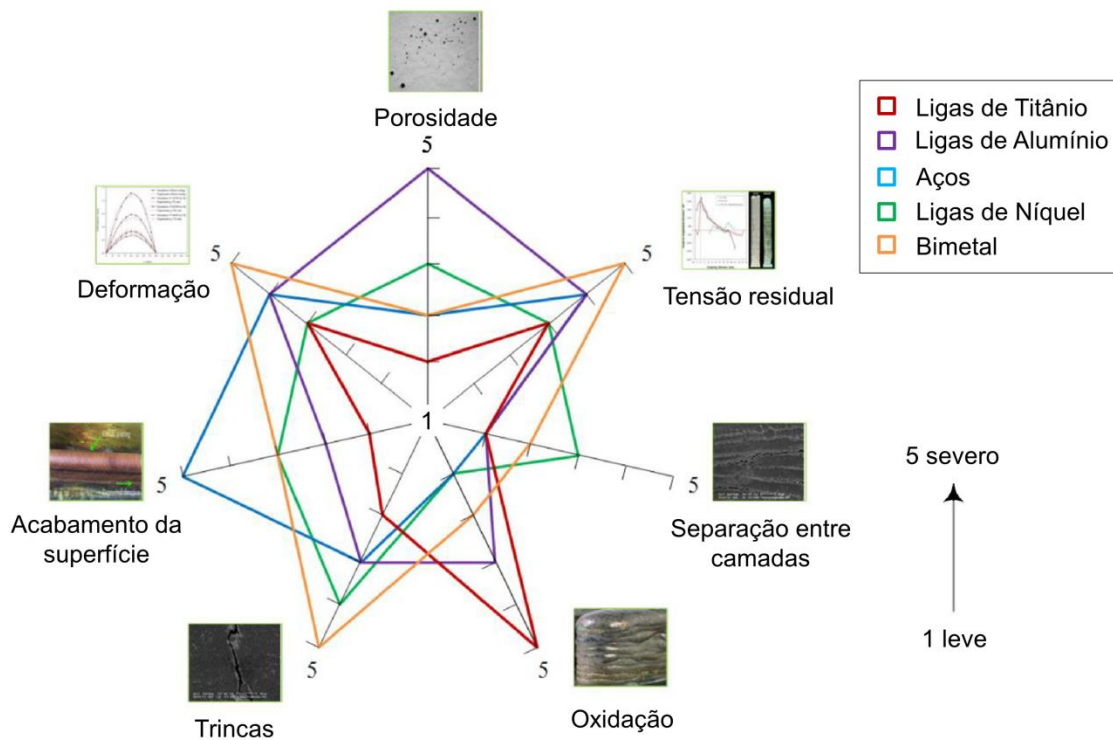


Figura 1.3 – Correlação entre materiais e não adequabilidades nos processos MADA (Adaptado de Wu et al., 2018)

Com base na Figura 1.3, quatro dificuldades são destacadas para utilização dos processos MADA considerando aços como matéria-prima, a saber, o acabamento da superfície, deformação, tensões residuais e trincas. Contudo, é importante entender que estas limitações variam de acordo com a composição química e as propriedades do material, bem como com a geometria e as condições de operação de cada componente (temperatura de operação, meio ambiente, solicitação mecânica). Evidentemente, a seleção e a utilização de parâmetros adequados também exercem um papel fundamental na formação ou não desses problemas. Por isso, tão importante quanto entender como cada parâmetro de deposição pode afetar diferentes variáveis de resposta (características operacionais, geométricas e metalúrgicas), é saber como estes se relacionam e afetam o desempenho de componentes fabricados por MADA. É neste contexto que a presente tese está inserida, visando garantir uma parametrização eficaz e eficiente de paredes finas para usuários do processo. Neste trabalho, uma parametrização eficaz é aquela que atinge os seus propósitos, ou seja, garante as características geométricas e propriedades mecânicas pretendidas, enquanto uma parametrização eficiente é a realizada com o menor desperdício de tempo, esforços e recursos. O conceito de parede fina, por sua vez, considera aquelas depositadas com um único cordão por camada sem utilização de tecimento.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar como diferentes variáveis do processo GMA se relacionam entre si e como estas podem afetar o desempenho de paredes finas de aços depositadas por MADA, bem como propor e avaliar alternativas para viabilizar uma parametrização robusta, eficiente e eficaz de paredes finas para usuários do processo.

Nota: Neste trabalho, entende-se o termo robusto no sentido técnico metrológico. Ou seja, no sentido de prover uma resposta consistente para uma dada entrada.

1.3 Apresentação da Tese

Este trabalho é formado por sete capítulos, incluindo este capítulo introdutório (Capítulo I). Três destes capítulos (II, III e IV) estão voltados para o desenvolvimento experimental da tese de fato. Estes apresentam propostas de estudos particulares, porém interconectados pelo objetivo geral da tese. Por isso, a estrutura deles é formada por seus próprios objetivos específicos, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões, e considerações finais. Nesta sistemática, o Capítulo II avalia a possibilidade de parametrizar paredes finas usando a abordagem envelope de trabalho, mas considerando um envelope pré-existente feito com um material diferente, comum e mais barato (aço C-Mn), visando tornar essa abordagem mais econômica e funcional para um aço ARBL (alta resistência baixa liga) do tipo 2,25Cr–1Mo (transportabilidade de parâmetros). O Capítulo III aborda o efeito combinado entre a temperatura intercadas com a velocidade de deslocamento sobre aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas depositadas usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo. O Capítulo IV avalia a utilização de três diferentes gases de proteção à base de argônio e seus efeitos sobre aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas de aço inoxidável. As conclusões gerais são apresentadas no Capítulo V, sendo divididas de acordo com os objetivos específicos apresentados nos Capítulos II, III e IV, mas de forma inter-relacionada com o objetivo geral do trabalho. O Capítulo VI, por sua vez, contempla as sugestões para trabalhos futuros, enquanto o Capítulo VII apresenta as referências bibliográficas.

Estendendo as informações sobre a apresentação da tese, ao longo do período de doutorado foram gerados os seguintes artigos científicos, tendo o candidato autor deste manuscrito atuante no desenvolvimento dos mesmos, portanto como coautor nas publicações. Esses artigos tiveram como base o desenvolvimento experimental da tese proposta. Porém, listam-se também pesquisas realizadas paralelamente, mas que ainda apresentam afinidade

com o tema.

Artigos publicados em periódicos com corpo editorial e indexados:

- 1) Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. Journal of Manufacturing Processes, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007> **(proporcionou experiência prática ao aluno para trabalhar com uma abordagem de resfriamento e com o processo de deposição usados ao longo da tese)**
- 2) Effect of the CMT advanced process combined with an active cooling technique on macro and microstructural aspects of aluminum WAAM. Rapid Prototyping Journal, 2021. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0285> **(proporcionou experiência prática ao aluno para trabalhar com uma abordagem de resfriamento e com o processo de deposição usados ao longo da tese)**
- 3) Work Envelope Expansion and Parametric Optimization in WAAM with Relative Density and Surface Aspect as Quality Constraints: The Case of Al5Mg Thin Walls with Active Cooling. Journal Of Manufacturing And Materials Processing, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020040> **(proporcionou experiência prática ao aluno para trabalhar com uma abordagem de resfriamento e com o processo de deposição usados ao longo da tese)**
- 4) Transferability of the working envelope approach for parameter selection and optimization in thin wall WAAM. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08326-2> **(artigo relacionado ao capítulo II da tese)**
- 5) Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality. Metals, 2022. <https://doi.org/10.3390/met12050765> **(artigo relacionado ao capítulo III da tese)**
- 6) Combined Effect of the Interlayer Temperature with Travel Speed on Features of Thin Wall WAAM Under Two Cooling Approaches. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11105-w> **(artigo relacionado ao capítulo III da tese)**

CAPÍTULO II

TRANSPORTABILIDADE DA ABORDAGEM DE ENVELOPE DE TRABALHO PARA A SELEÇÃO DE PARÂMETROS E OTIMIZAÇÃO DE PAREDES FINAS DEPOSITADAS COM MADA

2.1 Introdução, Questões Científicas e Objetivos específicos

A largura da camada é encarada como ponto de partida para o projeto e construção de uma peça por meio dos processos de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), já que o projetista precisa saber quais parâmetros de deposição são capazes de fornecer as larguras definidas para cada região da peça a ser construída. Por esse motivo, antes mesmo da deposição do componente final propriamente dito, uma etapa de parametrização é conduzida visando garantir não apenas as dimensões de projeto, mas também acabamento de superfície e propriedades mecânicas adequadas para o componente. Do lado dos usuários da técnica de fabricação, é desejável que esta etapa seja eficaz e eficiente, ou seja, esta precisa atingir o seu propósito que é o de garantir as características geométricas e propriedades mecânicas pretendidas (eficácia) e com o menor desperdício de tempo, esforço e recursos (eficiência). Lembrando, os usuários da técnica precisam satisfazer seus clientes com curtos prazos de entrega e atendimento de pedidos personalizados. Neste cenário, o aproveitamento de estratégias que elevam a eficiência da parametrização é crucial para o amadurecimento da MADA com o processo GMA em termos da aceitação industrial. Conforme abordado por Dahat et al. (2020) e Da Silva et al. (2021), a utilização de envelopes de trabalho pode ser apontada como uma solução potencial, já que, uma vez construídos, estes permitem a previsão de faixas de parâmetros capazes de atender aos requisitos para os aspectos mencionados. Este aspecto é coberto pelo objetivo geral da tese, principalmente quanto a propor e avaliar alternativas para viabilizar uma parametrização robusta, eficiente e eficaz de paredes finas para usuários do processo. Porém, esta abordagem ainda não é aplicada por todos e totalmente difundida. Diante do exposto, surge uma primeira questão científica (QC) com sua respectiva hipótese (H):

- QC 2.1 - Será que a utilização de envelopes de trabalho pode tornar a parametrização mais simples e também minimizar o desperdício de tempo e insumos?
- H 2.1 - Se a utilização de um envelope de trabalho previamente levantado para um material diferente e mais barato servir como base para a parametrização, o procedimento

pode ser mais eficiente em termos de um menor desperdício de tempo, esforço e recursos.

Além disso, uma vez que diferentes combinações de parâmetros de deposição podem ser utilizadas para atingir uma mesma largura de interesse, surge uma segunda questão científica e uma nova hipótese:

- QC 2.2 – Seria possível descobrir qual a combinação de parâmetros de deposição mais eficiente para atingir uma largura de interesse em termos do acabamento superficial, tempo ativo de deposição e da energia do arco (que governa a microestrutura e microdureza)?
- H 2.2 - Se os envelopes considerarem cada característica operacional de interesse como uma variável dependente dos parâmetros operacionais, será possível achar as melhores combinações de parâmetros para uma dada largura em termos de cada aspecto.

Considerando as questões científicas e hipóteses mencionadas, os seguintes objetivos específicos (OE) foram propostos:

- OE 2.1 - Verificar a possibilidade de parametrizar paredes finas depositadas por MADA, baseado em um envelope de trabalho pré-existente feito com um material diferente e comum (mais barato);
- OE 2.2 - Investigar se o envelope de trabalho pode ser usado como ferramenta de seleção de parâmetros para uma largura da parede alvo, em termos de características operacionais, tais como o acabamento da superfície, o tempo ativo de deposição, a energia do arco (que governa a microestrutura e a microdureza).

Lembrando, o conceito de parede fina adotado neste trabalho considera aquelas depositadas com um único cordão por camada sem utilização de tecimento (oscilação transversal da tocha).

2.2 Revisão Bibliográfica: Mapas operacionais e Envelopes de trabalho

O uso de mapas operacionais pode ser uma saída para facilitar a parametrização em MADA utilizando o processo GMA. Nessa abordagem, os parâmetros de processo correspondem às variáveis independentes, que normalmente são variadas sistematicamente, ou seguem algum tipo de planejamento experimental. As variáveis de interesse ou dependentes

(geometria, descontinuidades etc.) são avaliadas quantitativamente ou qualitativamente, de acordo com o objetivo da análise. A construção desses mapas permite ainda o desenvolvimento de equações de predição e superfícies de respostas.

Para o caso dos processos MADA, assim como acontece na manufatura aditiva em geral, existe o interesse de atingir uma determinada dimensão (por exemplo, a largura efetiva, que, em poucas palavras, é a menor distância encontrada entre as duas laterais da parede) na construção de uma peça. Deste modo, os mapas voltados para estes processos costumam considerar a largura da parede como variável dependente, enquanto os parâmetros de processo, principalmente, a velocidade de alimentação do arame (VA) (ou a corrente) e a velocidade de deslocamento da tocha (VD), aparecem como variáveis independentes. Para nível de exemplificação, a Figura 2.1(a) apresenta uma representação de um mapa operacional considerando as variáveis mencionadas. A partir desta figura é possível entender a diferença entre mapa operacional, que compreende um universo global dos parâmetros, e envelope de trabalho, que representa a região do mapa operacional em que os parâmetros são capazes de fornecer resultados aceitáveis com base em algum critério estabelecido. A Figura 2.1(b), por sua vez, é apresentada para exemplificar a seleção dos parâmetros. Conforme visualizado, diferentes combinações de VA e VD (pontos I, II e III) podem ser estabelecidas para atingir a mesma largura “L” de interesse. Hipoteticamente, a combinação de parâmetros para o ponto I pode ser aquela que resulta em melhor acabamento, a combinação do ponto II pode ser a mais robusta (já que é a mais distante das fronteiras do envelope) e a parametrização do ponto III aquela que oferece menor tempo de construção (já que maiores valores de VA e VD seriam utilizados nesse caso). Logo, a escolha de qual combinação utilizar vai depender da característica que se pretende dar prioridade.

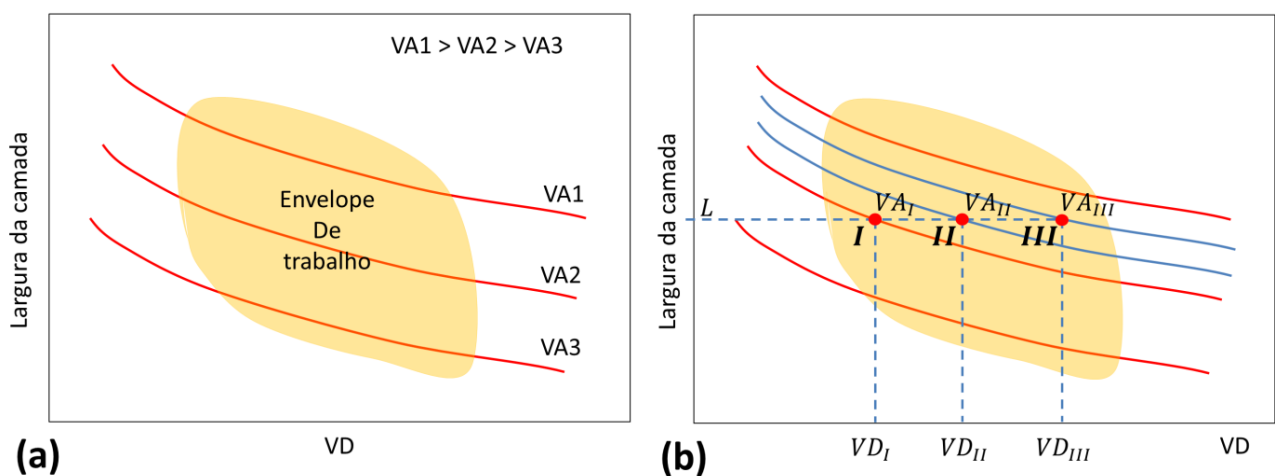


Figura 2.1 – (a) Representação de um mapa operacional; e (b) plano de seleção de parâmetros dentro de um envelope de trabalho

Antes de serem utilizados em manufatura aditiva, mapas operacionais e envelopes de trabalho foram usados com sucesso no passado para operações de soldagem e revestimento. Marinelli et al. (2019), por exemplo, levantaram um envelope de trabalho para a soldagem autógena com o processo GTAW, avaliando diferentes níveis de velocidade de soldagem e cinco misturas de gás de proteção com teores distintos de Argônio e Hélio. Soldas livres de trincas foram obtidas quando empregados altos teores de He no gás de proteção e baixos níveis de velocidade de soldagem. Em outro trabalho também voltado para a soldagem, Ahsan et al. (2016) investigaram a viabilidade do processo GMAW com a variante Cold Metal Transfer (CMT) em juntas sobrepostas sem abertura de raiz. Os autores identificaram dois envelopes de trabalho em termos da formação de porosidade e das propriedades mecânicas. O primeiro compreendia uma região que utilizava baixos níveis de calor imposto (200 a 250 J/mm), enquanto que o segundo estava posicionado em uma região com altos níveis de calor imposto (350 a 550 J/mm). Considerando a soldagem da superliga Inconel 718 com o processo GTAW, Dye et al. (2001) conduziram análises numéricas para prever combinações de parâmetros de processo (potência e velocidade de soldagem) capazes de evitar a formação de falta de penetração, porosidades, trincas de liquação e trincas de solidificação. Com base nos resultados, os autores desenvolveram um mapa de soldabilidade e identificaram uma região caracterizada como soldável (envelope de trabalho), compreendendo diferentes combinações de potência e velocidade de soldagem.

Quanto à manufatura aditiva, já existem alguns trabalhos que envolveram o levantamento de mapas operacionais, principalmente, para casos em que o LASER é usado como fonte de energia. Thomas et al. (2016) compilaram os dados encontrados na literatura para diferentes materiais depositados com fusão em leito de pó, visando evitar a formação de porosidades, vazios e trincas de solidificação. De forma similar, Dass & Moridi (2019) também compilaram dados encontrados na literatura para diferentes materiais, porém, para aplicações voltadas para a deposição por energia direcionada (DED) com LASER. Neste estudo, o mapa foi levantado considerando o calor imposto e a taxa de alimentação do pó como variáveis independentes, e três regiões com incidência de não conformidades foram identificadas (*keyholing*, falta de fusão e porosidade).

Como se pode perceber, os envelopes de trabalho descritos nos parágrafos acima não se enquadram totalmente na condição de uso proposta inicialmente. No contexto voltado para MADA, Dahat et al. (2020) propuseram uma metodologia passo a passo para a construção de envelopes de trabalho mais condizentes com o pressuposto. Como estudo de caso, Dahat et al. (2020) desenvolveram o envelope de trabalho usando um aço alta resistência baixa liga (ARBL) que foi depositado também pelo processo GMA com a variante CMT. Através de uma

comparação entre as variáveis dependentes previstas pelo mapa e as encontradas, os autores comprovaram uma alta repetitividade capaz de validar a metodologia de parametrização proposta. Seguindo a metodologia de Dahat et al. (2020), Da Silva et al. (2021) construíram um envelope de trabalho utilizando uma liga Al-5Mg como matéria-prima, depositada pelo processo GMA com a variante CMT. Os critérios de aceitação considerados para limitar o envelope foram o aspecto superficial, a ondulação de superfície ($< 0,5$ mm) e a formação de porosidades ($< 3,0$ %). De forma complementar, os autores realizaram um modelamento do envelope de trabalho que levou à obtenção de superfícies de resposta para a largura externa, largura efetiva e altura da camada, as quais ficaram em função da velocidade de alimentação do arame (VA) e da velocidade de deslocamento da tocha (VD). Este modelamento permitiu chegar a equações de predição das variáveis dependentes, tornando possível estimar os valores de largura e altura da camada que podem ser encontrados para uma dada combinação de VA e VD.

A Figura 2.2 exibe os envelopes de trabalho construídos por Dahat et al. (2020) para um aço ARBL e por Da Silva et al. (2021) para uma liga Al-5Mg. Como pode ser visto, mesmo usando materiais totalmente diferentes, os dois envelopes de trabalho apresentam essencialmente o mesmo formato, dando indícios que pode ser possível realizar a transportabilidade de parâmetros, ou seja, utilizar um envelope pré-existente para parametrizar condições com outro material. No entanto, conforme também visualizado, os envelopes de trabalho podem assumir diferentes posições dentro do mapa operacional, uma vez que seus contornos (posição e formatos) são alterados de acordo com o material e outras variáveis, como o processo de deposição, gás de proteção, diâmetro do arame, distância bico de contato peça (DBCP), temperaturas intercamadas, gerenciamento térmico (resfriamento forçado) e até mesmo os critérios de aceitação adotados para a construção dos envelopes.

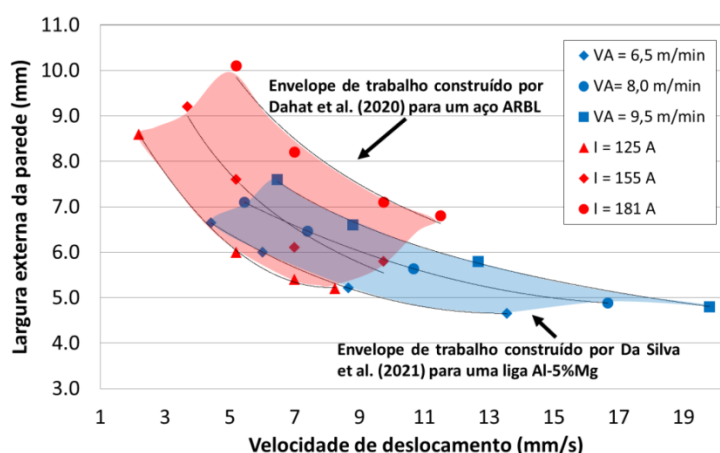


Figura 2.2 - Envelopes de trabalho levantados por Dahat et al. (2020) e Da Silva et al. (2021) para parametrização do processo de deposição em função de uma largura alvo (onde: VA = velocidade de alimentação e I = corrente média)

2.3 Metodologia

Para atingir o objetivo específico 2.1 (OE 2.1) deste capítulo, um envelope de trabalho (denominado daqui para frente de envelope de trabalho de referência) foi desenvolvido através da deposição de uma série de paredes finas. Neste estudo, a velocidade de alimentação do arame (VA) e a velocidade de deslocamento da tocha (VD) são admitidas como variáveis independentes, enquanto as características geométricas (larguras externa e efetiva, altura da camada e ondulação lateral) são consideradas como variáveis dependentes. Conforme será posteriormente discutido, as combinações adotadas de VA e VD foram definidas por meio de um planejamento experimental. Um material de baixo valor agregado (consumível de aço C-Mn) foi utilizado como metal de adição para o envelope de referência. Após o levantamento do envelope para cada uma das diferentes características geométricas avaliadas, uma etapa de validação foi realizada. Durante esta etapa, três combinações de VA e VD capazes de atingir uma mesma largura efetiva dentro do envelope de trabalho foram selecionadas. Após a confecção destas três paredes (paredes de validação), realizou-se uma comparação entre os valores das características geométricas estimadas (por meio do envelope de trabalho) e as medidas, visando avaliar a robustez do envelope obtido. Além disso, para verificar possíveis mudanças na microestrutura e na microdureza dentro do envelope de trabalho para uma mesma largura efetiva de interesse utilizando um aço C-Mn, três amostras transversais foram removidas das paredes de validação e submetidas às caracterizações microestrutural e mecânica (por meio do ensaio de microdureza).

Posteriormente, avaliou-se a transportabilidade da parametrização do envelope de referência usando um material de deposição diferente (aramé de aço alta resistência baixa liga, com pequena dissimilaridade na composição química). Para isso, outras três paredes foram depositadas com os mesmos equipamentos (mesa e fonte de soldagem) e as mesmas combinações de parâmetros adotadas para as paredes de validação, mas utilizando um aço da classe 2,25Cr-1Mo como metal de adição (paredes para análise de transportabilidade). De modo a avaliar a transportabilidade da parametrização, realizou-se uma comparação entre os resultados das características geométricas das paredes e os valores previstos a partir do envelope de referência (considerando os mesmos parâmetros de deposição). Desta forma, se existir uma concordância entre as características geométricas medidas e os valores previstos, o princípio da transportabilidade será satisfeito. Finalmente, visando investigar possíveis alterações microestruturais e mecânicas para uma mesma largura efetiva de interesse, mas agora utilizando um aço da classe 2,25Cr-1Mo, três amostras transversais também foram removidas das paredes para análise de transportabilidade e submetidas às análises microestrutural e de microdureza.

Todas as deposições foram realizadas por meio de uma mesa de coordenada CNC com uma fonte de soldagem acoplada. A Figura 2.3 apresenta um esquema da bancada de trabalho. As paredes foram depositadas sobre substratos de aço carbono medindo 150 x 50 x 7,9 mm ou 150 x 50 x 6,3 mm (a escolha de qual espessura utilizada será discutida posteriormente). Cada substrato foi fixado em um suporte e posicionado com a face lateral para cima, simulando uma pré-parede. A altura total das paredes foi fixada em 40 mm, excluindo o substrato. Um pirômetro infravermelho foi utilizado para monitorar a temperatura intercamadas de modo a mantê-la próxima da temperatura ambiente (30 °C) durante todas as deposições. Essas medições de temperatura sempre foram tomadas após a deposição de cada camada, considerando uma posição central em relação ao comprimento da parede e sobre a superfície superior da última camada depositada. A versão Cold Metal Transfer (CMT) do processo GMA foi utilizada como fonte de potência (linha sinérgica CMT 963). Um arame de aço C-Mn (AWS ER70S-6) de 1,2 mm de diâmetro foi empregado como matéria-prima para o levantamento do envelope de trabalho de referência e durante a etapa de validação. Um segundo arame de aço também de 1,2 mm de diâmetro, mas do tipo 2,25Cr-1Mo (AWS ER90S-B3), foi usado como matéria-prima para avaliar a transportabilidade da parametrização a partir do envelope de trabalho de referência. A mesma mistura gasosa (96% Ar + 4% CO₂), a uma vazão de 15 L/min foi utilizada como gás de proteção para ambos materiais de deposição. A Tabela 2.1 apresenta as composições químicas nominais dos arames utilizados. A distância bico de contato-peça (DBCP) de 16 mm e o ângulo de ataque da tocha de 90° (tocha perpendicular) foram mantidos constantes.

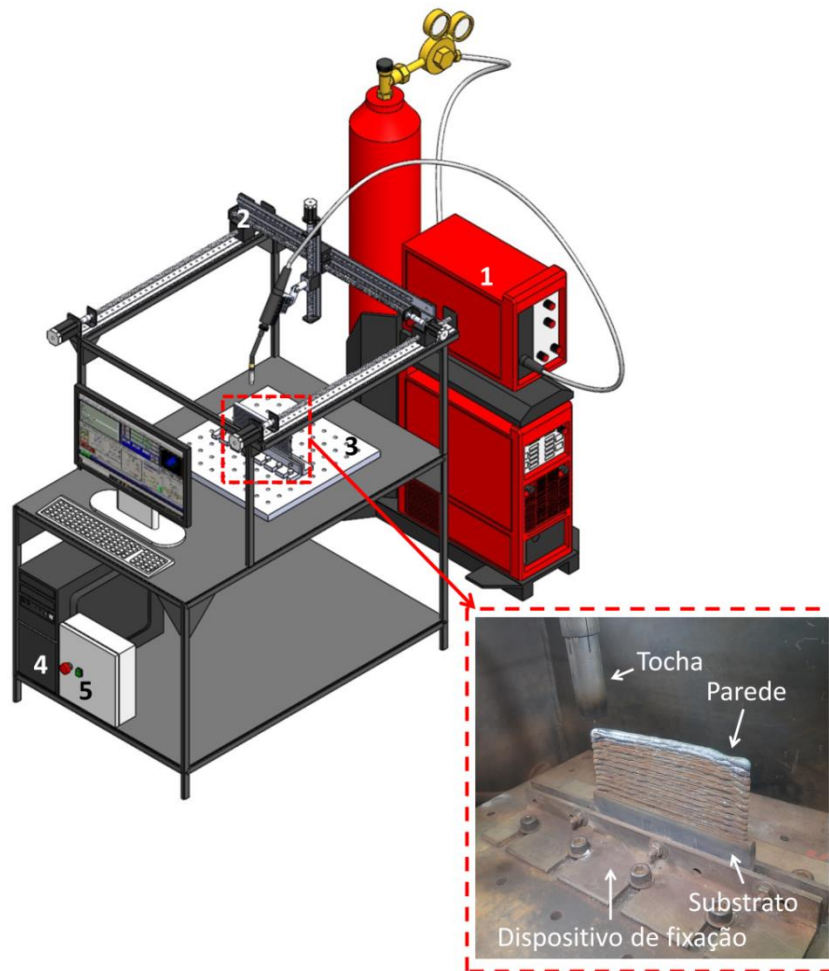


Figura 2.3 - Esquema da bancada de trabalho: (1) fonte de soldagem e cabeçote de alimentação de arame; (2) mesa de coordenada CNC (sistema de movimentação da tocha); (3) plataforma de construção; (4) processador CNC; (5) fontes de alimentação e drivers dos motores de passo

Tabela 2.1 – Composições químicas (% em peso) nominais dos arames empregados neste trabalho

Arame	C	Mn	Si	Cr	Mo	Fe
AWS ER70S-6	0,078	1,46	0,85	-	-	Bal.
AWS ER90S-B3	0,08	0,95	0,60	2,60	1,00	Bal.

Um conversor A/D (14 bits) foi utilizado para adquirir os sinais elétricos (tensão e corrente) e de velocidade de alimentação a uma taxa de 5 kHz durante 8 s em todas as deposições. Os valores médios e RMS (root mean square) de corrente e tensão foram calculados para cada uma das paredes construídas. A média da energia do arco por unidade de comprimento também foi calculada. Para isso, a potência instantânea média (média do produto ponto a ponto da corrente e da tensão) foi dividida pela VD adotada em cada condição. Como já verificado na literatura (Ali et al., 2019; Scotti et al., 2020), o controle do processo CMT e de suas

variantes estabelece uma diferença entre a velocidade de alimentação regulada na fonte de energia e a real. Deste modo, toda a discussão deste trabalho foi pautada nos valores médios de VA, os quais foram medidos por um encoder calibrado (resolução de 0,1 m/min). Para encontrar os valores de VA que deveriam ser regulados para atingir os valores reais de interesse, um procedimento de calibração foi previamente conduzido antes da deposição de cada parede. Neste procedimento, algumas simples deposições foram realizadas e o valor de VA regulado foi variado até que os valores reais de interesse fossem registrados pelo encoder.

2.3.1 Planejamento experimental para construção do envelope de trabalho de referência

Apesar de existir uma relação direta entre velocidade de alimentação de arame (VA) e a corrente média (I_m) em GMA, optou-se por construir o mapa em função da VA, ao invés de I_m (parâmetro mais comumente utilizado). Por ser regulada diretamente na interface da fonte de energia, a VA é um parâmetro mais acessível ao operador do que a própria I_m , que acaba sendo uma consequência da VA configurada (principalmente) e do conjunto das demais variáveis. Para determinar as faixas trabalháveis de VA, considerou-se uma observação de Yehorov et al. (2020), isto é, a de que a pressão do arco precisa ser minimizada para evitar o colapso da poça de fusão durante a deposição de paredes finas na manufatura aditiva. Assim, sempre que possível, deve-se optar por menores níveis de corrente, mas capazes de garantir uma adequada coalescência entre camadas. Desta forma, simples deposições sobre chapa foram realizadas e três níveis de VA foram definidos para que os consequentes níveis de I_m , em princípio, não ultrapassassem 200 A. Os três níveis de VA selecionados inicialmente foram 3,0, 4,5 e 6,0 m/min, os quais resultaram em I_m de aproximadamente 120, 160 e 200 A, respectivamente.

Uma vez definidos os níveis de VA, faixas operacionais de velocidade de deslocamento da tocha (VD) foram determinadas. Para isso, três paredes foram construídas, sendo uma para cada nível de VA selecionado. Dois critérios de aceitação foram utilizados para avaliar o aspecto superficial das paredes: o escorrimento de material pela lateral e a formação de costa de dragão (humps), que corresponde a um defeito na forma de ondulações geométricas periódicas que tendem a ser formadas ao longo de uma camada depositada, principalmente, quando altas velocidades de deslocamento são utilizadas. Desta forma, a primeira camada depositada para cada parede sempre utilizava de uma VD inicial de 10 cm/min, sendo progressivamente aumentada a cada nova camada com incrementos de 5 cm/min. O limite inferior de VD para uma dada VA foi definido com base no escorrimento de material pelas laterais da parede, enquanto o limite superior foi estabelecido com base na mais alta VD alcançada sem a formação de costa de dragão. Para usar uma faixa de parâmetros mais conservadora e minimizar a presença de irregularidades geométricas nas paredes, o limite inferior de VD foi acrescido em 5 cm/min e o

limite superior de VD foi reduzido em 5 cm/min (valores arbitrariamente definidos). A Tabela 2.2 apresenta as faixas operacionais de VD encontradas para cada nível de VA selecionado inicialmente. Com base na Tabela 2.2, chegou-se a primeira matriz de planejamento experimental (Tabela 2.3), a qual conta com quatro níveis diferentes de VD (igualmente distribuídos dentro de cada faixa trabalhável) para cada um dos três níveis de VA considerados.

Tabela 2.2 – Faixas operacionais de velocidade de deslocamento da tocha (VD), determinadas para cada nível de velocidade de alimentação de arame (VA) selecionado

VA (m/min)	Limite inferior de VD (cm/min)	Limite superior de VD (cm/min)
3,0	15,0	50,0
4,5	20,0	70,0
6,0	25,0	80,0

Tabela 2.3 – Primeira matriz de planejamento experimental (onde: VA = velocidade de alimentação e VD = velocidade de deslocamento)

Condição	VA (m/min)	VD (cm/min)
1	3,0	15,0
2	3,0	26,7
3	3,0	38,3
4	3,0	50,0
5	4,5	20,0
6	4,5	36,7
7	4,5	53,3
8	4,5	70,0
9	6,0	25,0
10	6,0	43,3
11	6,0	61,7
12	6,0	80,0

A realização dos experimentos da Tabela 2.3 partiu da condição potencialmente mais crítica (Condição 9), isto é, alta VA e baixa VD. Apesar do planejamento experimental preliminar considerado, esta parede (ilustrada na Figura 2.4(a)) apresentou uma geometria bastante irregular (com escorrimento de material em alguns pontos), aspecto que tendia a piorar com o aumento da altura de construção da parede, indicando que a definição da qualidade superficial a partir de uma única camada para uma dada combinação de parâmetros pode não ser representativa. Logo, o ideal seria reavaliar os resultados em uma parede inteira. Como uma mesma temperatura intercamadas (de 30 °C) foi mantida, este comportamento não seria resultante de acúmulo de calor típico de camadas subsequentes, levando-se à hipótese de que não havia sido utilizada uma combinação adequada entre o volume da poça de fusão, energia imposta e a pressão de arco exercida. Desta forma, a velocidade máxima de VA foi reduzida de

6,0 para 5,0 m/min, correspondendo também a menores valores de I_m (valores posteriormente mostrados na Tabela 2.6). Esta estratégia implicou não apenas em uma redução do volume da poça (menor energia), mas também da pressão exercida pelo arco, contribuindo, em ambos os casos, para uma maior estabilidade da poça e uma maior regularidade da parede. Um novo limite inferior de VD (21,7 cm/min) foi calculado por interpolação linear para atender a VA de 5,0 m/min. Apesar da redução em VD (que aumenta o volume da poça), a relação VA/VD ainda foi menor, garantindo um menor volume para a poça de fusão. Como a nova parede (VA de 5,0 m/min e VD de 21,7 cm/min) apresentou uma melhora de aspecto superficial (ilustrado na Figura 2.4(b)) em relação à condição prévia de VA de 6,0 m/min e VD de 25,0 cm/min, os valores de VA previamente selecionados para o planejamento experimental foram redefinidos (de 4,5 para 4,0 m/min e de 6,0 m/min para 5,0 m/min). Desta forma, novas faixas trabalháveis de VD foram calculadas usando interpolações a partir das faixas operacionais selecionadas inicialmente para as VA de 3,0, 4,5 e 6,0 m/min. A Tabela 2.4 apresenta a matriz final de planejamento experimental utilizada para desenvolver o envelope de trabalho para o arame AWS ER70S-6.

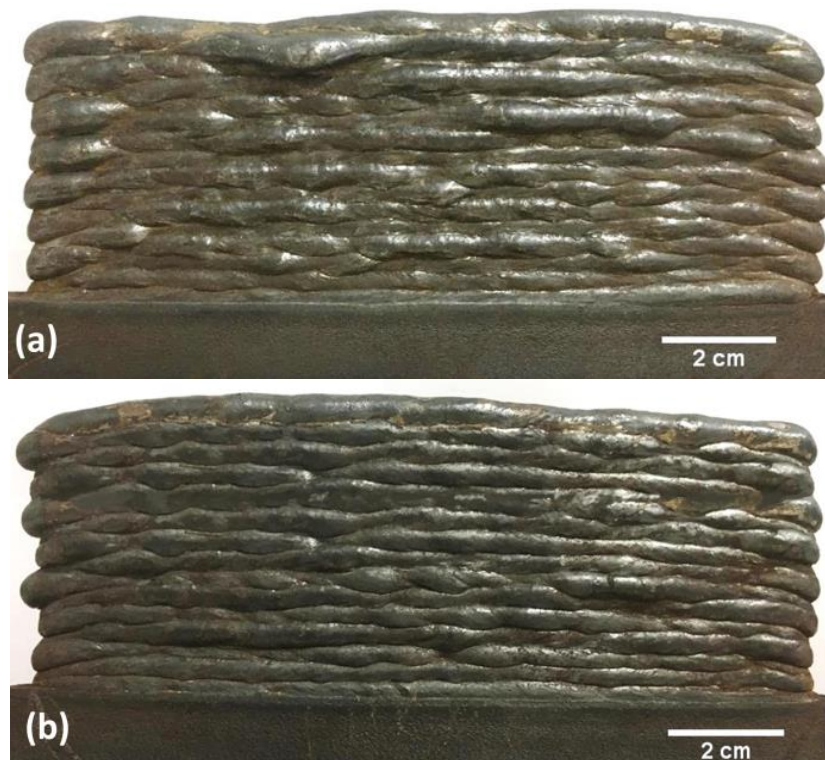


Figura 2.4 - Aspecto superficial para (a) a condição de VA = 6,0 m/min e VD = 25,0 cm/min (I_m de 200 A, aproximadamente); e (b) para a condição de VA = 5,0 m/min e VD = 21,7 cm/min (I_m de 177 A, aproximadamente)

Tabela 2.4 – Matriz final de planejamento experimental utilizada para desenvolver o envelope de trabalho de referência (onde: VA_{alvo} = velocidade de alimentação alvo e VD = velocidade de deslocamento)

Condição	VA_{alvo} (m/min)	VD (cm/min)
1	3,0	15,0
2	3,0	26,7
3	3,0	38,3
4	3,0	50,0
5	4,0	18,3
6	4,0	33,3
7	4,0	48,3
8	4,0	63,3
9	5,0	21,7
10	5,0	38,9
11	5,0	56,1
12	5,0	73,3

Vale ressaltar que por mais que se tenha optado por trabalhar com menores níveis de VA para contornar as irregularidades geométricas observadas, maiores níveis de VA podem ser virtualmente empregados desde que sejam combinados a valores mais elevados de VD. Assim, caso a VA de 6,0 m/min fosse mantida, a VD deveria ser aumentada até que a poça de fusão tivesse um volume capaz de suportar a pressão exercida pelo arco. Dirisu et al. (2020), por exemplo, foram capazes de construir paredes com uma VA de 6,5 m/min e VD de 40,0 cm/min, também usando a variante CMT e o arame AWS ER70S-6. Ressalta-se também que para uma VA mais elevada, a faixa trabalhável de VD poderia ficar mais curta, diminuindo o tamanho do envelope de trabalho.

2.3.2 Determinação do número de camadas de largura intermediária sobre o substrato para execução do planejamento experimental

Na tentativa de manter o fluxo de calor mais uniforme ao longo das camadas depositadas, a diferença entre a espessura do substrato e a largura da parede deve ser a menor possível. Por isso, ao invés de empregar substratos de diferentes espessuras, utilizou-se da mesma estratégia adotada por Dahat et al. (2020), no sentido de construir algumas camadas de largura intermediária entre o substrato e as paredes (Figura 2.5). Partindo-se das duas espessuras nominais (5/16", que equivale a 7,9 mm, e 1/4", que equivale a 6,3 mm) de chapas comerciais disponíveis para serem utilizadas como substrato, a escolha de qual espessura utilizar para cada combinação VA e VD ficou em função da menor diferença obtida entre as espessuras dos substratos disponíveis e a largura prevista para a parede, que será detalhada na

sequência. Os seguintes critérios foram considerados para depositar as camadas de largura intermediária:

- Uma diferença de espessura de até 1 mm entre o substrato e as larguras previstas para as paredes poderia ser capaz de manter o fluxo de calor constante;
- Quando a diferença entre a largura do substrato e a largura prevista era menor do que 1 mm, não foram depositadas camadas de largura intermediária;
- Quando esta diferença estava entre 1 mm e 2 mm, uma camada de largura intermediária foi depositada;
- Quando esta diferença estava entre 2 mm e 3 mm, duas camadas de largura intermediária foram depositadas.

Uma aproximação teórica considerada por Dahat et al. (2020) e por Da Silva et al. (2021) foi usada para prever as larguras das paredes em função dos parâmetros de deposição. Na abordagem em questão, a geometria de uma camada depositada é encarada como um semicírculo, cujo diâmetro e raio são assumidos como a largura (LC) e a altura da camada (AC), respectivamente (Figura 2.5). Por meio de algumas correlações estabelecidas entre a área do semicírculo e alguns parâmetros de deposição, a largura da camada (LC) pode ser estimada, em milímetros, usando a Equação 2.1, que é função da taxa de deposição (TD) em g/s, da velocidade de deslocamento da tocha (VD) em mm/s e da densidade do material (ρ) em g/mm^3 , que nesse caso foi considerada constante em todo o material e assumida como $0,00786 \text{ g/mm}^3$. De forma complementar, esta aproximação teórica também foi utilizada para prever a AC, que, por ser assumida como o raio do semicírculo, é dada pela metade de LC (Equação 2.2).

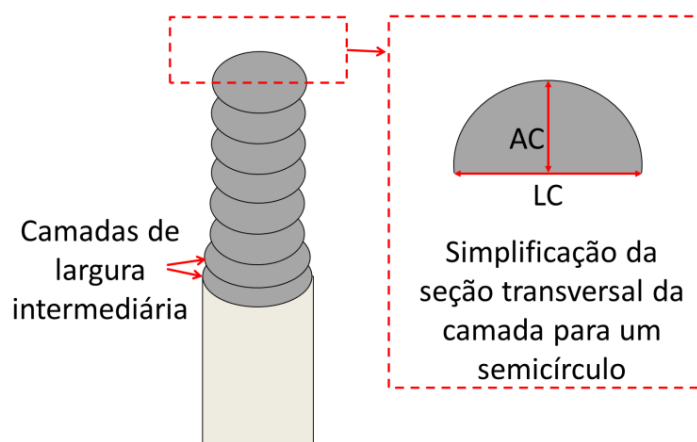


Figura 2.5 – Representação da geometria da camada considerada como um semicírculo e da posição das camadas de largura intermediária, sendo variável o número de camadas de largura intermediária (Adaptado de Da Silva et al., 2021)

$$LC = \sqrt{\frac{8 \times TD}{\pi \times VD \times \rho}} \quad (2.1)$$

$$AC = \left(\sqrt{\frac{8 \times TD}{\pi \times VD \times \rho}} \right) \times \frac{1}{2} \quad (2.2)$$

Para estimar TD, três paredes foram confeccionadas com um total de três camadas, sendo uma parede para cada nível de VA adotado. Uma relação VA/VD (igual a 12) foi arbitrariamente escolhida e mantida para as três paredes. Como estas deposições ocorreram antes da realização do primeiro planejamento experimental, as velocidades de alimentação de 3,0, 4,5 e 6,0 m/min foram combinadas às velocidades de deslocamento da tocha de 25,0, 37,5 e 50,0 cm/min, respectivamente. Os substratos de aço carbono (150 x 50 x 7,9 mm) foram pesados antes e depois das deposições, e os tempos de deposição de cada parede foram calculados (distância percorrida dividida pela VD). Assim, taxas de deposição iguais a 1,52, 2,17 e 2,97 kg/h foram obtidas para as velocidades de alimentação de arame de 3,0, 4,5 e 6,0 m/min, respectivamente. Por meio de interpolação, uma TD de 1,95 kg/h foi determinada para a VA de 4,0 m/min e uma TD de 2,44 kg/h foi determinada para a VA de 5,0 m/min. A Tabela 2.5 indica as larguras e alturas de camadas previstas (Equações 2.1 e 2.2), as espessuras escolhidas para os substratos e o número de camadas de largura intermediária construídas para cada condição. A escolha das combinações de parâmetros para depositar as camadas de largura intermediária também foi baseada no uso da Equação 2.1.

Tabela 2.5 – Larguras e alturas de camadas previstas, espessura de substrato escolhida e número de camadas intermediárias construídas para cada condição do planejamento experimental da Tabela 2.4

Condição	Largura da camada prevista (mm)	Altura da camada prevista (mm)	Espessura do substrato (mm)	Número de camadas intermediárias
1	7,4	3,7	7,9	0
2	5,5	2,8	6,3	0
3	4,6	2,3	6,3	1
4	4,1	2,0	6,3	2
5	7,6	3,8	7,9	0
6	5,6	2,8	6,3	0
7	4,7	2,3	6,3	1
8	4,1	2,0	6,3	2
9	7,8	3,9	7,9	0
10	5,8	2,9	6,3	0
11	4,8	2,4	6,3	1
12	4,2	2,1	6,3	2

2.3.3 Medição das características geométricas das paredes

Todas as paredes erguidas por MADA foram digitalizadas por um dispositivo de escaneamento 3D (HandySCAN 3D). O software do próprio escâner foi utilizado para quantificar três características geométricas das paredes: a largura externa (L_{ext}), que corresponde à maior distância encontrada entre as duas laterais das paredes; a largura efetiva (L_{efe}), que é menor distância encontrada entre as duas laterais da parede; e a ondulação lateral (OL), calculada por meio da subtração entre largura externa e a largura efetiva dividida por dois. Para obter uma maior amostragem, optou-se por uma medição ponto a ponto da distância entre em duas superfícies (malhas) opostas, de modo que fossem medidas as distâncias entre um determinado ponto posicionado na malha da lateral esquerda e outro ponto oposto posicionado na malha da lateral direita da parede. A Figura 2.6 ilustra um esquema do procedimento de medição adotado para quantificar as características geométricas das paredes por este método. As extremidades das paredes foram desconsideradas durante a medição para descartar as regiões mais instáveis (Figura 2.6(a)). Assim, apenas o “núcleo” da parede (28 x 90 mm) teve suas geometrias medidas. Com base na análise dos oscilogramas de VA, verificaram-se algumas regiões e/ou camadas em que a VA medida foi significativamente alterada, provavelmente devido ao controle exercido pelo equipamento CMT para compensar o comprimento do arco em decorrência de alguma irregularidade geométrica formada ao longo da deposição de uma camada. Para evitar a influência dessas regiões na medição das geometrias, as superfícies laterais das paredes foram divididas em três fatias medindo 28 x 30 mm (Figura 2.6(b)) e alguns *outliers* (valores atípicos) resultantes dessas variações de VA foram desconsiderados. Na Figura 2.6(c), por exemplo, a largura externa de 9,5 mm foi desconsiderada, pois corresponde a uma região em que a VA variou subitamente. Assim, tomou-se a maior largura externa registrada fora dessa região (8,6 mm). Com base na metodologia utilizada, três valores de largura externa, largura efetiva e ondulação lateral foram obtidos por parede, sendo um para cada fatia considerada. A altura das camadas (AC) foi quantificada com auxílio de um paquímetro analógico (resolução de 0,05 mm). Nesse caso, cinco medidas de alturas totais (que corresponde à altura da parede inteira) foram tomadas em cinco regiões diferentes e divididas pelo número de camadas. Para nível de ilustração, a Figura 2.7 apresenta um esquema de cada uma das características geométricas avaliadas considerando uma seção transversal.

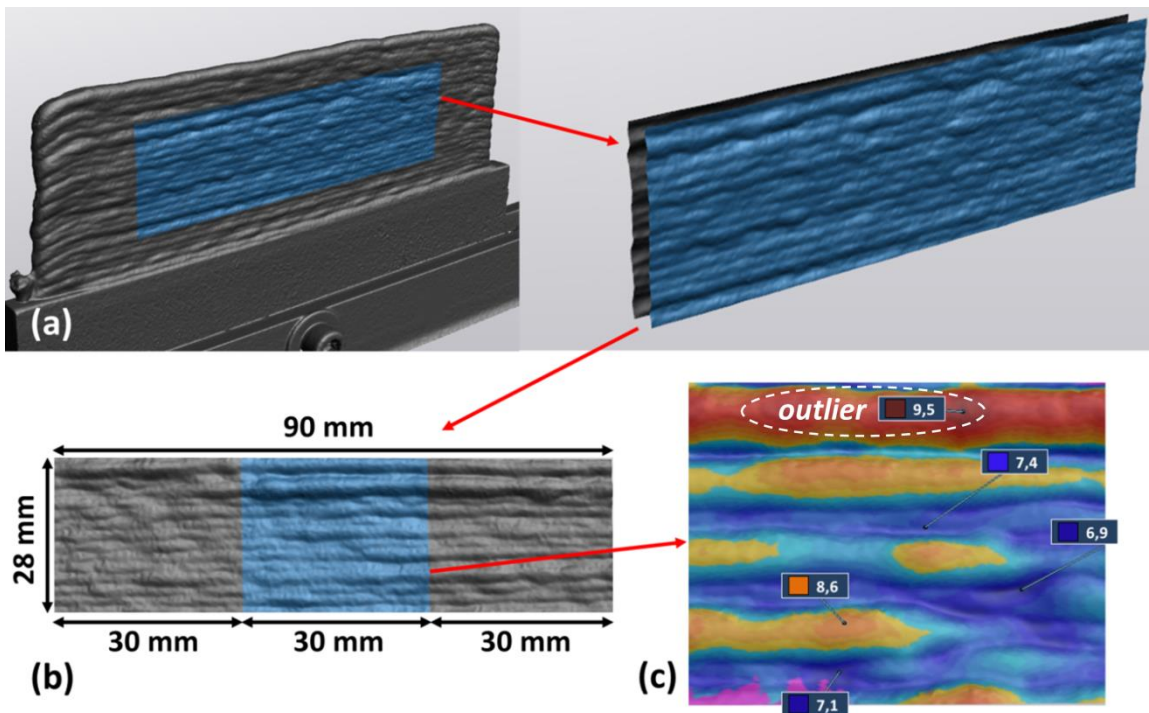


Figura 2.6 - Esquema do procedimento de medição adotado para quantificar as características geométricas das paredes: (a) região considerada durante a medição das geometrias; (b) fatias das paredes consideradas durante a medição das geometrias; (c) exemplo de uma região que apresenta um *outliers*

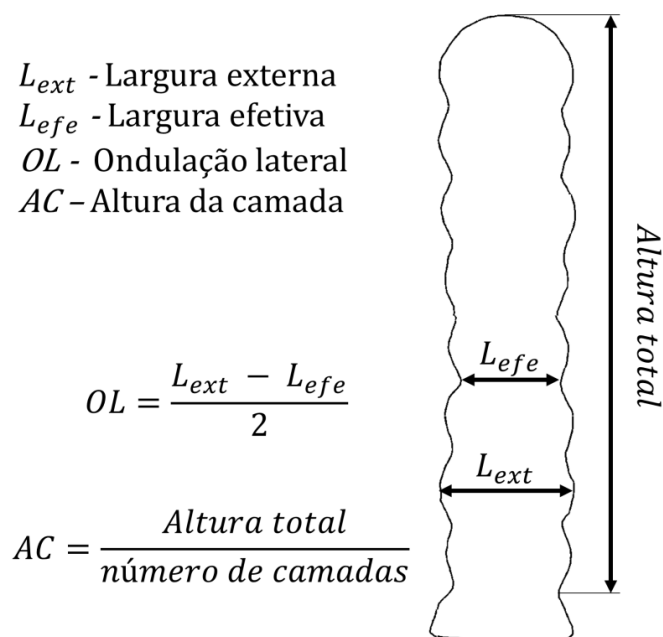


Figura 2.7 - Esquema das características geométricas avaliadas, considerando uma seção transversal (onde: L_{ext} e a L_{efe} são considerados os valores máximos e mínimos, respectivamente, das larguras encontradas ao longo do comprimento avaliado)

2.3.4 Análise microestrutural e de microdureza

De forma complementar, para verificar possíveis mudanças na microestrutura e na microdureza dentro do envelope de trabalho para uma mesma largura efetiva de interesse, seções transversais foram removidas de cada uma das paredes de validação e das paredes para análise de transportabilidade, totalizando seis amostras. Estas foram submetidas a preparação metalográfica (lixamento e polimento) e atacadas por imersão em uma solução de Nital 5% (ácido nítrico + etanol) durante 20 s. Para avaliar ao mesmo tempo possíveis efeitos sobre as propriedades mecânicas, perfis de microdureza foram conduzidos em três regiões distintas (topo, centro e base) de cada secção transversal, descartando aproximadamente 10 mm a partir do substrato para evitar uma região que poderia ser afetada pela diluição. Uma carga de 100 gf, um tempo de carregamento de 15 s e uma distância de 0,25 mm entre indentações foram utilizados nos ensaios, satisfazendo as recomendações da norma ASTM E384 (2022).

2.4 Resultados e discussões

2.4.1 Desenvolvimento do envelope de trabalho de referência

A Figura 2.8 apresenta os aspectos superficiais obtidos para cada uma das doze paredes (planejamento experimental da Tabela 2.4) utilizadas para construir o envelope de trabalho de referência. Para um mesmo nível de velocidade de alimentação (VA), as condições com menores níveis de velocidade de deslocamento (VD) apresentaram pior aspecto superficial (mais irregularidades geométricas). Nesse caso, quanto menor a VD maior o volume da poça de fusão para uma mesma pressão de arco (corrente), tornando a poça mais propensa ao escorrimento de material e resultando em mais irregulares, corroborando o proposto por Yehorov et al. (2020).

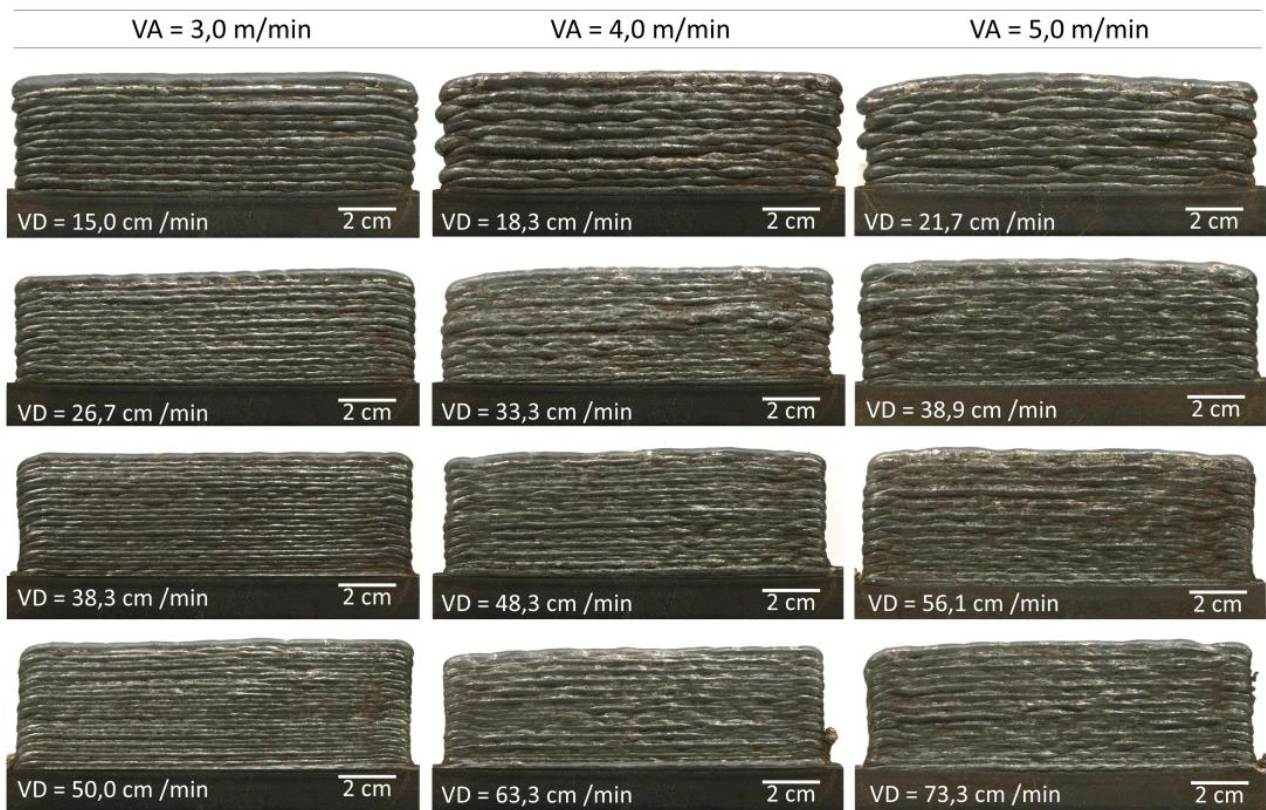


Figura 2.8 - Aspectos superficiais das paredes usadas para desenvolver o envelope de trabalho

A Tabela 2.6 apresenta os dados de aquisição de cada parede depositada para construir o envelope de trabalho de referência. É possível notar que os valores médios da VA (VA_m) foram semelhantes para cada nível alvo (VA_{alvo}), exceto quando foram utilizados valores de VD mais lentos (principalmente com a VA de 5 m/min). Como paredes com VD mais lentas apresentaram geometrias mais irregulares, variações mais significativas de VA foram impostas pelo equipamento CMT para manter o comprimento do arco constante, resultando nos desvios observados. Uma vez que apresentam correlação direta, os resultados de corrente média (I_m) e corrente RMS (I_{RMS}) apresentaram um comportamento semelhante ao observado para a VA. Além disso, os valores de tensão média e RMS (U_m e U_{RMS} , respectivamente) permaneceram no mesmo nível para uma dada VA_{alvo} , independentemente do nível de VD, o que mostra o bom desempenho da linha de sinérgica em manter o comprimento do arco constante. Os valores médios de energia do arco por unidade de comprimento (E_m), por sua vez, variaram principalmente devido às grandes variações adotadas para VD, e, em menor escala, devido às variações de potência instantânea média para uma determinada VA.

Tabela 2.6 – Valores médios (de 10 camadas) de velocidade de alimentação do arame média (VA_m), corrente média (I_m), corrente RMS (I_{RMS}), tensão média (U_m), tensão RMS (U_{RMS}) e energia do arco por unidade de comprimento (E_m) obtidos para as paredes do envelope de trabalho de referência

Cond.	VA_{alvo} (m/min)	VD (cm/min)	VA_m (m/min)	I_m (A)	I_{RMS} (A)	U_m (V)	U_{RMS} (V)	E_m (J/mm)
1	3,0	15,0	3,2±0,2	123,8±5,7	146,6±7,0	11,4±0,3	15,2±0,2	766±41
2	3,0	26,7	3,1±0,2	119,3±1,9	139,0±2,5	11,4±0,2	15,1±0,2	395±13
3	3,0	38,3	3,0±0,2	120,6±1,0	138,9±1,2	11,5±0,3	15,2±0,3	280±6
4	3,0	50,0	3,1±0,2	121,0±1,7	139,0±2,1	11,6±0,3	15,3±0,3	216±4
5	4,0	18,3	4,2±0,4	147,2±1,3	169,0±1,0	12,4±0,4	16,1±0,4	753±27
6	4,0	33,3	4,0±0,4	146,1±1,5	168,1±1,2	12,3±0,4	16,1±0,4	413±13
7	4,0	48,3	4,2±0,2	148,7±2,4	170,5±2,1	12,6±0,3	16,4±0,2	298±7
8	4,0	63,3	4,2±0,2	146,6±3,2	168,6±2,8	12,6±0,3	16,4±0,3	226±5
9	5,0	21,7	5,4±0,4	177,5±1,8	196,0±1,7	13,4±0,5	16,7±0,4	733±26
10	5,0	38,9	5,1±0,2	171,3±0,7	190,0±0,6	13,4±0,3	16,8±0,3	403±4
11	5,0	56,1	5,1±0,2	170,5±0,5	189,3±0,4	13,4±0,3	16,9±0,2	287±6
12	5,0	73,3	5,1±0,2	169,4±0,7	188,3±0,6	13,5±0,2	17,0±0,2	220±3

A Tabela 2.7 apresenta os resultados de medição da largura externa (L_{ext}), largura efetiva (L_{efe}), altura da camada (AC) e ondulação lateral (OL) quantificados com base na metodologia descrita anteriormente. Os desvios padrão não ultrapassaram 0,2 mm, indicando uma baixa variação dos resultados independentemente da característica geométrica avaliada. Na Figura 2.9(a) são apresentados os envelopes de trabalho para as larguras externa e efetiva da Tabela 2.7 em função da velocidade de deslocamento da tocha (VD) e da velocidade de alimentação alvo (VA_{alvo}). Na Figura 2.9(b), por sua vez, são apresentados os mesmos envelopes juntamente com os valores de larguras previstos pela aproximação teórica da Equação 2.1 (Tabela 2.5). Como observado, a aproximação teórica da largura da camada corresponde a uma condição intermediária entre os dois envelopes de trabalho, ou seja, para uma mesma combinação de VA e VD, as larguras previstas são menores do que as larguras externas, mas maiores do que as efetivas. De fato, esperava-se uma divergência entre os resultados de largura efetiva e largura prevista, já que a largura efetiva é tomada nos vales estabelecidos entre duas camadas. O tamanho desses vales, por sua vez, depende de um fator não considerado na aproximação teórica e chamado de diluição, que em soldagem é definida como o percentual do metal de base que entra na composição do metal de solda. Em geral, quanto maior a diluição, menor a dimensão dos vales formados entre duas camadas.

Tabela 2.7 – Resultados de largura externa (L_{ext}), largura efetiva (L_{efe}), altura da camada (AC) e ondulação lateral (OL) para as paredes do envelope de trabalho de referência (Tabela 2.4)

Condição	VA (m/min)	VD (cm/min)	L_{ext} (mm)	L_{efe} (mm)	AC (mm)	OL (mm)
1	3,0	15,0	$8,1 \pm 0,1$	$6,6 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,0$	$0,8 \pm 0,0$
2	3,0	26,7	$6,1 \pm 0,0$	$4,9 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,0$	$0,6 \pm 0,0$
3	3,0	38,3	$5,0 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,0$
4	3,0	50,0	$4,6 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,0$	$1,7 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,0$
5	4,0	18,3	$8,7 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,0$	$1,0 \pm 0,1$
6	4,0	33,3	$6,8 \pm 0,0$	$5,1 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,0$	$0,9 \pm 0,1$
7	4,0	48,3	$5,4 \pm 0,0$	$3,9 \pm 0,0$	$2,0 \pm 0,0$	$0,8 \pm 0,0$
8	4,0	63,3	$4,8 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,0$	$0,7 \pm 0,0$
9	5,0	21,7	$9,0 \pm 0,2$	$6,6 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$
10	5,0	38,9	$6,5 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,0$	$0,8 \pm 0,0$
11	5,0	56,1	$5,5 \pm 0,1$	$4,1 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,0$	$0,7 \pm 0,0$
12	5,0	73,3	$4,8 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,0$	$0,8 \pm 0,0$

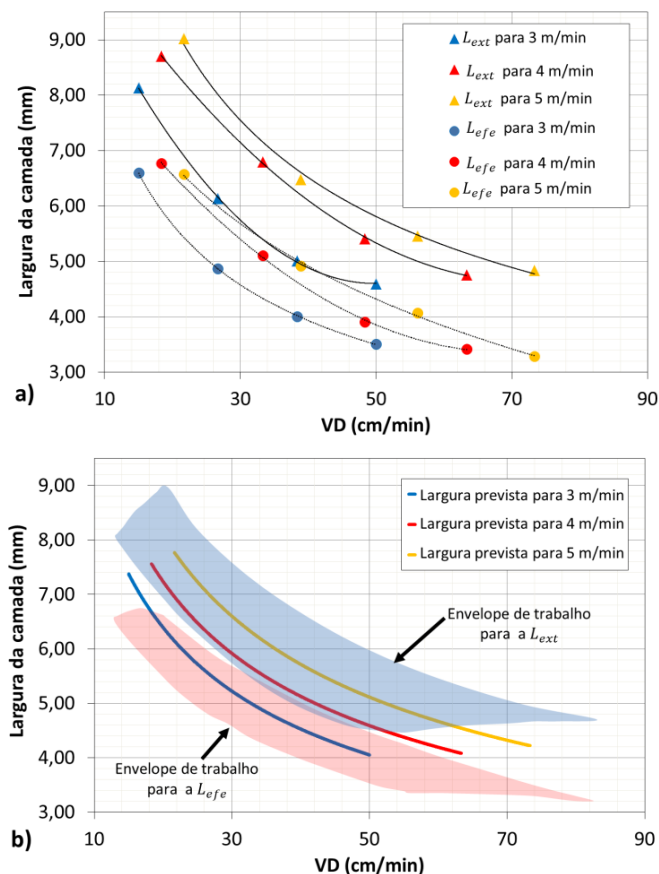


Figura 2.9 – Envelopes de trabalho de larguras externa e efetiva (L_{ext} e L_{efe} , respectivamente) em função da velocidade de deslocamento da tocha (VD) e dos valores de velocidades de alimentação alvo (VA_{alvo}): (a) dados experimentais e curvas de ajuste; (b) envelopes de trabalho e larguras previstas pela aproximação teórica

Na Figura 2.10(a) é apresentado o envelope de trabalho para a altura da camada (AC) em função da velocidade de deslocamento da tocha (VD) e da velocidade de alimentação alvo (VA_{alvo}), enquanto a Figura 2.10(b) ilustra esse envelope e os valores previstos pela aproximação teórica da Equação 2.2 (Tabela 2.5), simultaneamente. Com base na Figura 2.10(b), verifica-se que os valores de altura da camada medidos ficaram menores do que aqueles previstos pela aproximação. Assim, uma vez que os resultados quantificados de largura externa e altura da camada foram, respectivamente, maiores e menores do que os valores previstos pela aproximação teórica, pode-se dizer que o perfil geométrico da camada para o aço C-Mn avaliado (AWS ER70S-6) está mais próximo de uma semi-elipse do que de um semicírculo. Ainda que exista uma diferença entre os valores quantificados e previstos, a aproximação teórica mostrou-se uma ferramenta útil que pode ser utilizada como ponto de partida para a seleção dos parâmetros de processo.

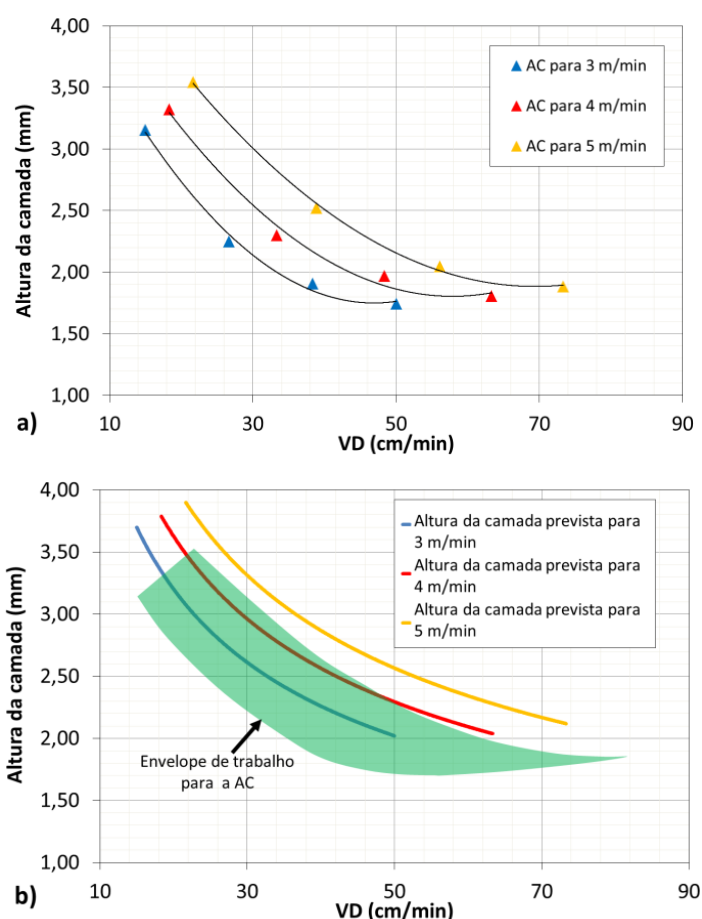


Figura 2.10 – Envelope de trabalho da altura da camada (AC) em função da velocidade de deslocamento da tocha (VD) e dos valores de velocidades de alimentação alvo (VA_{alvo}): (a) dados experimentais e curvas de ajuste; (b) envelope de trabalho e alturas das camadas previstas pela aproximação teórica

A Figura 2.11(a) apresenta os valores médios de ondulação lateral (OL) e suas respectivas curvas de ajuste em função da velocidade de deslocamento da tocha (VD) para diferentes valores de velocidades de alimentação alvo (VA_{alvo}). A OL nesse trabalho não engloba a formação de costa de dragão, somente o acabamento da superfície lateral. Vale lembrar que a faixa operacional de VD foi estabelecida para evitar tais irregularidades. A Figura 2.11(b) mostra uma representação dos mesmos dados em forma de uma superfície de resposta 2D que foi desenvolvida em um software de tratamento estatístico de dados. Para expressar visualmente os dados de OL como uma superfície de resposta, uma equação de predição (Equação 2.3) foi determinada pelo software. Esta equação será posteriormente utilizada para prever a ondulação lateral durante as validações. A avaliação da Figura 2.11(a) mostra que, em geral, quando um mesmo nível de VA é considerado, a ondulação lateral tende a diminuir com o aumento da VD, já que ocorre uma redução no volume da poça de fusão, tornando-a mais rígida e tendendo a diminuir a irregularidade da superfície. No entanto, esse comportamento não foi tão nítido para a VA de 5 m/min. Analisando a Figura 2.11(b), percebe-se que o aumento de VA tende a resultar em maiores ondulações laterais para um mesmo nível de VD. Este comportamento provém dos aumentos do volume da poça e da pressão do arco (consequência de maiores correntes médias) que, em ambos os casos, podem contribuir para a formação de uma poça mais instável e maior OL.

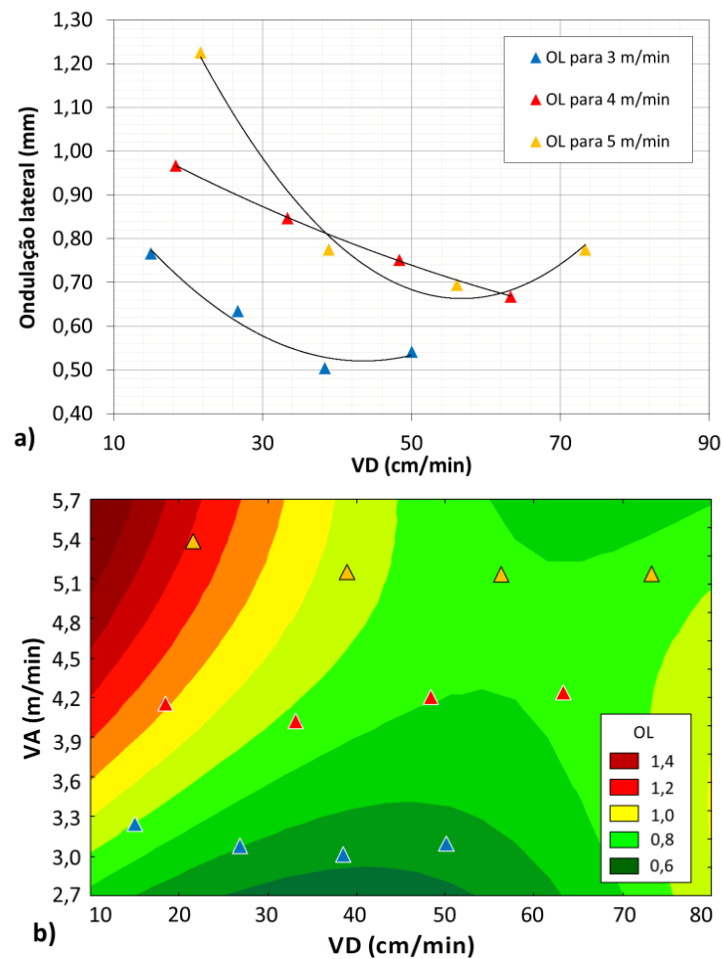


Figura 2.51 - Mapa da ondulação lateral das camadas em função da velocidade de deslocamento da tocha (VD) e dos valores de velocidades de alimentação alvo (VA_{alvo}): (a) dados experimentais e curvas de ajuste; (b) representação em superfície de resposta dos mesmos dados, com sobreposição de pontos representando a matriz experimental

$$OL = -0,6952 - 0,0069 \times VD + 0,0003 \times VD^2 + 0,6817 \times VA - 0,0404 \times VA^2 - 0,0050 \times VD \times VA \quad (2.3)$$

$$(R^2 = 0,94; R^2 - \text{ajustado} = 0,89)$$

2.4.2 Validação do envelope de trabalho de referência

Três paredes (paredes de validação) foram construídas com diferentes combinações de VA e VD visando atingir uma largura efetiva alvo de 4,5 mm, enquanto todos os demais parâmetros de deposição utilizados para desenvolver o envelope de trabalho de referência foram mantidos constantes. A Tabela 2.8 apresenta o valor da largura efetiva alvo, os níveis de VD escolhidos e os valores de VA que foram calculados a partir das equações das linhas de tendência do envelope de trabalho de largura efetiva (Figura 2.9). A Figura 2.12 indica a posição

das três referidas combinações de VA e VD dentro do envelope de trabalho para esta etapa de validação. Conforme evidenciado, as três combinações de parâmetros admitidas não coincidem com nenhuma das combinações consideradas para construir o envelope de trabalho (também indicadas na Figura 2.12) e foram propositalmente tomadas de modo a varrer a região central do envelope.

Tabela 2.8 – Largura efetiva (L_{efe}) alvo e combinações de VD e VA adotados para as paredes de validação

Condição alvo	L_{efe} alvo (mm)	VD (cm/min)	VA (m/min)
A	4,5	32,0	3,1
B	4,5	38,5	3,8
C	4,5	45,0	4,7

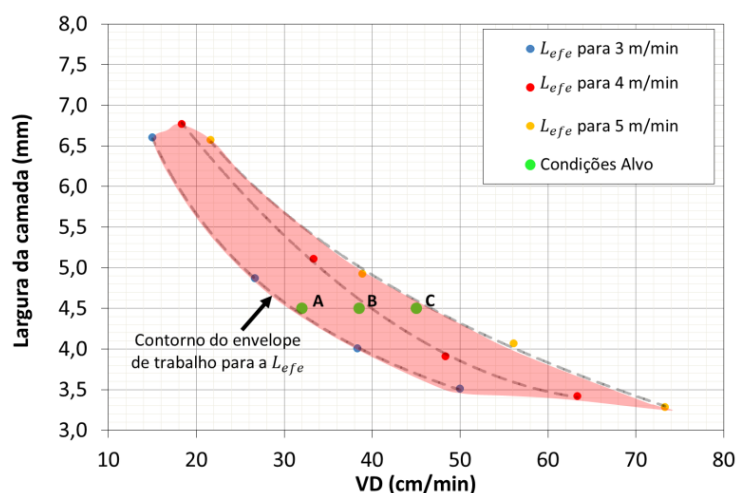


Figura 2.6 - Posicionamento das condições alvo para validação do envelope de trabalho de referência de largura efetiva (L_{efe})

A Tabela 2.9 apresenta os valores médios e seus respectivos desvios padrões para a largura externa (L_{ext}), largura efetiva (L_{efe}), altura da camada (AC) e ondulação lateral (OL) quantificados para as paredes de validação, juntamente com os valores dos dois parâmetros operacionais variados (VA e VD) e os valores previstos para cada característica geométrica a partir do envelope de trabalho. Tabela 2.10 indica os desvios quantificados entre os valores medidos e os previstos. Dentre as características geométricas avaliadas, a largura externa foi a que obteve os maiores desvios entre os valores medidos e os previstos, variando em $\pm 0,3$ mm. Todas as demais características apresentaram desvios entre $\pm 0,1$ mm, indicando uma boa robustez do envelope de referência desenvolvido (o fato do desvio não apresentar tendências também sugere confiabilidade estatística).

Tabela 2.9 – Combinações de velocidade de alimentação de arame alvo (VA_{alvo}) e velocidade de deslocamento (VD) e características geométricas previstas e medidas para as paredes de validação

Arame	VA (m/min)	VD (cm/min)	Valores previstos (mm)				Valores medidos (mm)			
			L_{ext}	L_{efe}	AC	OL	L_{ext}	L_{efe}	AC	OL
AWS ER70S- 6	3,1	32,0	5,6	4,5	2,1	0,6	$5,9 \pm 0,0$	$4,5 \pm 0,0$	$2,1 \pm 0,0$	$0,7 \pm 0,0$
	3,8	38,5	6,0	4,5	2,1	0,7	$5,7 \pm 0,0$	$4,4 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,0$	$0,6 \pm 0,0$
	4,7	45,0	6,0	4,5	2,2	0,8	$5,9 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,0$	$2,2 \pm 0,0$	$0,7 \pm 0,1$

Tabela 2.10 – Desvios quantificados entre os valores previstos e medidos da Tabela 2.9 para as características geométricas

Arame	VA (m/min)	VD (cm/min)	Desvios (mm)			
			L_{ext}	L_{efe}	AC	OL
AWS ER70S-6	3,1	32,0	0,3	0,0	0,0	0,1
	3,8	38,5	-0,3	-0,1	0,1	0,0
	4,7	45,0	-0,1	0,1	0,0	-0,1

Durante a análise por microscopia óptica das paredes de validação não foram observadas mudanças marcantes entre as diferentes combinações de VA e VD utilizadas para atingir a largura efetiva de 4,5 mm. Conforme mostrado na Figura 2.13, uma microestrutura formada majoritariamente por ferrita poligonal foi identificada em todas as condições. Para respaldar essa discussão, a Figura 2.14 apresenta as energias do arco por unidade de comprimento obtidas durante a deposição das três paredes de validação. Como pode ser visto, as combinações de parâmetros adotadas resultaram em níveis de energia do arco por unidade de comprimento muito próximos entre si. Deste modo, como as geometrias também foram praticamente as mesmas (sugerindo que a condução de calor ao longo da parede deve ter sido semelhante), os ciclos térmicos exercidos camada após camada provavelmente seguiram essa tendência, levando a microestruturas similares e indicando que existe uma grande correlação entre a energia do arco por unidade de comprimento e o calor imposto.

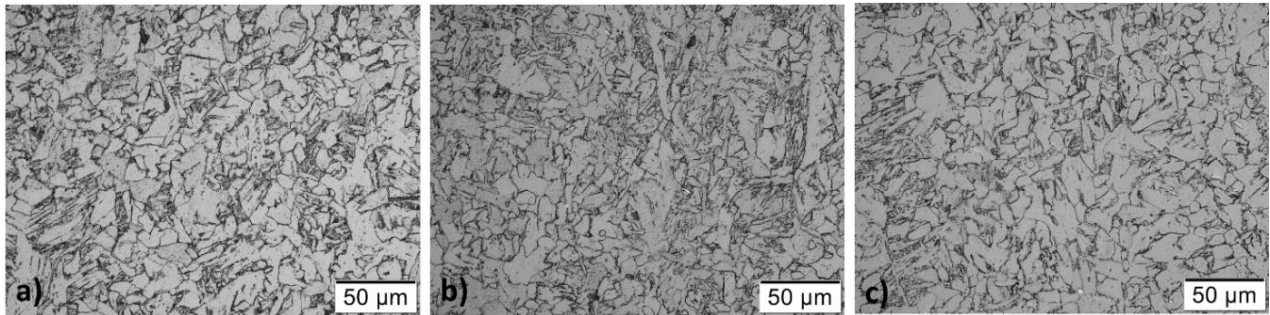


Figura 2.13 - Microestruturas típicas tomadas no centro do comprimento das paredes utilizadas para validação do envelope de referência (AWS ER70S-6), sempre considerando uma região de centro de camadas: (a) VA = 3,1 m/min e VD = de 32,0 cm/min; (b) VA = 3,8 m/min e VD = 38,5 cm/min; (c) VA = 4,7 m/min e VD = 45,0 cm/min

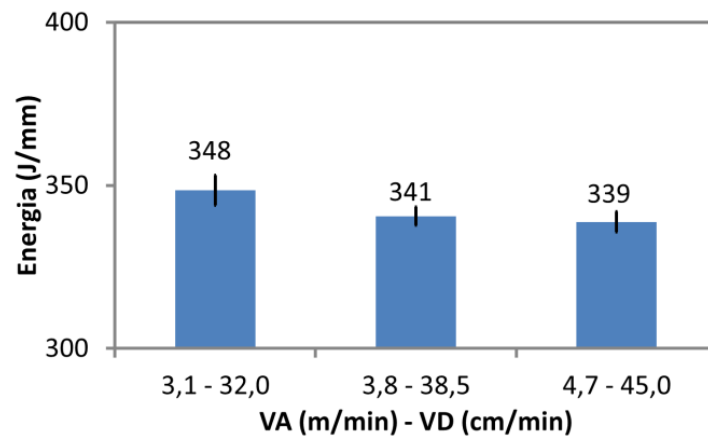


Figura 2.14 - Energias do arco por unidade de comprimento (média de 10 camadas) utilizadas nas construções das paredes de validação do envelope de referência

Sabe-se que a microestrutura não é governada apenas pela energia do arco e pelos ciclos térmicos, mas também pela composição química. Nesse sentido, análises de composição foram realizadas por um espectrômetro de fluorescência de raios-X (Olympus – Vanta C series), visando verificar a composição resultante da parede depositada com o arame AWS ER70S-6 e ao mesmo tempo avaliar se as diferentes combinações de VA e VD adotadas exerceram algum tipo de influência (maior ou menor perda de elementos de liga por vaporização). As medições foram realizadas nas paredes com as combinações mais extremas de VA e VD do envelope de trabalho de referência (Tabela 2.11). Conforme observado, a mudança nos parâmetros de deposição não exerceu nenhum tipo de influência significativa em termos da composição química.

Tabela 2.11 – Composições químicas (% em peso) das paredes do envelope de trabalho de referência (AWS ER70S-6) depositadas com as combinações mais extremas de VA e VD

VA (m/min)	VD (cm/min)	Mn	Si	Cr	Mo	P	Ni	Cu	Fe
3,0	15,0	1,21	1,07	-	-	0,02	-	-	Bal.
3,0	50,0	1,22	1,03	-	-	0,01	-	0,02	Bal.
4,0	18,3	1,20	1,05	0,02	-	0,02	-	0,02	Bal.
4,0	63,3	1,23	1,07	0,02	-	-	-	0,03	Bal.
5,0	21,7	1,28	1,07	-	-	0,02	-	-	Bal.
5,0	73,3	1,23	1,06	-	-	-	-	0,02	Bal.

*nota: devido ao baixo número atômico, o percentual em peso de carbono não pôde ser quantificado.

Naturalmente, alterações microestruturais foram evidenciadas entre a última camada depositada e as camadas restantes que sofreram o reaquecimento de vários ciclos térmicos. Esse comportamento também foi observado por Aldalur et al. (2020) e Kozamernik et al. (2020) ao utilizarem o mesmo arame (AWS ER70S-6). Para ilustrar esse comportamento, a Figura 2.15 apresenta macro e micrografias apenas para a condição de VA de 3,8 m/min e VD de 38,5 cm/min (combinação intermediária de parâmetros) das paredes de validação. É possível perceber que a última camada depositada, que corresponde aquela parcela da parede que não experimenta o ciclo térmico de uma camada subsequente (região 1), apresenta uma estrutura formada por grandes grãos colunares compostos majoritariamente por ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita acicular (AF). A região 2, por sua vez, corresponde a interseção estabelecida entre a última e penúltima camada depositada e é composta por menores quantidades de ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita acicular (AF) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), e pelos primeiros veios de ferrita poligonal (PF). Tanto o centro (região 3) quanto a base da parede (região 4) não apresentaram grandes diferenças microestruturais entre si e são compostos em sua grande maioria por ferrita poligonal. Acredita-se que as regiões 3 e 4 provavelmente experimentaram um histórico térmico (múltiplos ciclos térmicos) semelhante, resultando na semelhança microestrutural observada. No entanto, vale a pena notar que as microestruturas das regiões 1 e 2 ocorrem apenas na superfície superior de uma parede fina, podendo ser facilmente usinadas se for o caso. O volume principal de uma parede deverá ser composto por microestruturas ilustradas nas regiões 3 e 4 quando o arame AWS ER70S-6 for empregado, desde que o gerenciamento térmico durante a deposição mantenha a mesma temperatura entre as camadas e os demais parâmetros de deposição. Não obstante, as regiões 1 e 2 tornam-se relevantes em paredes curtas quanto à funcionalidade mecânica. Esta é a razão de apresentar este estudo microestrutural.

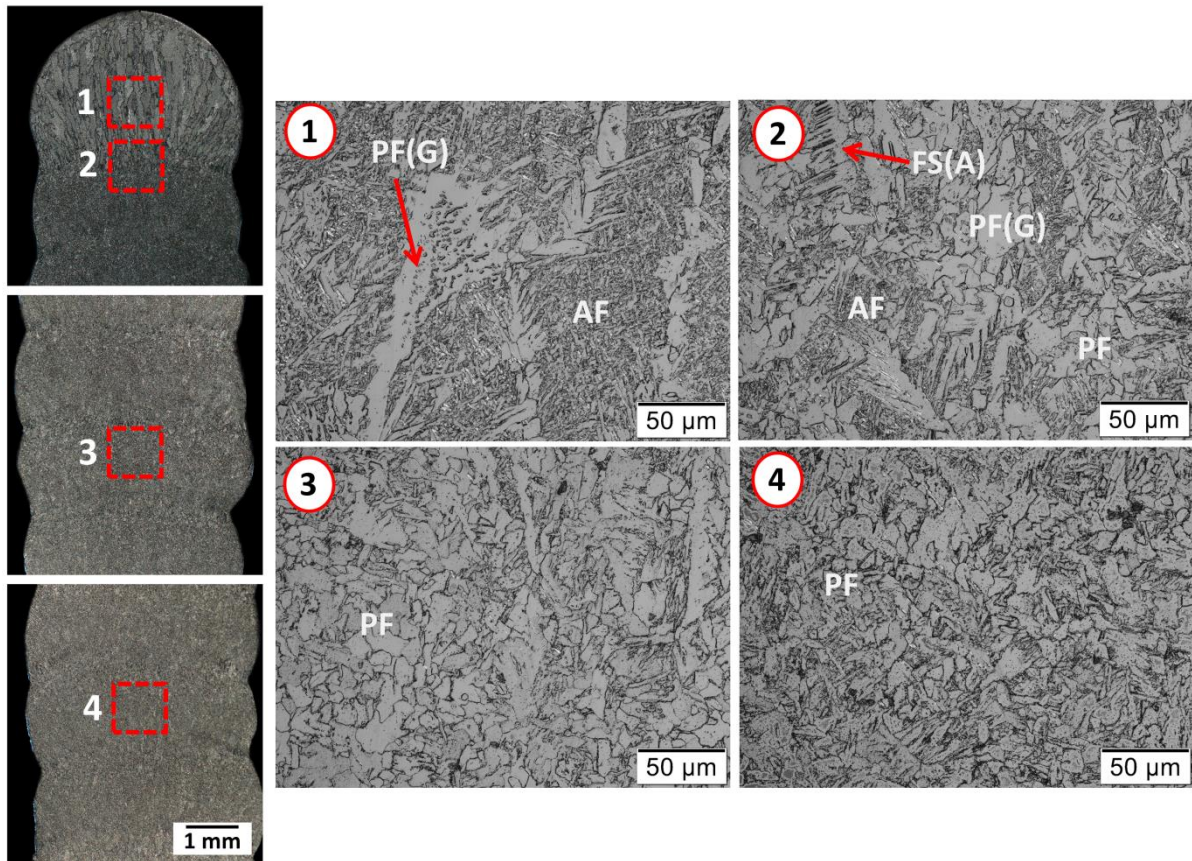


Figura 2.15 - Macro e micrografias nas regiões do topo, do centro e da base de uma seção transversal da parede de validação intermediária ($VA = 3,8 \text{ m/min}$ e $VD = 38,5 \text{ cm/min}$) depositada com AWS ER70S-6

A Figura 2.16 apresenta os perfis de microdureza obtidos para as amostras de validação depositadas com o arame AWS ER70S-6. Para a base e o centro das paredes, percebe-se que as microdurezas variaram em uma faixa mais estreita, entre 170 e 200 HV, como resultado da maior homogeneidade microestrutural observada para essas regiões. O topo das paredes, por sua vez, apresentou uma variação mais acentuada, entre 170 e 245 HV, em decorrência das diferentes morfologias de ferrita evidenciadas. Como pode ser observado na Figura 2.17, os maiores valores de microdureza identificados no topo estão associados às regiões intragranulares ricas em ferrita acicular.

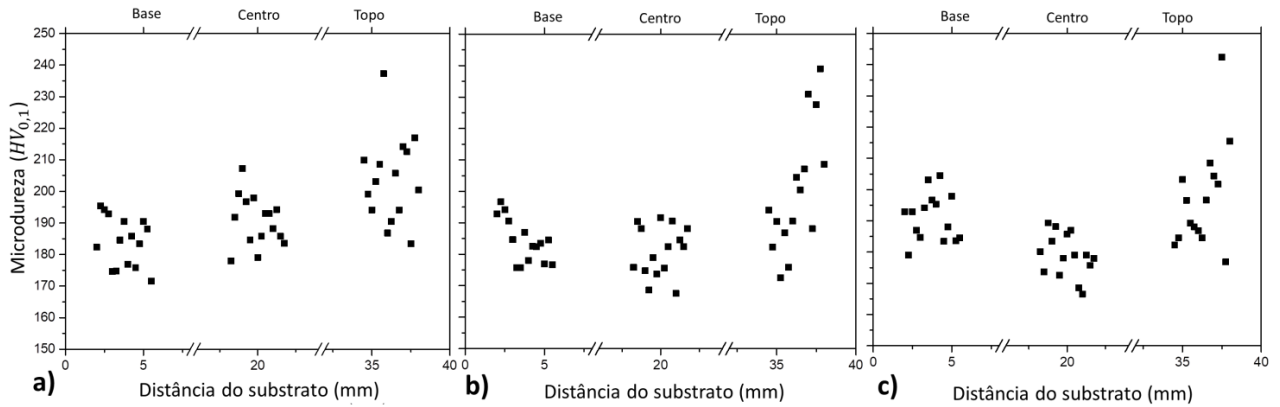


Figura 2.16 - Perfis de microdureza obtidos ao longo da direção de construção para as paredes de validação (AWS ER70S 6): (a) $VA = 3,1$ m/min e $VD = 32,0$ cm/min; (b) $VA = 3,8$ m/min e $VD = 38,5$ cm/min; (c) $VA = 4,7$ m/min e $VD = 45,0$ cm/min

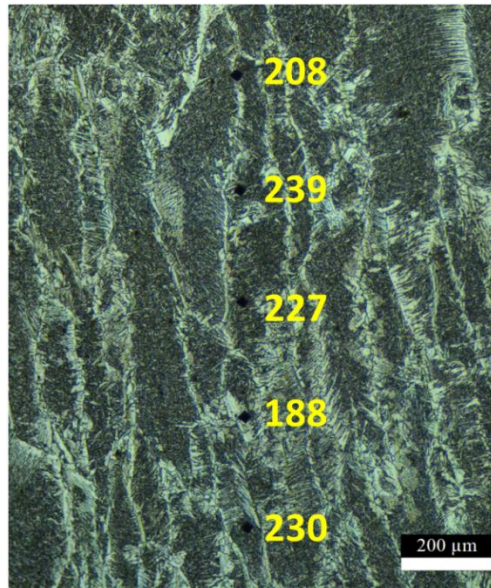


Figura 2.17 - Micrografia (região do centro da última camada) indicando os resultados de microdureza obtidos para o topo da parede de validação (AWS ER70S-6) com $VA = 3,8$ m/min e $VD = 38,5$ cm/min

A Figura 2.18 apresenta as médias de microdureza e os respectivos desvios padrões quantificados para as paredes de validação depositadas com o arame AWS ER70S-6. Com base nesses resultados, verifica-se que a média de microdureza ficou próxima de 185 HV e que as variações de VA e VD tomadas para atingir a mesma largura efetiva não levaram a nenhuma mudança significativa na microdureza entre as paredes de validação. Esse comportamento advém da semelhança macro e microestrutural anteriormente discutida, que é estabelecida devido à proximidade dos níveis de energia do arco por unidade de comprimento (que nesse caso pode ser correlacionado com o calor imposto) encontrada para as condições avaliadas.

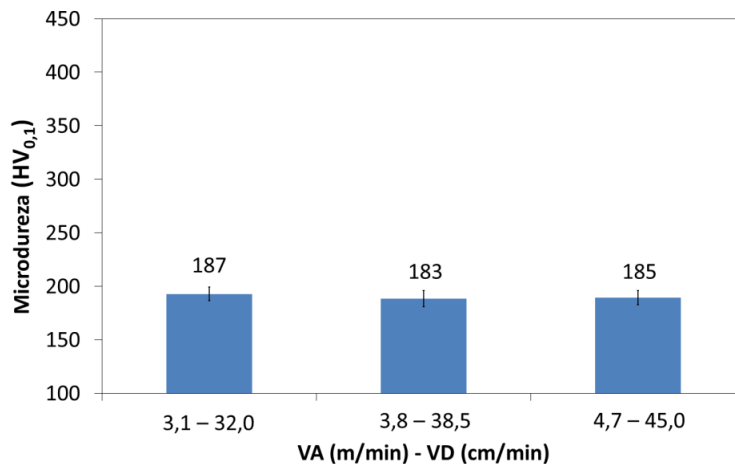


Figura 2.18 – Médias e desvios padrão de microdureza obtidos para o centro e a base das paredes de validação (AWS ER70S-6)

2.4.3 Explorando o potencial da abordagem de envelope de trabalho para a transportabilidade de parâmetros

Para avaliar a transportabilidade do envelope de trabalho pelo uso de outro tipo de consumível, três paredes foram depositadas com as mesmas combinações de parâmetros adotadas para as paredes de validação (Tabela 2.8), mas utilizando o arame AWS ER90S-B3 como metal de adição (paredes para análise de transportabilidade). Desta forma, a análise foi feita de forma comparativa com os resultados das paredes de validação do envelope de referência (aramé AWS ER70S-6). Nesse contexto, a Figura 2.19 apresenta o aspecto superficial das paredes. Não são percebidas alterações significativas ao contrastar as paredes feitas com o mesmo arame. No entanto, para a mesma combinação de parâmetros, superfícies mais regulares foram alcançadas com o arame AWS ER90S-B3 em relação ao AWS ER70S-3. Também é perceptível nesta figura que a velocidade de alimentação média (VA_m) atingiu os valores alvo independentemente do arame, indicando que as paredes tiveram a mesma quantidade de material depositada por unidade de comprimento quando considerado o mesmo conjunto de parâmetros.

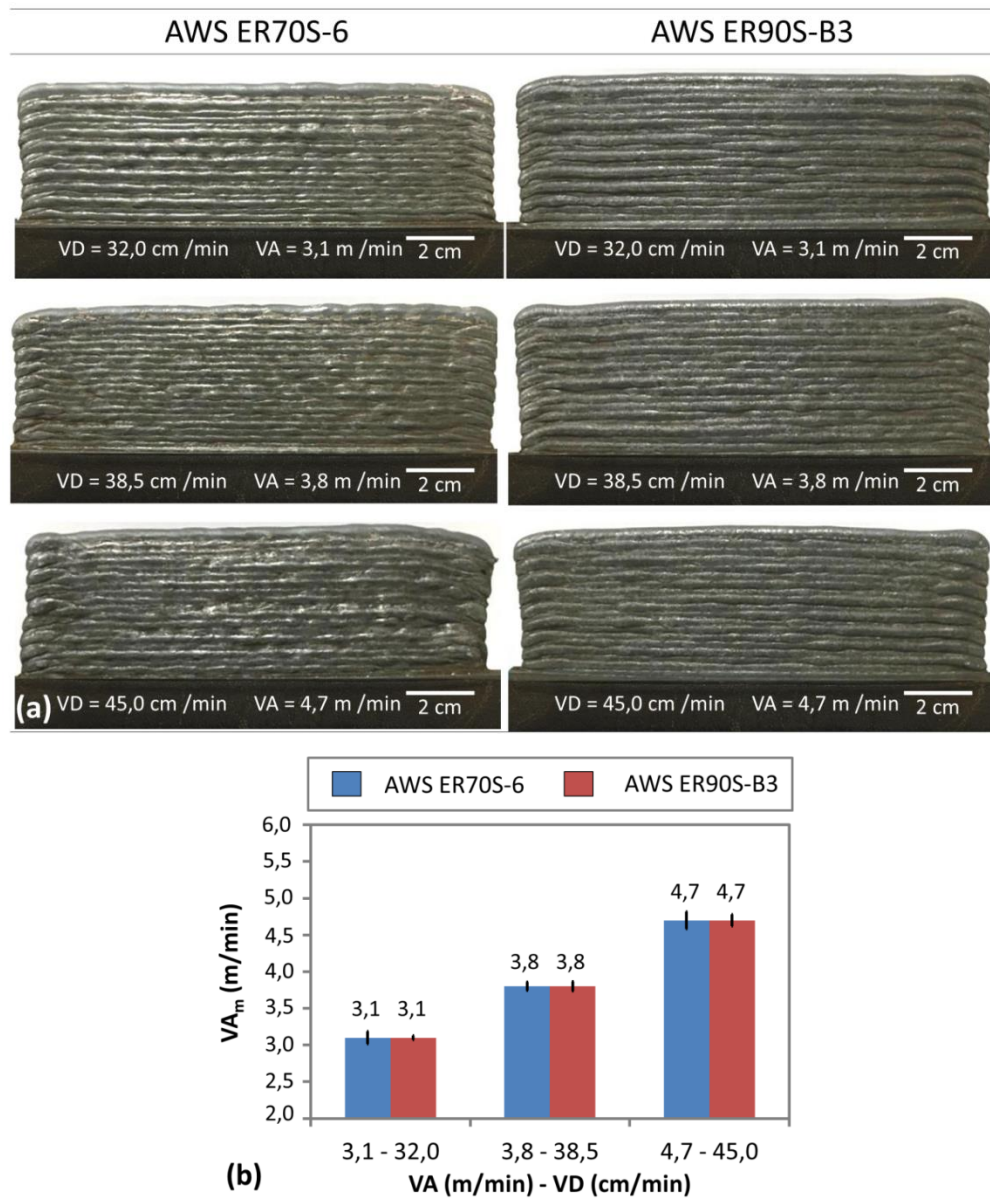


Figura 2.19 – (a) Aspecto superficial das paredes de validação (AWS ER70S-6) e de transportabilidade (AWS ER90S-B3) e (b) suas respectivas velocidade de alimentação média (VA_m)

A Tabela 2.12 apresenta as características geométricas previstas e medidas, a saber, largura externa da parede (L_{ext}), largura efetiva da parede (L_{efe}), altura da camada (AC) e ondulação lateral (OL). A Tabela 2.13 apresenta os desvios (diferença entre os valores medidos e os previstos). Conforme visualizado, os valores medidos de L_{ext} e AC sempre foram mais estreitos e mais altos, respectivamente, do que os valores esperados. Os valores de L_{efe} , por sua vez, apresentaram um desvio de no máximo 0,1 mm. A medida OL sempre foi menor do que o previsto, atingindo desvios de até -0,3 mm e quantificando o melhor acabamento superficial observado na Figura 2.19(a) para as paredes com o arame AWS ER90S-B3. Visto que há

diferença na composição química entre o arame adotado para construir o envelope de trabalho (AWS ER70S-6) e o arame usado para avaliar a transportabilidade de parâmetros (AWS ER90S-B3), divergências já eram esperadas.

Tabela 2.12 – Combinações de velocidade de alimentação de arame alvo (VA_{alvo}) e velocidade de deslocamento (VD) e características geométricas previstas e medidas para as paredes de transportabilidade

Arame	VA (m/min)	VD (cm/min)	Valores previstos (mm)				Valores medidos (mm)			
			L_{ext}	L_{efe}	AC	OL	L_{ext}	L_{efe}	AC	OL
AWS ER90S- B3	3,1	32,0	5,6	4,5	2,1	0,6	$5,4 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,0$	$2,3 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,0$
	3,8	38,5	6,0	4,5	2,1	0,7	$5,4 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,0$	$2,3 \pm 0,0$	$0,4 \pm 0,1$
	4,7	45,0	6,0	4,5	2,2	0,8	$5,6 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,0$	$2,3 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,0$

Tabela 2.13 – Desvios quantificados entre os valores previstos e medidos da Tabela 2.12 para as características geométricas

Arame	VA (m/min)	VD (cm/min)	Desvios (mm)			
			L_{ext}	L_{efe}	AC	OL
AWS ER90S-B3	3,1	32,0	-0,2	0,0	0,2	-0,1
	3,8	38,5	-0,6	0,1	0,2	-0,3
	4,7	45,0	-0,4	0,1	0,1	-0,3

2.4.4 Avaliação das diferenças físico-químicas entre os arames AWS ER70S-6 e AWS ER90S-B3

Para entender melhor como as propriedades físicas da poça de fusão podem ter mudado entre os arames, a Tabela 2.14 apresenta as composições químicas para ambos os materiais. Estes dados correspondem aos valores médios apresentados na Tabela 2.11 para o arame AWS ER70S-6 e aos valores médios obtidos para as paredes depositadas com o arame AWS ER90S-B3, que serão apresentados posteriormente (Tabela 2.15). Vale lembrar que as composições nominais de ambos os arames foram apresentadas anteriormente na Tabela 2.1. Deng et al. (2018) propuseram a Equação 2.4 para estimar a viscosidade dinâmica (η) do ferro no estado líquido, onde T corresponde à temperatura dentro de uma faixa ótima estabelecida entre 1463 e 1723 K. Os autores verificaram que a viscosidade dinâmica cresce à medida que os teores de Si e Ti são aumentados, enquanto o efeito inverso ocorre com o aumento nos teores de Mn, P e S. Assim, por mais que o teor de Si para o arame AWS ER90S-B3 seja menor em relação ao AWS ER70S-6 (em média, 0,40 % em peso), o que levaria a uma diminuição da viscosidade, o menor teor de Mn (em média, 0,72% em peso) contrabalancearia este efeito e faria com que a poça de

fusão do arame AWS ER90S-B3 viesse a apresentar uma maior viscosidade, resultando em uma maior resistência ao movimento da poça devido à pressão exercida pelo arco e, portanto, em uma geometria mais convexa após a solidificação (com menor largura externa e maior altura da camada). É importante observar que, conforme exibido na equação 2.4 proposta por Deng et al. (2018), o coeficiente associado ao Mn é maior do que o coeficiente associado ao Si, indicando que o teor de Mn é muito mais influente na viscosidade do ferro no estado líquido do que o teor de Si. Contudo, pelo menos em relação ao Si, o efeito sobre a viscosidade verificado por Deng et al. (2018) está em desacordo com alguns autores, como é caso de Lippold e Kotecki (2005), por exemplo, que afirmam que o silício é conhecido por melhorar a “fluidez” (entende-se reduzir a viscosidade) do ferro no estado líquido. Sendo esse o caso, o menor teor de Si para o AWS ER90S-B3 aumentaria a viscosidade da poça de fusão, também concordando com a geometria mais convexa. Porém, deve-se lembrar de que em análise de regressão, como a Equação 2.4 é fruto, não existe necessariamente relação entre causa e efeito de seus termos. Uma equação de regressão é apenas um ajuste de dados.

Além da viscosidade, a tensão superficial é outra propriedade que pode ter variado entre as poças de fusão estabelecidas para os dois materiais. Nesse caso, a existência de algum elemento tensoativo (S, O, Se e Te), por mais que em pequenas quantidades decorrentes de impurezas vindas da fabricação, poderia alterar a molhabilidade e levar a mudanças no perfil geométrico da poça. No trabalho de Keene et al. (1985), por exemplo, grandes variações de tensão superficial são constatadas entre dois aços inoxidáveis 316 que apresentaram uma diferença de apenas 139 ppm (0,0139 %) de S. Vale lembrar também que tanto a viscosidade quanto a tensão superficial são bastante dependentes da temperatura, por isso a difusividade térmica pode ser apontada como um outro fator a exercer influência na geometria das paredes, caso exista uma diferença nesta propriedade entre os dois materiais avaliados.

Tabela 2.14 – Valores médios de composição química (% em peso) para as paredes depositadas com os arames AWS ER70S-6 e AWS ER90S-B3 (fluorescência de Raio-X)

Arame	Mn	Si	Cr	Mo	P	Ni	Cu	Fe
AWS ER70S-6	1,23	1,06	0,01	-	0,01	-	0,01	Bal.
AWS ER90S-B3	0,51	0,66	2,41	0,93	0,02	0,05	0,12	Bal.

$$\eta = 34,42973 - 0,01514 \times T - 0,00349 \times C + 0,76756 \times Si - 2,35139 \times Mn - 3,63856 \times P - 6,91921 \times S + 5,91118 \times Ti \quad (2.4)$$

Para discutir o efeito do arame sobre os aspectos físicos do arco, a Figura 2.20 apresenta os valores médios dos principais parâmetros do processo (corrente média e RMS, tensão média e RMS). Apesar da mesma combinação de parâmetros (VA e VD) ser empregada para ambos os

arames, correntes média e RMS ligeiramente maiores foram observadas nas paredes construídas com AWS ER90S-B3 (Figuras 2.20(a) e (b)). Isso significa que é necessária uma corrente mais alta para fundir o arame AWS ER90S-B3 com a mesma taxa de fusão. Para investigar esse comportamento, valores médios de tempo de arco aberto (t_{aa}) e tempo de curto-circuito (t_{cc}) foram calculados através dos dados do sinal elétrico de cinco camadas, usando um software desenvolvido e registrado por Vilarinho & Araújo (2019). Os resultados indicaram que t_{aa} e t_{cc} são iguais entre si, mas levemente diferentes para cada arame. Em média, o arame AWS ER70S-6 obteve t_{aa} e t_{cc} iguais a 6,3 ms, enquanto o arame AWS ER90S-B3 apresentou t_{aa} e t_{cc} iguais a 6,0 ms. Consequentemente, a frequência de curto-circuito foi maior para as paredes depositadas com o arame AWS ER90S-B3 (82,9 Hz) do que para com o arame AWS ER70S-6 (79,8 Hz). Para ilustrar esse resultado, a Figura 2.21 apresenta os oscilogramas de corrente e tensão adquiridos para a condição de VA de 3,8 m/min e VD de 38,5 cm/min utilizando os dois materiais. Como é observado, existe uma defasagem entre as curvas de corrente e tensão para os dois arames que advém da diferença de frequência de curto-circuito estabelecida. Esse resultado por si só não justifica os maiores níveis de corrente evidenciados para o arame AWS ER90S-B3 em relação ao arame AWS ER70S-6 para manter a mesma taxa de fusão (mesma VA_m). Para isso, seria necessário ou que $t_{aa} < t_{cc}$ para o AWS ER70S-6, mantendo os níveis de corrente por mais tempo em patamares mais baixos, ou que $t_{aa} > t_{cc}$ para o AWS ER90S-B3, resultando no efeito contrário. Desta forma, este comportamento foi discutido com o auxílio da equação da taxa de fusão para curto-circuito mencionada por Jorge et al. (2021) (Equação 2.5), onde: TF é a taxa de fusão; α e β são constantes dependentes da polaridade, do gás de proteção e do material do arame; ρ é a resistividade do arame; L é o comprimento do eletrodo; S é a área da secção transversal do arame; I_m é o valor médio de corrente; I_{RMS} é o valor RMS de corrente; t_{aa} é o tempo de arco aberto; t_{cc} é o tempo de curto-circuito.

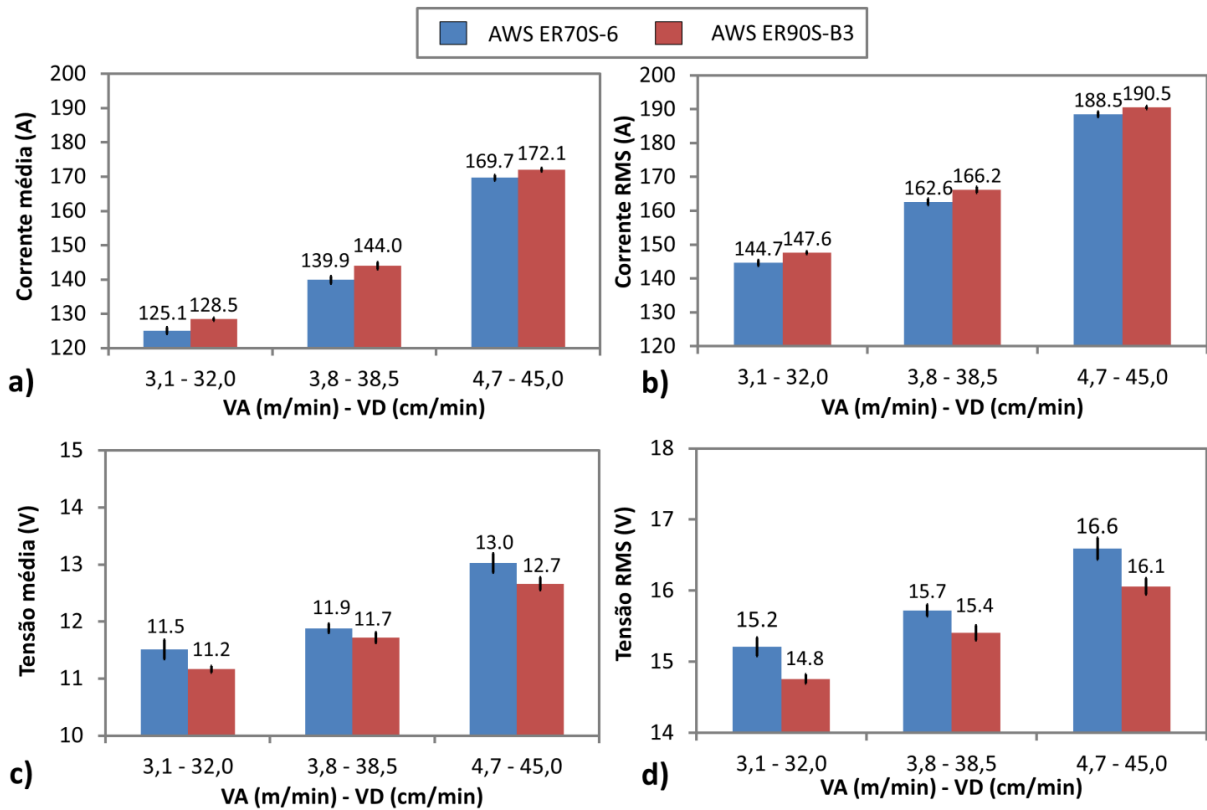


Figura 2.20 – Parâmetros monitorados das paredes de validação (AWS ER70S-6) e transportabilidade (AWS ER90S-B3): (a) corrente média; (b) corrente RMS; (c) tensão média; (d) tensão RMS

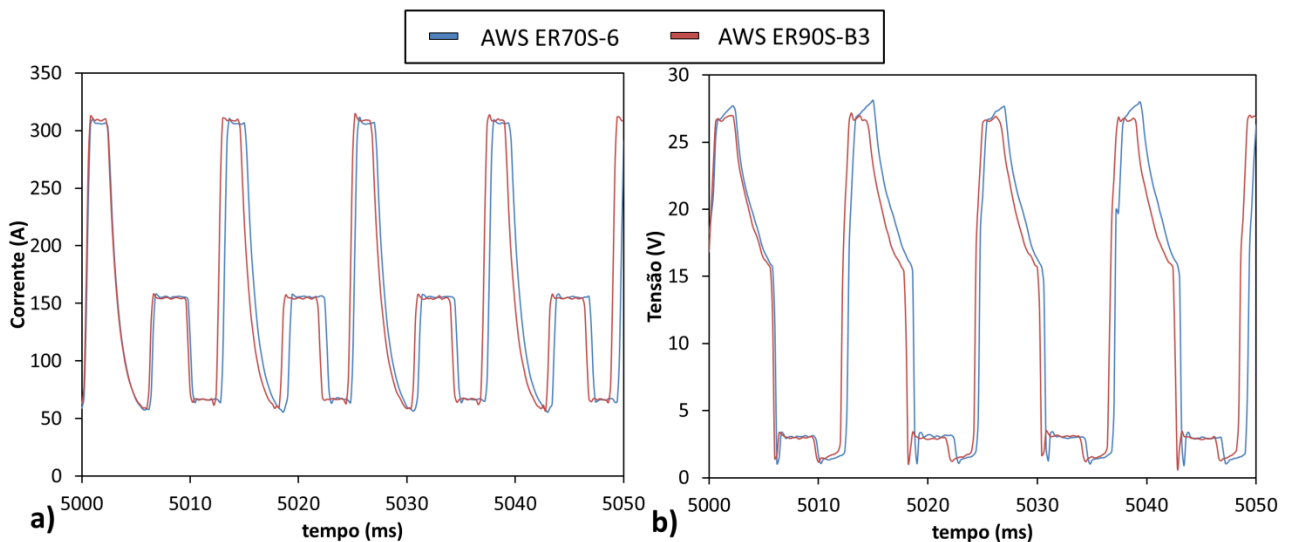


Figura 2.21 – Oscilogramas de (a) corrente e (b) tensão para as mesmas VA (3,8 m/min) e VD (38,5 cm/min) ao usar os arames AWS ER70S-6 e AWS ER90S-B3

$$TF = \left(\alpha I_m + \beta \frac{\rho L}{S} I_{RMS}^2 \right) \Big|_0^{t_{aa}} + \left(\beta \frac{\rho L}{S} I_{RMS}^2 \right) \Big|_{t_{aa}}^{t_{cc}} \quad (2.5)$$

Sabendo que a mesma taxa de fusão foi obtida para uma dada combinação de VA e VD (Figura 2.19(b)) e considerando que o comprimento de arco foi igual para ambos os arames (suposição possível pelo uso da mesma linha sinérgica nos dois casos), os maiores níveis de corrente para o arame AWS ER90S-B3 podem ser justificados pelas seguintes hipóteses: a) a área da secção transversal (S) é maior para o arame AWS ER90S-B3; b) o AWS ER90S-B3 dispõe de menor ρ ; c) os valores de α e β são menores para o AWS ER90S-B3. A primeira hipótese é verdadeira, uma vez que os diâmetros foram iguais a $1,17 \pm 0,01$ mm e $1,15 \pm 0,00$ mm (sete medições feitas com um micrômetro de faixa nominal de 25 mm e resolução de 0,01 mm) para os arames AWS ER90S-B3 e AWS ER70S-6, respectivamente, levando a áreas calculadas de 4,30 e 4,15 mm². Uma evidência que poderia levar à conclusão de que o arame de aço de baixa liga possui menor resistividade elétrica (ρ) vem do fato das tensões médias e RMS serem levemente menores (Figuras 2.20(c) e (d)) quando este arame foi utilizado. A terceira hipótese, relacionada às constantes α e β , não foi possível de ser avaliada neste trabalho. Seja por um motivo ou outro, ou ainda por uma combinação entre eles, está demonstrado que os dois arames tinham propriedades físicas de arco diferentes, não apenas composições químicas diferentes. Assim, é assegurada a sua utilização para demonstrar o potencial de transportabilidade de parâmetros da abordagem de envelope de trabalho.

2.4.5 Aspectos metalúrgicos das paredes para análise de transportabilidade

Assim como aconteceu para as paredes de validação, a Figura 2.22 demonstra que não existem diferenças significativas entre as energias do arco por unidade de comprimento entre as 3 paredes empregadas para atingir a mesma largura efetiva de parede (4,5 mm), quando o arame AWS ER90S-B3 foi utilizado como metal de adição (considerando os desvios padrão). No entanto, outras combinações de VA e VD podem fornecer resultados diferentes. Além disso, de acordo com a Tabela 2.15, também não foi observada variação na composição química das paredes depositadas. Como consequência da semelhança entre os resultados de energia do arco, geometria (Tabela 2.12) e composição química, não foram observadas diferenças significativas entre microestruturas das amostras correspondentes as paredes de transportabilidade, conforme mostrado na Figura 2.23. Uma microestrutura formada majoritariamente por martensita e bainita é identificada nesse caso (baseando-se em microscopia óptica).

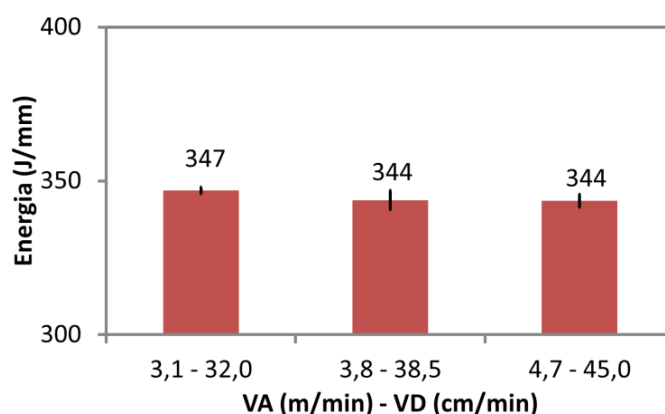


Figura 2.22 – Médias e desvios padrão das energias de arco por unidade de comprimento das paredes depositadas para avaliar a transportabilidade de parâmetros (mesma largura do alvo com diferentes combinações de VA e VD)

Tabela 2.15 – Composição química (% em peso) das paredes depositadas para avaliar a transportabilidade de parâmetros (AWS ER90S-B3)

VA (m/min)	VD (cm/min)	Mn	Si	Cr	Mo	P	Ni	Cu	Fe
3,1	32,0	0,50	0,68	2,41	0,92	0,02	0,05	0,13	Bal.
3,8	38,5	0,51	0,65	2,40	0,92	0,02	0,05	0,10	Bal.
4,7	45,0	0,53	0,64	2,42	0,94	0,02	0,05	0,13	Bal.

*nota: devido ao baixo número atômico, o percentual em peso de carbono não pôde ser quantificado.

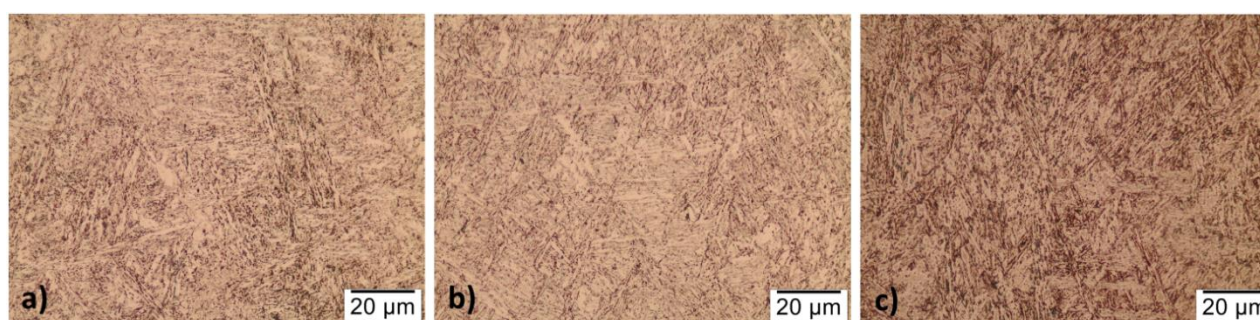


Figura 2.23 – Microestruturas típicas tomadas no centro do comprimento das paredes depositadas para avaliar a transportabilidade de parâmetros (AWS ER90S-B3), sempre considerando uma região de centro de camadas: (a) VA = 3,1 m/min e VD = de 32,0 cm/min; (b) VA = 3,8 m/min e VD = 38,5 cm/min; (c) VA = 4,7 m/min e VD = 45,0 cm/min

Foi replicada nas paredes depositadas com o arame AWS ER90S-B3 a mesma análise aplicada para avaliar a variação da microestrutura e dureza ao longo da direção de construção nas paredes depositadas para validar o envelope de referência. Para exemplificação, a Figura 2.24 apresenta macro e micrografias para a parede com VA = 3,8 m/min e VD = 38,5 cm/min.

Como visto, nenhuma descontinuidade é observada. Contrastando com as paredes feitas de aço C-Mn (AWS ER70S-6), não são observadas alterações significativas na macro e microestrutura mesmo entre a última camada e as camadas restantes. Uma formação mais significativa de martensita revenida é possível na transição entre as duas últimas camadas depositadas (região 2), no meio da parede (região 3) e na parte inferior (região 4) quando comparada à última camada (região 1). Como as regiões 2, 3 e 4 estão sujeitas ao reaquecimento exercido pela deposição de múltiplas camadas, estas podem apresentar algum nível de revenimento. No entanto, para garantir a existência de tal comportamento, uma investigação microestrutural mais aprofundada deve ser realizada, o que está fora do contexto deste trabalho. Neste caso, pode-se afirmar apenas que a microestrutura é composta principalmente por martensita, martensita revenida e bainita, o que está de acordo com os achados de Dirisu et al. (2019) e Sharma & Shahi (2018) para o arame AWS ER90S-B3.

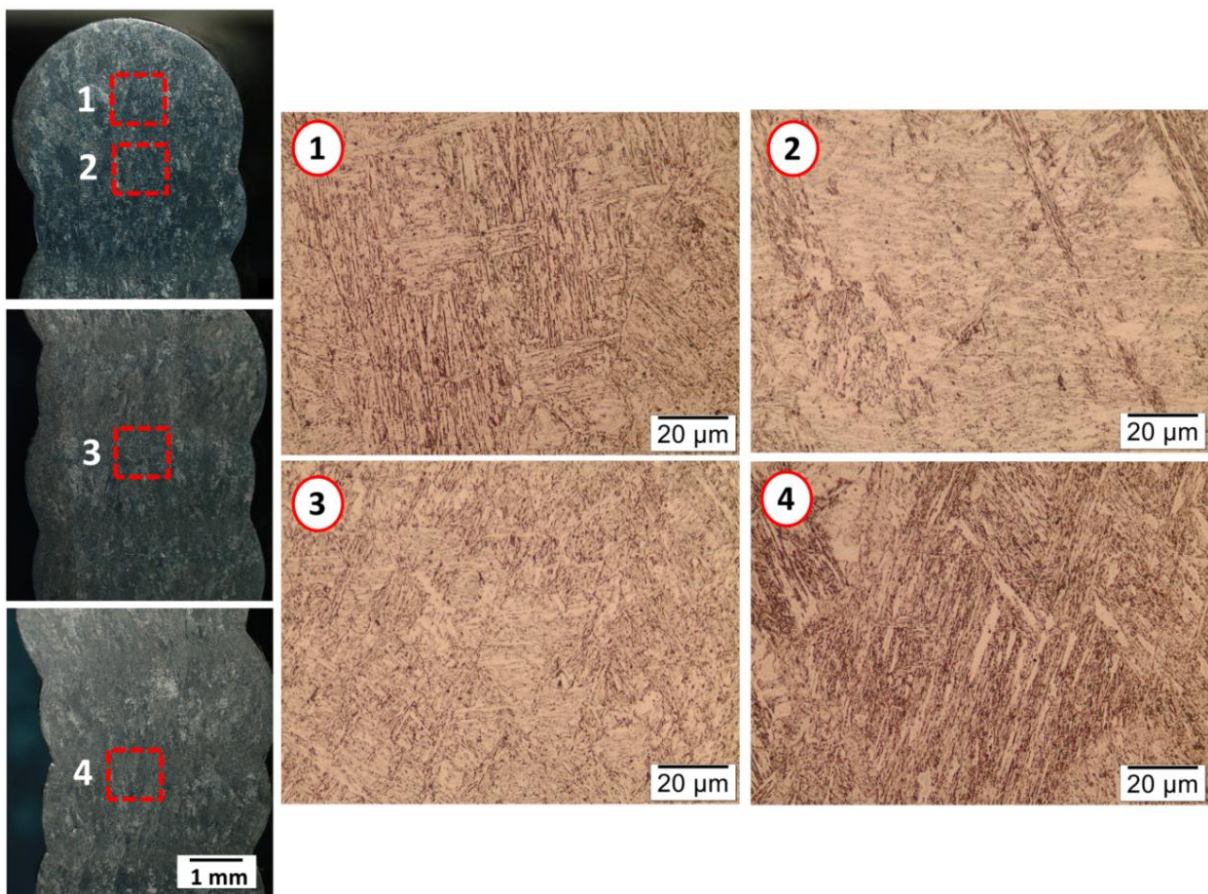


Figura 2.24 – Macro e micrografias nas regiões do topo, do centro e da base de uma seção transversal da parede de combinação de parâmetros intermediária ($VA = 3,8$ m/min e $VD = 38,5$ cm/min) depositada com AWS ER90S-B3

Como pode ser visto na Figura 2.25, os valores de microdureza variaram entre 270 e 420 HV para as paredes com o arame AWS ER90S-B3. Como indicado pelas setas vermelhas, um comportamento cíclico foi identificado. Dependendo dos históricos térmicos vivenciados (taxa de resfriamento, temperatura de pico, tempo de permanência em uma faixa de temperatura), cada região pode apresentar maior ou menor formação de martensita, martensita revenida e bainita, resultando no comportamento observado. Os valores médios de microdureza ficaram em torno de 335 HV (Figura 2.26). De um modo geral, uma vez que os dois metais de adição são diferentes, existem diferenças metalúrgicas entre as paredes para validação do envelope e as paredes para avaliar a transportabilidade de parâmetros, mas a transportabilidade dos parâmetros mostrou-se viável.

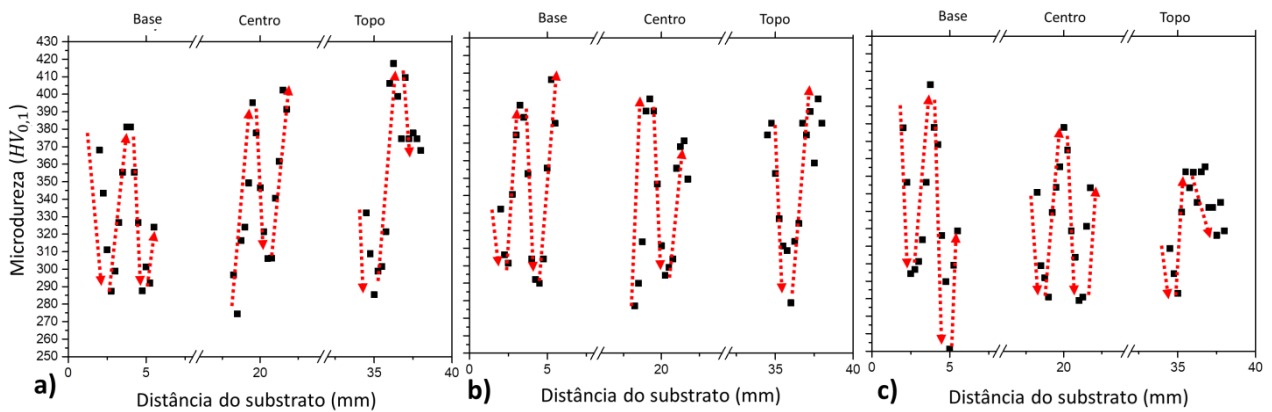


Figura 2.25 – Perfis de microdureza obtidos ao longo da direção de construção para as paredes depositadas para avaliar a transportabilidade de parâmetros (AWS ER90S-B3): (a) VA = 3,1 m/min e VD = 32,0 cm/min; (b) VA = 3,8 m/min e VD = 38,5 cm/min; (c) VA = 4,7 m/min e VD = 45,0 cm/min

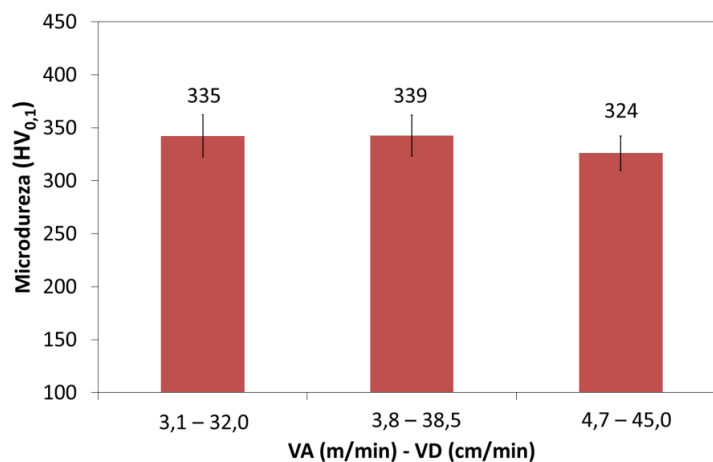


Figura 2.26 – Médias e desvios padrão de microdureza obtidos para o centro e a base das paredes depositadas para avaliar a transportabilidade de parâmetros (AWS ER90S-B3)

2.4.6 O uso da abordagem de envelope de trabalho como ferramenta de seleção de parâmetros

Para atingir o objetivo específico 2.2 (OE 2.2) descrito neste capítulo, ou seja, investigar a possibilidade de utilizar a abordagem de envelope trabalho como ferramenta de seleção de parâmetros para uma mesma largura alvo, a Figura 2.27 apresenta o envelope de trabalho de referência para a largura efetiva da parede considerando a energia do arco por unidade de comprimento (E), a ondulação lateral (OL) e o tempo ativo de deposição (t_{ad}) como respostas. Os valores de t_{ad} foram determinados considerando uma parede com 140 mm de comprimento, com altura total de 40 mm. Primeiramente, o número de camadas necessárias foi encontrado dividindo a altura total (40 mm) pelas alturas de camada alcançadas para cada combinação de VA e VD do envelope de referência (Tabela 2.7). Em seguida, o número de camadas para cada condição foi multiplicado pelo comprimento da parede (140 mm), visando calcular as distâncias totais a serem percorridas. Finalmente, essas distâncias foram divididas pelas velocidades de deslocamento para encontrar t_{ad} (estes não incluem os tempos de espera entre uma camada e outra).

Funções de segunda ordem, similares à da Equação 2.6, foram usadas para plotar as superfícies de resposta. Nesse modelo, “ $f(x, y)$ ” representa as funções dependentes das variáveis independentes “ x e y ”, que neste caso correspondem à velocidade de deslocamento e a largura efetiva da parede, “ A ” corresponde ao termo constante, enquanto que “ B, C, D, E e F ” são os coeficientes. Visando melhorar o coeficiente de determinação (R^2) que pode ser quantificado para cada modelo, o nível de significância de cada termo do modelo foi avaliado por meio de ANOVA e os termos menos significativos (p -valores $> 0,05$) foram descartados. Em termos de interpretação, um R^2 igual a 0,95 significa que 95% da variabilidade dos dados pode ser explicada pelo modelo, por exemplo. As Equações 2.7 a 2.9 apresentam os modelos utilizados para desenvolver as superfícies da Figura 2.27 (à esquerda) e seus respectivos R^2 e R^2 -ajustado. Em tempo, segundo Montgomery (2013), o R^2 -ajustado corresponde a uma variação do R^2 que se ajusta ao tamanho do modelo, ou seja, ao número de fatores. A Figura 2.27 também exibe (no lado direito) os gráficos dos valores preditos x valores observados para cada superfície de resposta. Esses gráficos podem revelar padrões indesejados nos resíduos de forma mais eficaz do que se comparados os números. Idealmente, um modelo se ajusta bem quando as diferenças entre os valores observados e os valores previstos a partir do mesmo são pequenas e se distribuem aleatoriamente. Quanto mais a variabilidade dos dados puder ser explicada pelo modelo, mais próximos os pontos de dados estarão da linha de regressão ajustada.

$$f(x, y) = A + Bx + Cx^2 + Dy + Ey^2 + Fxy \quad (2.6)$$

$$E \text{ (J/mm)} = -599,2388 + 8,3168 x VD + 216,8446 x L_{efe} - 2,0407 x VD x L_{efe} \quad (2.7)$$

($R^2 = 0,99$; $R^2 - \text{ajustado} = 0,99$)

$$OL \text{ (mm)} = -0,9799 + 0,0041 x VD + 0,2325 x L_{efe} + 0,0027 x VD x L_{efe} \quad (2.8)$$

($R^2 = 0,77$; $R^2 - \text{ajustado} = 0,69$)

$$t_{ad} \text{ (min)} = -15,5018 + 0,3199 x VD + 10,9595 x L_{efe} - 0,8609 x L_{efe}^2 - 0,1250 x VD x L_{efe} \quad (2.9)$$

($R^2 = 0,97$; $R^2 - \text{ajustado} = 0,96$)

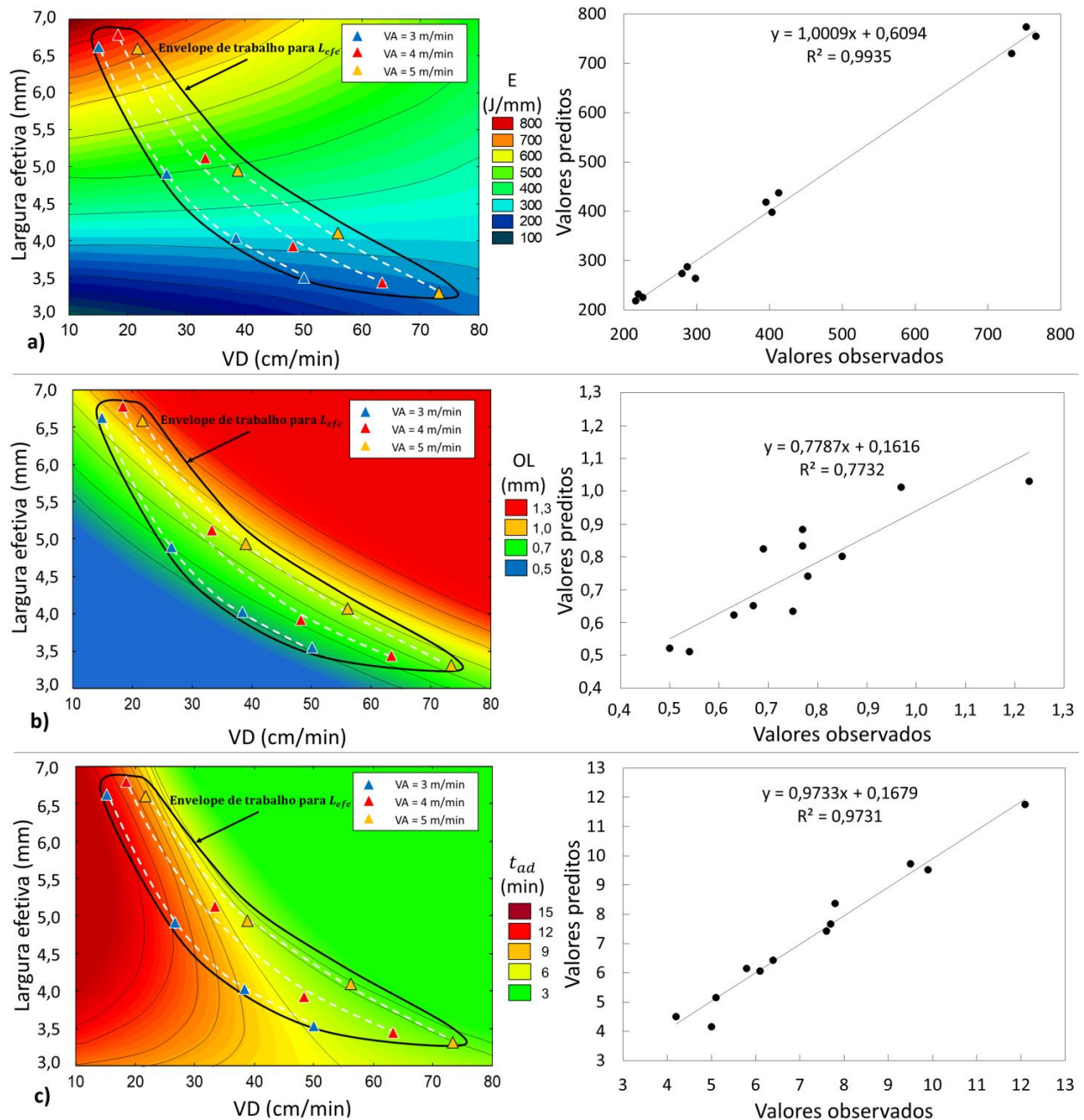


Figura 2.27 – Envelope de trabalho de referência para a largura efetiva considerando como respostas os resultados de (a) energia do arco por unidade de comprimento, (b) ondulação lateral e (c) tempo ativo de deposição

A Figura 2.27(a) sugere que mudanças em VA e VD tendem a variar levemente a energia do arco por unidade de comprimento para uma dada largura efetiva, principalmente, quando menores valores de largura são considerados. Por exemplo, ao usar a equação de previsão para determinar a energia do arco por unidade de comprimento (Equação 2.7) para um L_{efe} de 4,0 mm e considerando VD igual a 40,0 e 57,0 cm/min (próximo aos limites do envelope), os valores previstos de E são iguais a 274 e 277 J/mm, respectivamente, resultando em uma diferença (ΔE)

de apenas 3 J/mm. Por outro lado, quando se admite uma largura de parede de 6,5 mm, e considerando VD igual a 16,0 e 22,0 cm/min (novamente próximo aos limites do envelope), os valores previstos de E são iguais a 731 e 701 J/mm, respectivamente, resultando em um ΔE de 30 J/mm. Conforme já evidenciado, variações de E entre 339 e 348 J/mm ($\Delta E = 9$ J/mm) para AWS ER70S-6 (Figura 2.14) e entre 344 e 347 J/mm ($\Delta E = 3$ J/mm) para AWS ER90S-B3 (Figura 2.22) não foram suficientes para alterar significativamente a microestrutura ou os perfis de microdureza para uma largura alvo de 4,5 mm. Embora essa diferença possa se tornar maior para larguras maiores, ainda é improvável que sejam suficientes para levar a mudanças significativas na microestrutura e nas propriedades mecânicas. Assim, seja para o envelope de trabalho de referência (AWS ER70S-6) ou para um potencial envelope de trabalho considerando a transportabilidade de parâmetros (AWS ER90S-B3), pode-se afirmar que, para a mesma largura alvo, as variações de VA e VD não afetam significativamente a microestrutura e microdureza.

A Figura 2.27(b) mostra que o emprego de menores de VA e VD resulta em menor OL e, conseqüentemente, em melhor acabamento superficial para uma mesma largura efetiva de parede. Considerando a Equação 2.8 e tomando, por exemplo, uma L_{efe} de 4,0 mm e valores de VD iguais a 40,0 e 57,0 cm/min (valores próximos aos limites do envelope), as OL resultantes são 0,5 e 0,8 mm, respectivamente, resultando em uma diferença (ΔOL) de 0,3 mm. Quando considerada uma L_{efe} de 6,5 mm com valores de VD de 16,0 e 22,0 cm/min (novamente próximo aos limites do envelope), a OL resultante será 0,9 e 1,0 mm, respectivamente, resultando em um ΔOL de 0,1 mm. Isso significa que o acabamento da superfície se deteriora para maiores larguras, porém, é menos afetado pela combinação VA-VD. O gráfico dos valores preditos x observados de OL mostra que os valores estão razoavelmente distribuídos ao longo da linha de regressão ajustada e que esta distribuição das observações é simétrica em torno dos valores previstos correspondentes. Isso dá confiança estatística ao modelo, mesmo com um R^2 -ajustado relativamente baixo.

A Figura 2.27(c) indica que ao se empregar valores mais altos de VA e VD para uma determinada largura alvo, o tempo ativo de deposição (t_{ad}) se torna mais curto. Apesar dos tempos de espera (necessários para atingir as temperaturas intercamadas de 30 °C) entre uma camada e outra não serem considerados nesta análise, essa tendência não deve ser afetada desde que seja considerada sempre a mesma largura efetiva alvo. Conforme evidenciado na Figura 2.27(a), a energia do arco (entrada de calor) apresentou pequenas variações para a mesma L_{efe} alvo (que governa a saída de calor por condução). Assim, tempos de espera iguais ou muito próximos devem ser atingidos. Mudanças na largura também influenciam os valores de t_{ad} encontrados para diferentes combinações de VA e VD. Com base na Equação 2.9, tomando uma L_{efe} de 4,0 mm e VD igual a 40,0 e 57,0 cm/min, os t_{ad} resultantes são iguais a 7,4 e 4,3

minutos, respectivamente, resultando em uma diferença (Δt_{ad}) de 3,1 min. Quando a L_{efe} de 6,5 mm é tomada com VD de 16,0 e 22,0 cm/min, os t_{ad} resultantes são iguais a 11,5 e 8,5 min, respectivamente, resultando em um Δt_{ad} de 3,0 min.

Em resumo, a abordagem aplicada neste trabalho como ferramenta de seleção de parâmetros permitiu não só a visualização dos efeitos de cada parâmetro sobre as características operacionais desejadas para a mesma largura efetiva, mas também uma quantificação através de equações. Otimização numérica pode ser usada para gerar uma combinação ótima de parâmetros para uma largura de parede alvo usando a energia do arco, a ondulação lateral e o tempo ativo de deposição. Por exemplo, pode-se desejar encontrar uma combinação de VA e VD capaz de depositar uma parede com uma dada largura que forneça o menor t_{ad} , mas com OL menor que 0,7 mm. Finalmente, deve-se destacar que as interações aqui discutidas podem não ser as mesmas para envelopes de trabalho usando outros processos ou materiais, mas que funcionam bem entre os dois arames avaliados.

2. 5 Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo mostrar a avaliação se um envelope de trabalho previamente levantado para um material diferente e mais barato pode servir como base para a parametrização de outro material. Adicionalmente, buscou-se investigar se a abordagem de envelope de trabalho pode ser usada como ferramenta de seleção de parâmetros para uma largura de parede alvo em termos do acabamento da superfície, do tempo ativo de deposição e da energia do arco (que governa a microestrutura e a microdureza).

Ao fim, mostrou-se viável selecionar parâmetros para paredes finas depositadas por MADA com um número muito pequeno de experimentos quando utilizado um envelope de trabalho pré-existente para outro material. Desta forma, a transportabilidade de parâmetros envolvendo materiais de mesma classe pode ser possível. O uso da abordagem como ferramenta de parametrização para uma mesma largura de parede alvo também foi demonstrado. Nesse caso, valores menores de velocidade de alimentação (VA) e velocidade de deslocamento (VD) resultaram em melhor acabamento superficial. No entanto, VA e VD mais altos são vantajosos em termos de tempo de produção. Desde que a mesma largura de parede seja mantida, variações em VA e VD não afetam significativamente a microestrutura e a microdureza.

CAPÍTULO III

EFEITO COMBINADO DA TEMPERATURA INTERCAMADAS COM A VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO SOBRE CARACTERÍSTICAS DE PAREDES FINAS DEPOSITADAS POR MADA, USANDO DUAS ABORDAGENS DE RESFRIAMENTO

3.1 Introdução, Questões Científicas e Objetivos Específicos

A temperatura intercamada (TI) é uma das diversas variáveis dos processos de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). A importância do seu monitoramento vem do interesse em garantir a repetibilidade de deposição entre uma camada e outra, bem como evitar o acúmulo de calor e suas consequências deletérias. O monitoramento desse parâmetro também é essencial para entender possíveis transformações metalúrgicas que um dado material pode sofrer durante a deposição e, conseqüentemente, prever as propriedades mecânicas do componente depositado.

Além da TI, outras variáveis como a velocidade de alimentação do arame (VA) e a velocidade de deslocamento (VD) também afetam diversas características dos componentes. Tão importante quanto entender os efeitos de TI, VA e VD, é saber como utilizá-los de forma combinada para alcançar uma determinada característica geométrica de interesse. Hipoteticamente, é possível que a mesma largura de parede, por exemplo, seja alcançada com diferentes combinações de VA e VD (níveis de energia), desde que níveis adequados de TI sejam selecionados. Para facilitar a parametrização e atingir a largura alvo, a VA pode ser fixada (mesmo nível de corrente) à custa da mudança dos outros dois parâmetros de deposição. Caso seja necessário empregar baixos níveis de TI, o uso de alguma abordagem de resfriamento ativo passa a ser indispensável para diminuir o tempo de espera entre uma camada e outra (menor tempo de produção). Logo, também é relevante verificar o papel que a utilização ou não de uma abordagem de resfriamento pode exercer nesse caso. Diante disso, surge uma questão científica (QC) e sua respectiva hipótese (H):

- QC 3.1 – Caso seja possível atingir a mesma largura alvo com diferentes combinações de TI e VD para uma dada VA, usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo, qual será o efeito combinado dessa mudança de parâmetros de deposição sobre os

aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas depositadas por MADA?

- H 3.1 - Se a mesma largura de parede for alcançada com diferentes combinações de TI e VD para uma dada VA, usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo, todos os aspectos mencionados poderão ser avaliados.

Contudo, antes mesmo de verificar se a Hipótese 3.1 pode ser satisfeita, torna-se necessário descobrir qual faixa de temperatura intercamadas pode ser utilizada no planejamento experimental e como esse parâmetro pode afetar isoladamente aspectos operacionais e geométricos. Assim, duas novas questões científicas com suas hipóteses podem ser estabelecidas:

- QC 3.2 – Como definir uma faixa de temperatura intercamadas para ser utilizada no planejamento experimental?
- H 3.2 – Caso a temperatura intercamadas seja variada, mas sempre mantendo constantes os demais parâmetros de deposição, pode ser possível definir uma faixa cujos limites operacionais são capazes de evitar o colapso da poça de fusão e de outras não conformidades.
- QC 3.3 - Como a TI pode afetar isoladamente aspectos operacionais e geométricos?
- H 3.3 – Uma vez finalizados os testes para satisfazer a Hipótese 3.2, os aspectos mencionados poderão ser avaliados.

Considerando as questões científicas e hipóteses mencionadas, os seguintes objetivos específicos (OE) são propostos:

- OE 3.1 - Avaliar o efeito combinado da temperatura intercamadas com a velocidade de deslocamento para uma dada velocidade de alimentação sobre aspectos operacionais (aspecto superficial, tempo de produção e perfil de temperatura), geométricos e metalúrgicos (microestrutura e microdureza) em paredes finas de mesma largura depositadas por MADA, usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo;
- OE 3.2 – Definir uma faixa operacional de temperatura intercamadas.
- OE 3.3 – Avaliar o efeito isolado da temperatura intercamadas sobre aspectos operacionais (aspecto superficial, tempo de produção e perfil de temperatura) e geométricos em paredes finas depositadas por MADA.

3.2 Revisão Bibliográfica

3.2.1 Temperatura intercamada

Da Silva et al. (2019) mencionam que a terminologia “temperatura intercamada” (TI) ainda não é muito clara em manufatura aditiva. Inclusive, é muito comum a temperatura intercamada também ser referenciada como temperatura interpasses, como feito por vários autores (Chen et al. 2020, Derekar et al. 2019, Nemani et al. 2021, Shen et al. 2017, Geng et al. 2016, Montevecchi et al. 2018, Muller et al. 2021). Ainda de acordo com Da Silva et al. (2019), esta designação é utilizada devido à semelhança com o conceito adotado nos procedimentos de soldagem, que considera uma faixa de temperatura na qual a junta precisa estar antes da deposição de um novo passe. Contudo, uma vez que na manufatura aditiva camadas sobre camadas são depositadas até a construção final do componente, a terminologia “temperatura intercamadas” parece ser a mais apropriada.

Dependendo do nível de variação e do material avaliado, a TI pode influenciar a formação de defeitos ou não conformidades, a geometria, a microestrutura e as propriedades mecânicas dos componentes depositados por MADA. Ao avaliar o efeito do acúmulo de calor em uma parede de Ti6Al4V, Wu et al. (2017) verificaram uma maior oxidação na superfície da camada quando a TI foi aumentada de 150 para 300 °C, aproximadamente. Tratando da possibilidade de formação de não conformidades, Derekar et al. (2019) constataram uma maior quantidade de poros em uma parede de Al-Mg (AWS ER5356) depositada com uma TI de 50 °C do que com 100 °C. Segundo os autores, a condição de menor TI (microestrutura mais refinada) apresentou mais contornos de grão disponíveis, os quais serviram como sítios para o aprisionamento de hidrogênio e resultaram nas porosidades. Em termos do ponto de vista geométrico, Wang et al. (2021) mostraram que à medida que a TI é aumentada, a largura e a altura da camada tendem a aumentar e diminuir, respectivamente. Além disso, tanto Geng et al. (2016) (usando uma liga de alumínio) quanto Knezovic et al. (2020) (usando um aço inoxidável duplex) evidenciaram melhor acabamento superficial quando maiores níveis de TI foram utilizados, facilitando uma possível etapa de usinagem posterior à deposição. Contudo, esse comportamento pode não ser o mesmo para todos os materiais, já que Spencer et al. (1998) evidenciaram um efeito contrário quando um aço C-Mn foi usado como matéria-prima.

Ainda neste contexto, Ali et al. (2019) avaliaram a influência da temperatura intercamadas sobre a microestrutura de paredes depositadas com um aço ferramenta, sendo duas regiões (uma revenida e outra não-revenida) identificadas ao longo da direção de construção. De acordo com os autores, desde que a TI esteja acima da temperatura de início de formação de martensita, a microestrutura permanece no campo austenítico. Com isso, a formação de uma

microestrutura mais homogênea e compatível com as características da região não-revenida é obtida ao longo da direção de construção. Em outro trabalho, que desta vez envolve a deposição de um aço de alta resistência, Muller et al. (2021) constataram a formação de martensita quando um maior nível de TI foi utilizado, conseqüentemente, uma maior resistência à tração e menores resistências ao escoamento e ao impacto também foram observadas para essa condição. Há também quem não tenha evidenciado nenhum tipo de mudança microestrutural marcante quando os níveis de temperatura intercamadas foram alterados. Esses são os casos de Shen et al. (2017), que avaliaram níveis de TI entre 280 e 400 °C em paredes depositadas com um aluminato de ferro à base de Fe₃Al (Fe₃Al-based iron aluminide), e de Chen et al. (2020), que utilizaram níveis entre 100 e 400 °C em componentes de uma liga de bronze níquel-alumínio (Nickel-aluminum bronze (NAB) alloy).

Diante da amplitude de focos das pesquisas e da discordância de resultados verificada na literatura, torna-se nítida a relevância de entender melhor como a temperatura intercamada pode influenciar diferentes aspectos operacionais da MADA. Evidentemente, isso respalda a investigação atrelada ao objetivo específico (OE) 3.3 que foi definido anteriormente.

3.2.2 Gerenciamento térmico em MADA

O acúmulo de calor é um problema que tende a acontecer durante a deposição dos componentes por manufatura aditiva à medida que novas camadas são depositadas, sendo percebido por meio de uma elevação gradativa de temperatura na peça. Conforme já abordado pela literatura, o acúmulo de calor pode resultar em oxidação excessiva (Wu et al., 2017), irregularidades geométricas (Martina et al., 2012), microestrutura grosseira (Zhang et al., 2019), elevados níveis de distorção e tensões residuais (Ding et al., 2011; Xiong et al., 2018; Mukherjee et al., 2017).

Para evitar essas conseqüências indesejáveis, a temperatura intercamadas (TI) pode ser admitida como parâmetro de controle. Olhando sob uma perspectiva operacional, o resfriamento natural do componente é uma boa opção quando altos níveis de temperatura de intercamada precisam ser mantidos, já que os tempos de espera entre uma camada e outra normalmente não são tão significativos. No entanto, esse tempo pode variar de acordo com as condições que controlam a transferência de calor do componente, como é caso da energia do arco, das dimensões do componente (largura e altura), das propriedades físico-químicas do material depositado. Ainda que existam condições que favoreçam a troca de calor (baixa energia, parede larga e alta condutividade térmica do material), esse tempo de espera pode ser consideravelmente aumentado quando níveis de TI mais próximos da temperatura ambiente precisam ser alcançados.

Para reduzir o tempo de espera entre camadas e ao mesmo tempo mitigar o acúmulo de calor, abordagens que envolvem um gerenciamento térmico vêm sendo utilizadas para auxiliar no controle da TI durante a deposição. Nestas, o resfriamento pode ser classificado como passivo (promovido indiretamente a partir do substrato) ou ativo (promovido diretamente no componente), seguindo a designação utilizada por Da Silva et al. (2020). Embora abordagens com resfriamento passivo sejam mais acessíveis e amplamente reportadas pela literatura (Ali et al. 2019, Da Silva et al. 2020, Kozamernik et al. 2020), elas levam mais tempo para resfriar até uma dada TI do que as que utilizam de resfriamento ativo e sua eficiência tende a ser consideravelmente reduzida à medida que a distância em relação ao substrato aumenta.

Dentre as abordagens que envolvem um resfriamento ativo, existem aquelas que utilizam de um jato de ar para promover uma convecção forçada. Nesses casos, o jato pode ser soprado tanto pelo próprio bocal da tocha durante o tempo de parada entre uma camada e outra (Kozamernik et al. 2020), quanto por meio de um bocal adicional posicionado para incidir diretamente sobre o componente e garantir um resfriamento durante a deposição (Hackenhaar et al. 2020). Há casos também em que a convecção forçada foi promovida por meio de um jato de outro gás (Ma et al. 2021, Wu et al. 2018). Ma et al. (2021), por exemplo, avaliaram o resfriamento com três gases diferentes (ar atmosférico, CO₂ e N₂) e utilizaram uma proteção posicionada atrás da tocha (com a poça de fusão já solidificada) para promover um resfriamento durante a deposição. Segundo os autores, o CO₂ resultou num resfriamento mais eficiente. Para nível de ilustração, a Figura 3.1 mostra um esquema do dispositivo de resfriamento usado por Kozamernik et al. (2020) e fotografias das bancadas de Hackenhaar et al. (2020) e Ma et al. (2021).

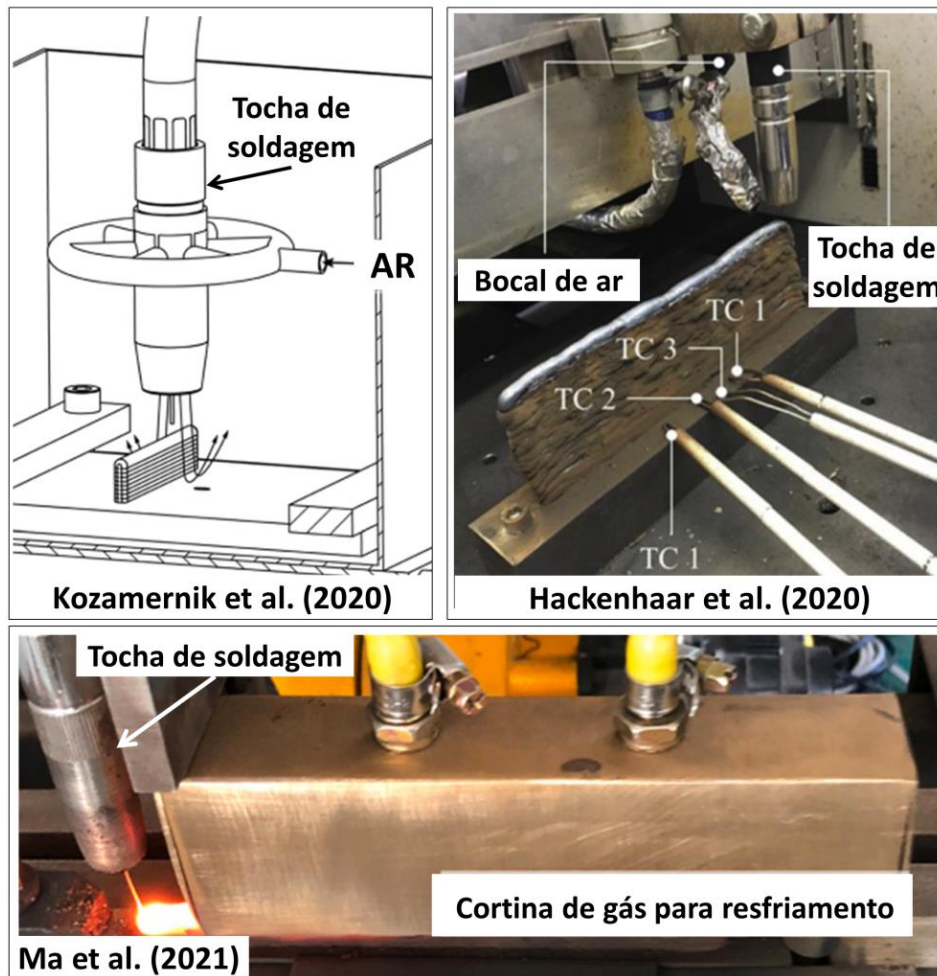


Figura 3.1 – Dispositivos utilizados pela literatura para promover o resfriamento ativo de paredes por meio de gases (Adaptado de Kozamernik et al., 2020; Hackenhaar et al., 2020; e Ma et al., 2021)

Trabalhos envolvendo Resfriamento Ativo por Quase Imersão (RAQI) em um banho de água também foram propostos para exercer o gerenciamento térmico em MADA (Da Silva et al. 2020, Da Silva et al. 2021, Da Silva et al. 2021b, Scotti et al. 2020, Teixeira et al. 2021). Nessa abordagem, a deposição é realizada dentro de uma cuba e água é adicionada gradativamente à medida que novas camadas são depositadas, mas sem levar a submersão completa do componente (Figura 3.2). Para garantir uma taxa de resfriamento o mais constante possível, a distância entre a lâmina d'água e o topo da peça (DLAP) sempre é mantida durante toda a deposição. Para isso, água é bombeada e circulada ininterruptamente dentro do tanque de deposição. À medida que a tocha é levantada, um sensor de nível com boia aciona uma válvula solenoide posicionada na saída do reservatório de água, permitindo que certo volume seja adicionado ao circuito e que o nível de água seja reestabelecido. Essa distância (ilustrada na

Figura 3.2(c)) é admitida como um parâmetro de controle vinculado ao RAQI. Deste modo, quanto menor é a DLAP, maior é a taxa de resfriamento, e vice-versa.

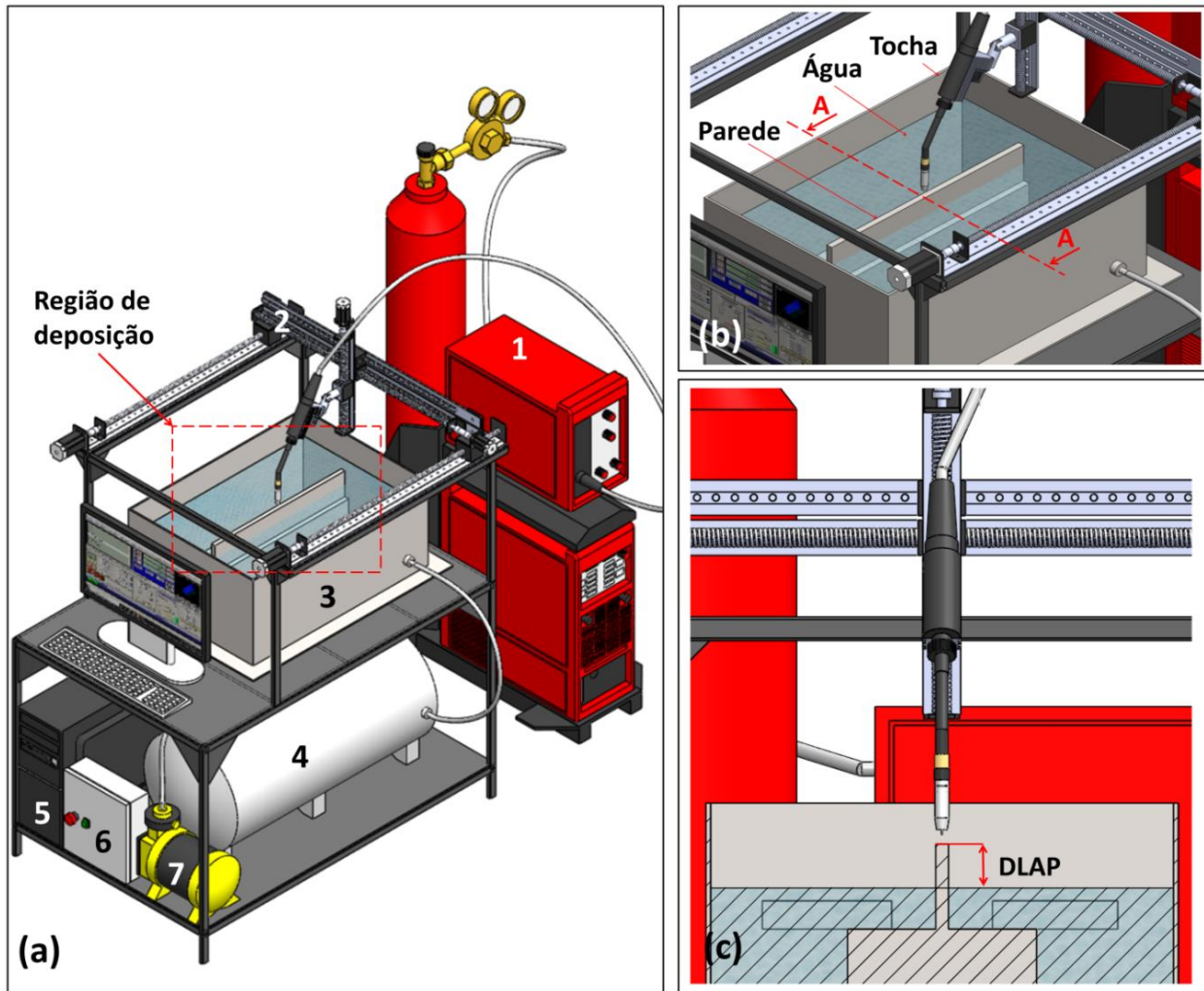


Figura 3.2 – Esquema da bancada utilizada para promover o Resfriamento ativo por quase imersão (RAQI): (a) Vista isométrica (onde: 1 – fonte de energia e cabeçote de alimentação de arame; 2 – mesa de coordenada CNC; 3 – cuba d'água; 4 – reservatório de água; 5 – processador CNC; 6 – drivers dos motores de passo; 7 – bomba d'água); (b) região de deposição em detalhes; (c) Vista correspondente a seção A-A (Adaptado de Teixeira et al., 2021)

3.3 Metodologia

Do ponto de vista metodológico, torna-se necessário definir previamente alguns conceitos para o entendimento deste capítulo. Em primeiro lugar, os experimentos estão restritos à confecção de paredes finas (um passe por camada e sem a utilização de tecimento) por MADA, usando um aço carbono de baixa liga e alta resistência. Por definição, a largura de uma parede

pode ser quantificada como largura efetiva ou largura externa. A largura efetiva representa aquela obtida caso fossem removidas as ondulações das paredes, as quais são intrínsecas à abordagem MADA, ou seja, ela é a largura nominal de projeto. A largura externa, por sua vez, é aquela medida sobre os picos das ondulações nas laterais da parede. Como a manutenção de uma dada largura efetiva atende a demanda de projeto, um valor foi arbitrariamente escolhido e usado como parâmetro de comparação entre diferentes combinações de temperatura de intercamada (TI) e velocidade de deslocamento (VD) para uma dada velocidade de alimentação do arame (VA). Neste trabalho a TI é definida como o valor de temperatura tomado como referência para o início da deposição de uma nova camada considerando um ponto de medição localizado sobre a peça. Conforme será detalhado posteriormente, esta temperatura será medida por um pirômetro infravermelho posicionado a uma mesma distância à frente da fonte de calor (o arco). Assim, somente após esta temperatura ser alcançada durante o tempo de espera entre uma camada e outra, a deposição de uma nova camada será iniciada.

Uma bateria de testes foi preliminarmente conduzida para definir a faixa de TI que poderia ser usada no planejamento experimental (objetivo específico 3.2), incluindo um limite superior relativamente alto capaz de evitar o colapso da poça de fusão. Para isso, duas combinações de VA e VD foram selecionadas a partir do envelope de trabalho levantado no Capítulo II e publicado em Teixeira et al. (2022). As duas combinações escolhidas (VA de 5 m/min e VD de 21,7 cm/min, e VA de 3 m/min e VD de 15,0 cm/min) correspondem a dois extremos operacionais do envelope. Cinco níveis diferentes de temperatura intercamada (100, 200, 300, 400 e 500 °C) foram propostos para cada combinação de VA e VD, totalizando 10 paredes (Tabela 3.1). Uma altura mínima de 40 mm foi alcançada em cada parede. Apenas resfriamento natural foi utilizado nesta etapa do trabalho. O efeito da TI foi avaliado sobre o aspecto superficial, o tempo de produção, o perfil de temperatura e a geometria das paredes.

Tabela 3.1 – Matriz experimental dos testes preliminares

Condições	VA (m/min)	VD (cm/min)	TI (°C)
1	3	15,0	100
2	3	15,0	200
3	3	15,0	300
4	3	15,0	400
5	3	15,0	500
6	5	21,7	100
7	5	21,7	200
8	5	21,7	300
9	5	21,7	400
10	5	21,7	500

Como será apresentado, a ampla faixa avaliada de temperatura intercamadas mostrou-se funcional. Uma vez definida a faixa de TI, uma nova bateria de experimentos (testes principais) foi planejada e executada, visando encontrar diferentes combinações de TI e VD capazes de depositar três paredes de mesma largura efetiva (L_{efe}), considerando uma dada VA. Uma L_{efe} alvo de 5,7 mm foi arbitrariamente escolhida. As características geométricas dos testes preliminares foram utilizadas como ponto de partida para encontrar essas combinações de parâmetros. Novamente, uma altura mínima de 40 mm foi alcançada em cada parede, utilizando-se da estratégia de deposição bidirecional. As três primeiras paredes deste planejamento experimental foram depositadas sem a utilização de uma abordagem de resfriamento forçado entre uma camada e outra, ou seja, apenas o resfriamento natural (RN) aconteceu até se atingir a TI desejada. Em seguida, para estender o alcance dos resultados e reduzir o tempo de espera entre camadas, três novas paredes foram depositadas utilizando o mesmo planejamento experimental dos testes com RN, mas desta vez utilizando a abordagem de resfriamento ativo por quase imersão (RAQI). Todas as paredes depositadas com RAQI utilizaram uma distância entre a lâmina d'água e o topo da peça (DLAP) igual a 20 mm. Considerando a bancada de trabalho em uso, a água não experimenta variações significativas de temperatura durante a deposição de paredes finas devido o grande volume da cuba e também a circulação contínua d'água, por isso nenhum controle de temperatura d'água foi realizado.

O arame AWS ER90S-B3 (1,2 mm diâmetro) foi utilizado como metal de adição. A mistura 96%Ar + 4%CO₂ foi utilizada como gás de proteção, usando uma vazão de 15 L/min. A versão Cold Metal Transfer (CMT) (linha sinérgica CMT 963) do processo GMA foi utilizada como processo de deposição. A distância bico de contato-peça (DBCP) de 16 mm e um ângulo de ataque da tocha de 90° (tocha perpendicular) foram mantidos durante todas as deposições.

Barras chatas de aço carbono (150 mm x 50 mm x 7,9 mm) foram utilizadas como substrato. Similarmente ao feito para o estudo descrito no Capítulo II, para manter o fluxo de calor o mais constante possível desde as primeiras camadas, os substratos foram posicionados em um dispositivo de fixação com o lado mais estreito voltado para cima, servindo como uma pré-parede. Um condicionador de sinais (14 bits), operando com uma taxa de aquisição de 5 kHz durante 8 s, foi empregado para monitorar os sinais elétricos (corrente e tensão) e a velocidade de alimentação do arame. Os valores médios e eficazes (root mean square - RMS) de corrente e de tensão, juntamente com os valores médios de velocidade alimentação e de energia do arco por unidade de comprimento foram determinados para cada camada das paredes depositadas. A energia do arco por unidade de comprimento foi determinada pela média das potências instantâneas (média do produto ponto a ponto entre a corrente e a tensão) dividida pela VD da condição considerada.

3.3.1 Estratégia de medição da temperatura intercamadas

Um pirômetro infravermelho (Mikron modelo MI-PE140) foi empregado para monitorar o perfil térmico sobre as camadas depositadas e identificar o momento em que as temperaturas intercamadas alvo são alcançadas. Este pirômetro apresenta uma faixa de medição entre 30 e 1000 °C, uma resolução de 0,1 °C e taxa de aquisição de 10 Hz. O mesmo procedimento aplicado por Jorge et al. (2022) foi conduzido com objetivo de ajustar a emissividade do pirômetro. Neste procedimento, uma camada foi depositada e um termopar (tipo K) foi fixado sobre uma de suas extremidades. O pirômetro foi então posicionado sobre o mesmo ponto de medição e uma nova camada foi depositada. Para manter a integridade do termopar, a deposição da nova camada sempre se encerrou antes de alcançar o ponto de medição. Essa sequência foi conduzida repetidamente considerando diferentes regulagens de emissividade até que a maior convergência possível fosse atingida entre os dois instrumentos de medição. Um valor de emissividade regulado em 0,99 foi empregado durante todas as deposições. Nessas circunstâncias, a emissividade regulada é considerada apenas como um parâmetro de correção e não com o seu valor real. Maiores detalhes a respeito desse procedimento podem ser consultados em Jorge et al. (2022).

Para monitorar a temperatura intercamadas, o pirômetro foi fixado ao eixo de deslocamento da tocha e posicionado de um dos seus lados a uma distância de 30 mm entre o ponto de medição e a linha de centro do arame (Figura 3.3). Uma vez que uma estratégia de deposição bidirecional foi utilizada, somente quando a tocha se deslocava da direita para a esquerda (tomando por base a Figura 3.3) o feixe do pirômetro estava à frente da poça de fusão. No sentido oposto, o monitoramento foi feito atrás da poça. Assim, quando a deposição de uma camada se encerrava, o pirômetro podia estar monitorando a temperatura na superfície da última camada depositada ou em um ponto fora da parede. Para a primeira situação, o perfil de temperatura foi monitorado e um cronômetro foi acionado para registrar o tempo necessário para atingir a temperatura intercamadas alvo de cada parede. Uma vez alcançada a TI, a deposição de uma nova camada era iniciada. Para o segundo caso, ou seja, quando o pirômetro estava monitorando a temperatura fora da parede, o tempo de espera registrado para a camada anterior foi replicado.



Figura 3.3 – Posicionamento do ponto de medição de temperatura: à frente da poça, quando o sentido de deposição é da direita para esquerda; por trás da poça, quando o sentido de deposição é da esquerda para direita

Para garantir o entendimento dos perfis de temperatura que serão discutidos posteriormente, a Figura 3.4 mostra um esquema de como ocorre o deslocamento do pirômetro durante cada ciclo de movimento da tocha (Figura 3.4(a)) e o seu efeito sobre os perfis de temperatura (Figura 3.4(b)). Conforme pode ser visualizado, cada quadro da Figura 3.4(a) equivale a uma linha destacada na Figura 3.4(b). O quadro 1 da Figura 3.4(a) representa o momento que a tocha terminou sua trajetória da direita para a esquerda - a tocha está posicionada sobre uma das extremidades da parede e o pirômetro está com o ponto de medição fora da mesma, justificando a baixa temperatura nesse instante (linha 1 da Figura 3.4(b)). Com o reinício da deposição (quadro 2 da Figura 3.4(a)), a tocha se desloca para direita e o pirômetro começa a registrar a temperatura atrás da poça de fusão (linha 2) até que a deposição da camada seja concluída (linha 3). No início (tempo que antecede ao marcado pela linha 2), há um crescimento abrupto da temperatura devido ao acionamento do arco que aquece o material da extremidade e ao calor acumulado advindo da deposição da camada anterior. Conforme indica a Figura 3.4(b), é justamente no intervalo entre as linhas 2 e 3 que as temperaturas mais elevadas são registradas. Com a camada finalizada (quadro 3 da Figura 3.4(a)), o arco é extinto e a parede volta a resfriar (entre as linhas 3 e 4). Quando uma TI alvo é alcançada (indicado pela linha 4 da Figura 3.4(b)), uma nova camada começa a ser depositada (quadro 4 da Figura 2(a)), mas dessa vez o pirômetro já inicia a medição à frente da poça de fusão. Durante esse percurso da tocha o perfil de temperatura progressivamente se reduz (da linha 4 à linha 5 da Figura 3.4(b)) devido à presença do gradiente térmico. Em certo instante, o pirômetro passa novamente a medir a temperatura fora da parede (quadro 5 da Figura 3.4(a)) e, conseqüentemente, a

temperatura volta a cair abruptamente. O ciclo é recomeçado no tempo indicado pela linha 6 (quadro 6 da Figura 3.4(a)), que se equivale ao da linha 1.

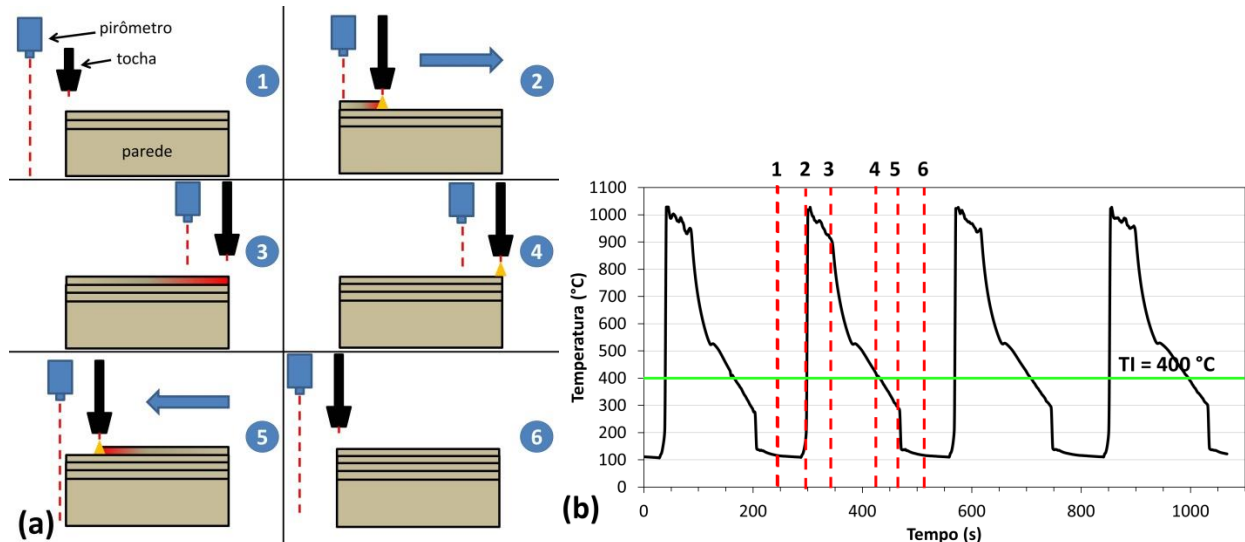


Figura 3.4 – (a) Esquema dos ciclos de movimento da tocha e do ponto de medição de temperatura em relação a poça de fusão; (b) perfil de temperatura resultante dos ciclos de movimento da tocha (considerando $T_I = 400\text{ °C}$), onde as linhas tracejadas vermelhas correspondem aos instantes esquematizados em (a)

3.3.2 Determinação das características geométricas das paredes

De forma similar ao descrito na seção 2.3.3 do Capítulo II, todas as paredes depositadas foram digitalizadas através de um scanner 3D (HandySCAN 3D). Apenas a região central das paredes foi avaliada (Figura 3.5(a)), visando evitar a influência de não conformidades decorrentes dos pontos de início e fim das deposições. Porém, um aprimoramento no procedimento de medição relatado no Capítulo II foi implementado. No novo procedimento em questão, as malhas das duas faces de cada parede foram separadas e exportadas como nuvens de pontos para arquivos do tipo texto (.txt), utilizando um software dedicado (VXModel). Em seguida, as nuvens de pontos correspondentes a cada face das paredes foram lidas por um código (desenvolvido em linguagem Python por Scotti (2021)), que realiza a divisão das malhas em seções com um espaçamento de 0,5 mm ao longo do comprimento da parede. Como o arquivo de leitura é uma nuvem de pontos, é necessário estabelecer um intervalo no eixo ao longo do comprimento da parede (Y) onde os pontos convergirão para um único perfil. Se o valor deste parâmetro for muito grande, muitos pontos irão convergir para o mesmo perfil, dificultando a quantificação da geometria (perfil saturado). Por outro lado, se o valor deste parâmetro for muito pequeno, o perfil gerado pode apresentar "buracos". Assim, selecionou-se o menor valor

capaz de gerar perfis sem “buracos” (0,5 mm). Uma vez que o comprimento útil avaliado foi de 90 mm, 180 seções foram obtidas no total. Para nível de exemplificação, a Figura 3.5(b) mostra um gráfico contendo dez perfis obtidos pelo programa para um lado da parede, onde são considerados como referência um eixo perpendicular a lateral da parede (X), um eixo ao longo do comprimento da parede (Y) e um eixo que coincide com a direção de construção (Z).

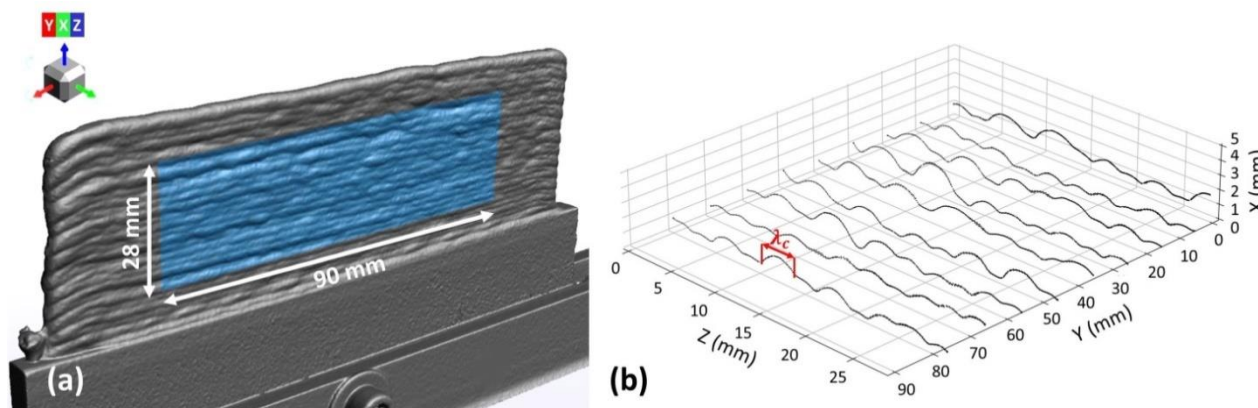


Figura 3.5 – (a) Região considerada durante a medição das características geométricas; (b) exemplo dos perfis transversais obtidos pelo código desenvolvido por Scotti (2021)

Para tentar minimizar a influência de possíveis *outliers* sobre as características geométricas avaliadas, cada seção foi dividida em pequenos comprimentos amostrais (λ_c) tomados ao longo do eixo correspondente a direção de construção (Z), conforme destacado na Figura 3.5(b). O valor de λ_c é igual à média da altura da camada determinada para cada parede. Devido à existência desse parâmetro, valores máximos e mínimos de X, bem como a diferença entre estes, foram computados para cada comprimento amostral avaliado em uma seção. O código desenvolvido fornece um arquivo que contém uma média desses valores por seção para cada lado das paredes. Para determinar a largura externa (L_{ext}), as médias dos valores máximos de X de ambos os lados da parede são somados, considerando uma mesma seção, obviamente. Para quantificar a largura efetiva (L_{efe}), somam-se as médias dos valores mínimos. A ondulação lateral (OL) da parede, por sua vez, é determinada pela soma das diferenças entre os valores máximos e mínimos de X de ambos os lados da parede (também considerando a mesma seção) dividida por dois. Diante disso, os resultados de medição das características geométricas foram determinados pela média e pelo desvio padrão, considerando os valores de L_{ext} , L_{efe} e OL obtidos a partir de cada uma das 180 seções avaliadas. Um paquímetro analógico (resolução de 0,05 mm) foi utilizado para medir a altura total da parede em cinco posições diferentes. Esses valores foram divididos pelo número de camadas depositadas e, em seguida, um valor médio com seu respectivo desvio padrão foi quantificado para se obter o resultado de medição de altura da camada (AC).

3.3.3 Caracterização metalúrgica

Uma amostra transversal foi removida no centro do eixo Y de cada uma das três paredes com resfriamento natural e com RAQI. As amostras foram submetidas à preparação metalográfica e depois atacadas com Nital 2% por 20 s. Micrografias e medições de microdureza foram tomadas no topo, no centro e na base das paredes, descartando 10 mm em relação ao substrato para evitar uma região que poderia ser afetada pela diluição. Uma carga de 100 g foi exercida durante 15 s em todos os ensaios de microdureza. Para cada região, as indentações foram dispostas em uma linha vertical com um espaçamento de 0,25 mm.

3.4 Resultados e Discussões

3.4.1 Testes preliminares

A Figura 3.6 mostra o aspecto superficial de cada uma das paredes depositadas seguindo a matriz experimental (Tabela 3.1 – experimentos apenas com resfriamento natural) para avaliar o valor máximo de temperatura intercamadas (TI) que pode ser usado sem que a poça de fusão venha a colapsar. Como verificado, nenhuma das temperaturas intercamadas utilizadas levou ao colapso da poça de fusão, independentemente da combinação de velocidade de alimentação (VA) e velocidade de deslocamento (VD) considerada. Vale destacar que se optou por não aumentar ainda mais o nível de TI porque a última camada ainda estaria parcialmente incandescente (condição atingida quando a temperatura no ponto de medição estava acima de 550 °C, aproximadamente). Isto implicaria em um grande erro de medição associado à emissividade da superfície.

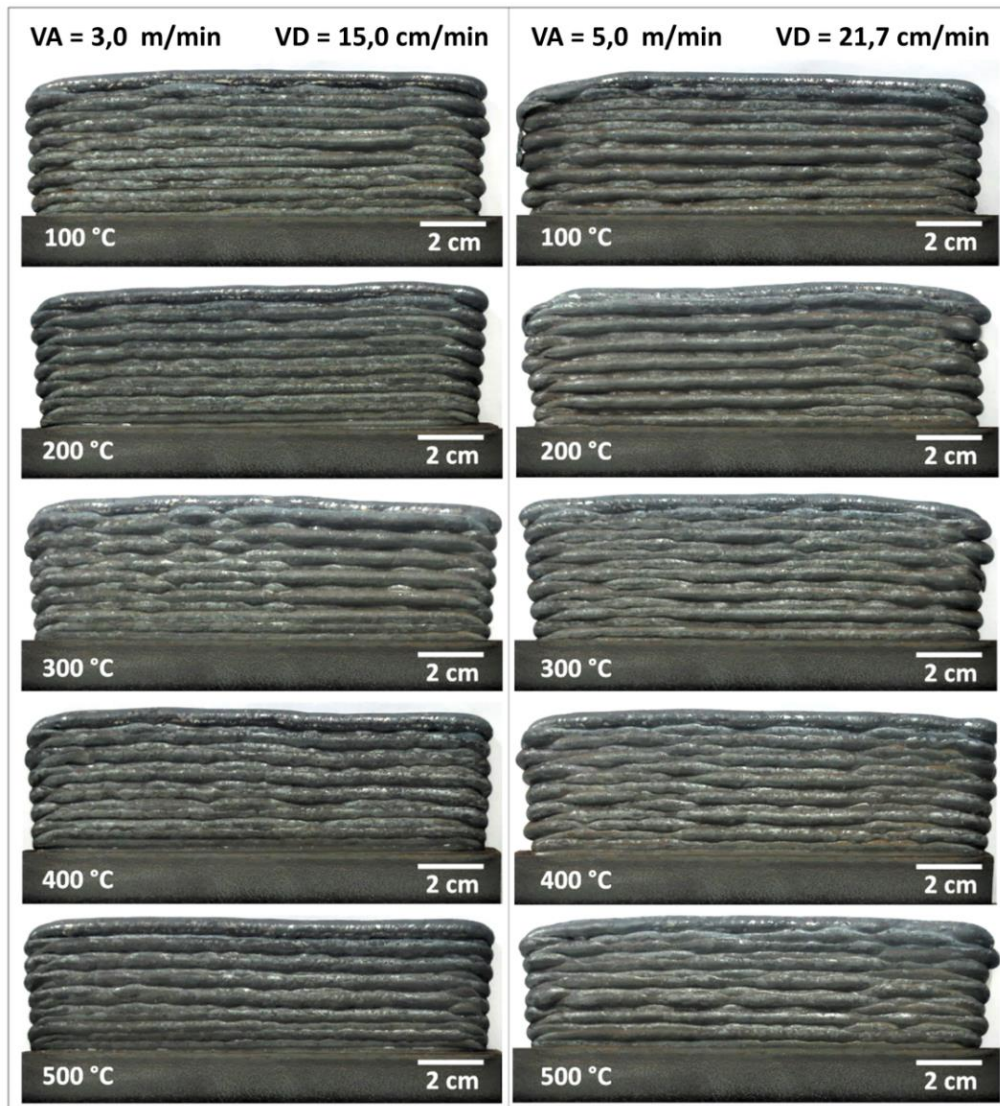


Figura 3.6 – Aspecto superficial dos testes preliminares considerando a matriz experimental da Tabela 3.1

Conforme mencionado na seção 3.3, o padrão de deposição das camadas foi bidirecional. Por isso, o feixe do pirômetro sempre estava atrás do arco durante a deposição de cada camada ímpar (sentido da esquerda para a direita), enquanto o feixe se posicionava à frente do arco nas camadas pares (sentido oposto). Para o monitoramento da temperatura, oito camadas sequenciais de cada parede foram consideradas, começando a partir da 5ª camada depositada. Assim, esta corresponde a 1ª camada amostrada nos perfis de temperatura e, conseqüentemente, apenas a 2ª, 4ª, 6ª e 8ª camadas amostradas são úteis, já que o feixe do pirômetro estava à frente do arco. A Figura 3.7 mostra os perfis de temperatura dos quatro ciclos de movimento da tocha (oito camadas), considerando os diferentes níveis de TI para uma VA de 3,0 m/min e VD de 15,0 cm/min. A Figura 3.8, por sua vez, apresenta os perfis de temperatura dos diferentes níveis de TI com uma VA de 5,0 m/min e VD 21,7 cm/min. Os tempos registrados

para a deposição de oito camadas (contando apenas quando o pirômetro estava medindo sobre a camada) foram somados aos tempos de espera para o resfriamento das mesmas e são aqui chamados de td_8 . Para uma dada VD (que define o tempo de deposição), quanto menor a TI, maior o valor de td_8 . Esse comportamento é decorrente dos maiores tempos de resfriamento entre camadas que passam a ser necessários. Quando confrontadas as duas combinações de VA e VD adotadas para a mesma TI (Figura 3.7 x Figura 3.8), a condição com VA de 5,0 m/min e VD de 21,7 cm/min (Figura 6) apresentou menor td_8 devido ao maior nível de velocidade de deslocamento utilizado (tempo de deposição mais rápido).

Para melhor avaliação dos perfis de temperatura nos intervalos de tempo em que o pirômetro inicia a medição à frente da poça (ao atingir TI) e antes que o feixe do pirômetro saísse da camada (intervalos delimitados pelas linhas verticais vermelhas nas Figuras 3.7 e 3.8), o valor de temperatura registrado antes da saída do ponto de medição é posicionado imediatamente ao lado das linhas verticais vermelhas. Eles são apresentados para cada nível de TI, exceto para 100 °C, que praticamente não apresentou variação. Dentro desses intervalos, verifica-se um desvio de temperatura em relação à TI alvo que tende a aumentar com o avanço da deposição da camada. Isso acontece devido à presença do gradiente térmico que é naturalmente estabelecido em toda a parede. Caso houvesse algum tipo de sistema promovendo o aquecimento das adjacências, essa variação de temperatura poderia ser significativamente reduzida mesmo com níveis mais elevados de TI e perfis mais regulares tenderiam a ser obtidos, como os encontrados para 100 °C, por exemplo. Além disso, percebe-se nas Figuras 3.7 e 3.8 que esses desvios em relação a TI alvo diminuem à medida que mais camadas são depositadas. Apesar do controle de TI, esse comportamento provavelmente advém do acúmulo de calor que ocorre com a deposição de cada nova camada. Eventualmente, um mesmo desvio de temperatura pode ser mantido entre camadas, caracterizando um regime permanente.

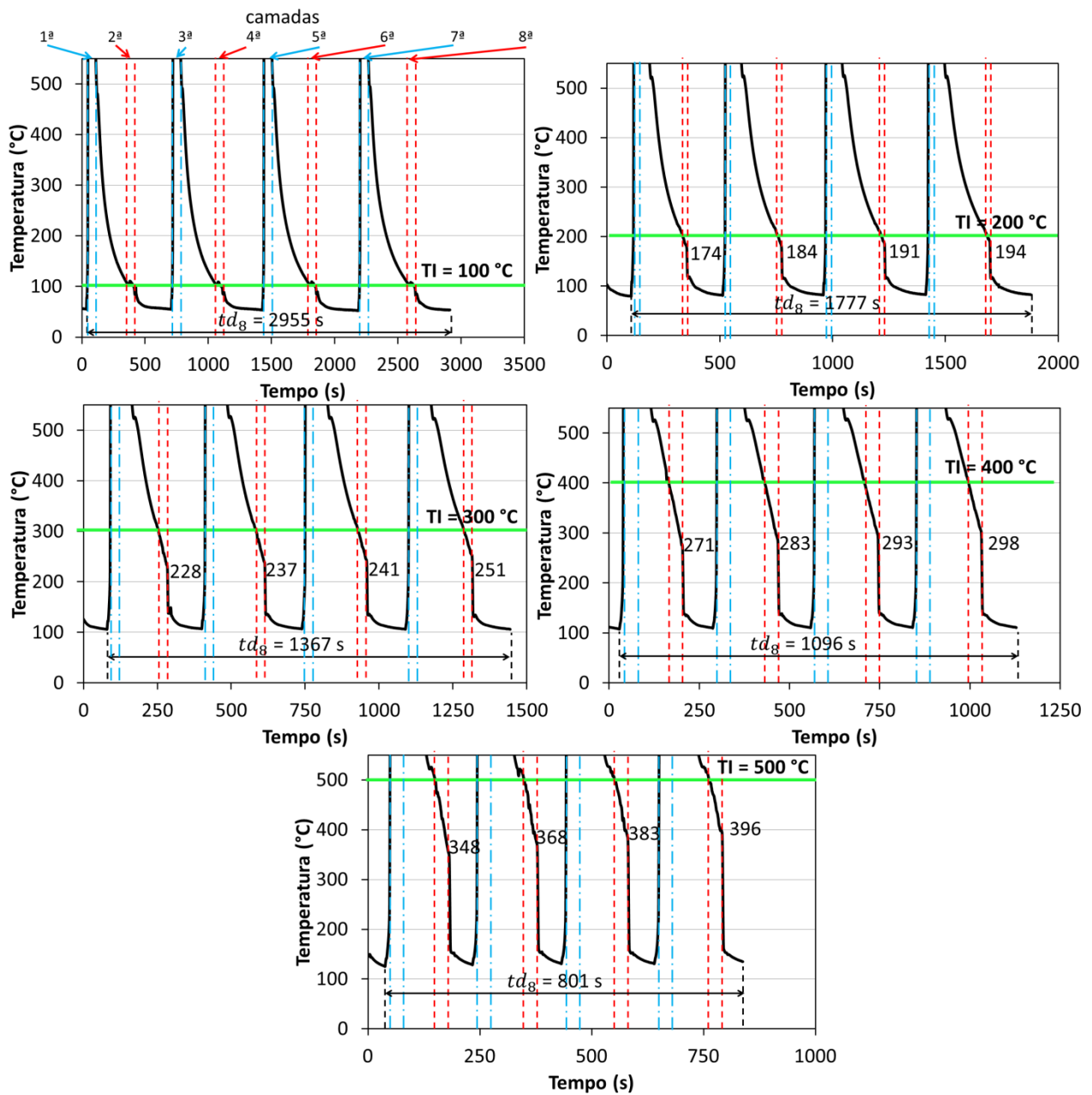


Figura 3.7 – Perfis de temperatura para diferentes temperaturas intercamadas (TI), usando VA de 3,0 m/min e VD de 15,0 cm/min, onde td_8 representa a soma dos tempos de deposição e de espera após a deposição das oito camadas - as linhas horizontais verdes indicam o nível de referência de TI para iniciar uma nova camada, as linhas verticais vermelhas delimitam os intervalos de tempo em que o pirômetro mede a temperatura à frente da poça de fusão (entre as linhas 4 e 5 da Figura 3.4(b)) e as linhas verticais azuis delimitam os intervalos de tempo em que o pirômetro mede a temperatura atrás da poça de fusão (entre as linhas 2 e 3 da Figura 3.4(b))

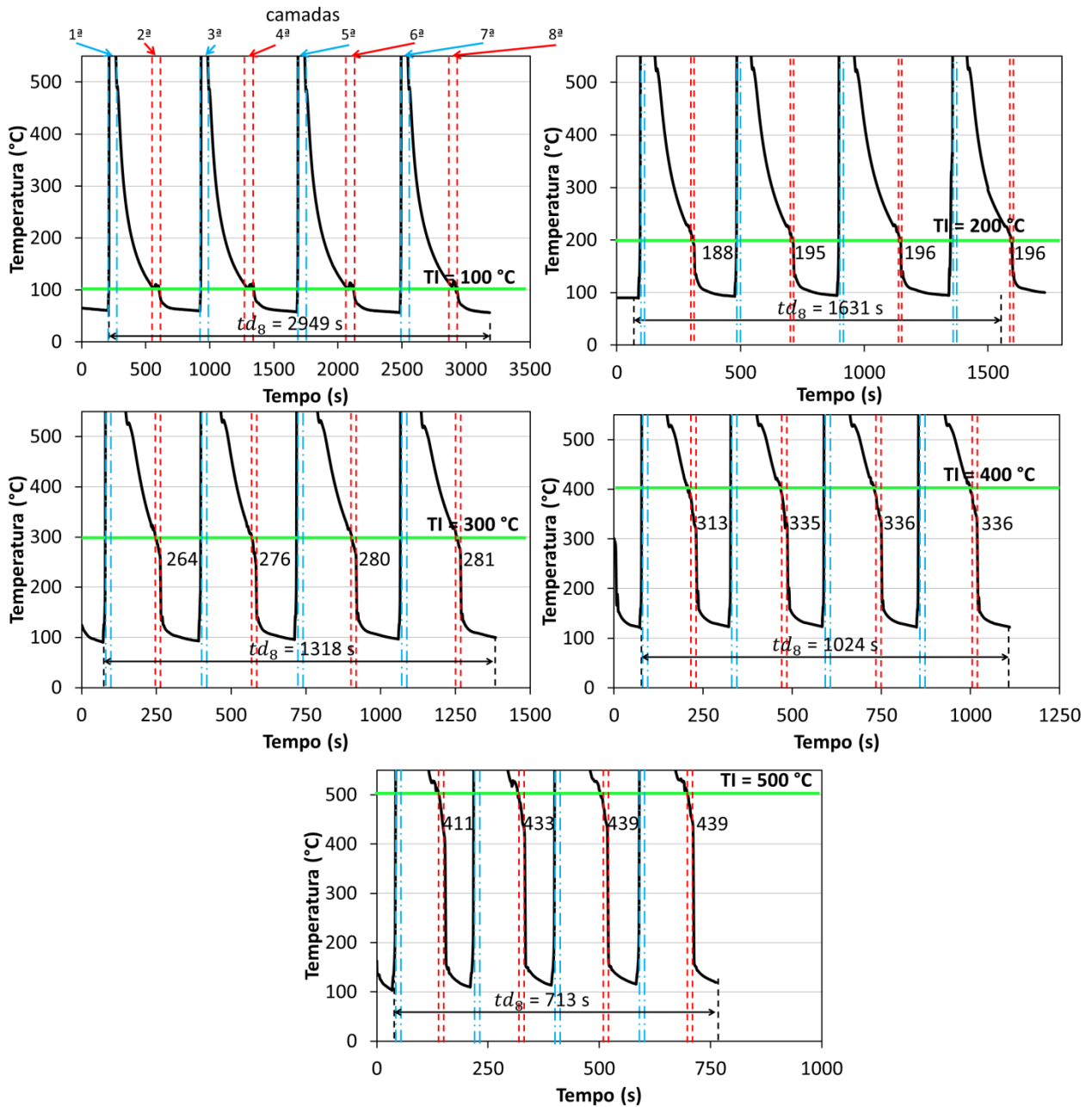


Figura 3.8 – Perfis de temperatura para diferentes temperaturas intercamadas (TI), usando VA de 5,0 m/min e VD de 21,7 cm/min, onde td_8 representa a soma dos tempos de deposição e de espera após a deposição das oito camadas - as linhas horizontais verdes indicam o nível de referência de TI para iniciar uma nova camada, as linhas verticais vermelhas delimitam os intervalos de tempo em que o pirômetro mede a temperatura à frente da poça de fusão (entre as linhas 4 e 5 da Figura 3.4(b)) e as linhas verticais azuis delimitam os intervalos de tempo em que o pirômetro mede a temperatura atrás da poça de fusão (entre as linhas 2 e 3 da Figura 3.4(b))

A Tabela 3.2 mostra os mesmos dados sob a perspectiva da variabilidade da temperatura ao longo do comprimento da camada ($\Delta T/\Delta L$), quantificada em $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$. Este parâmetro representa a diferença de temperatura entre o último instante antes do ponto de medição sair da parede e a TI alvo, dividida pelo comprimento da camada. Um ΔL de 120 mm foi considerado para os cálculos, visto que os 30 mm entre o pirômetro e a tocha foram subtraídos. Como verificado, $\Delta T/\Delta L$ tende a se tornar significativamente mais alto à medida que a TI aumenta devido um maior ΔT que passa a ser estabelecido entre a última camada e as adjacências da parede (dispositivo de fixação, plataforma de construção, substrato), as quais apresentam baixos níveis de temperatura. Além disso, o $\Delta T/\Delta L$ levemente diminui com o aumento da altura de construção (Z), ou seja, quando mais camadas são depositadas (reflexo do acúmulo de calor). A combinação de VA e VD também afeta o $\Delta T/\Delta L$. Neste caso, VA e VD mais lentos levaram a maior variabilidade de temperatura ao longo do comprimento da camada. Em princípio, poderia se imaginar que tal comportamento seria resultante de uma diferença entre os níveis de energia do arco entre as combinações de VA e VD. Contudo, estes valores ficaram relativamente próximos entre si, com a combinação de VA de 3 m/min e VD de 15,0 cm/min apresentando um valor de 766 ± 41 J/mm, enquanto a combinação de VA de 5 m/min e VD de 21,7 cm/min apresentou 733 ± 26 J/mm. Outra possibilidade de justificativa poderia estar em torno da geometria da camada. Caso a condição com VA de 5 m/min e VD de 21,7 cm/min apresentasse uma menor largura de camada, a troca de calor por condução (mecanismo de transferência de calor predominante nesse caso) seria menos intensa e poderia resultar no comportamento observado. Conforme será visto posteriormente com os resultados das características geométricas, isso só foi observado para a condição com TI de 500°C , não justificando o comportamento para os demais níveis temperatura. Desta forma, a hipótese que resta é a de que o maior nível de VD empregado para a combinação de VA de 5 m/min e VD de 21,7 cm/min resultou em um menor tempo para o resfriamento da camada, levando a menor variação de temperatura ao longo da mesma. Em resumo, esses resultados mostraram como a TI, o número de camadas e a combinação de VA com VD afetam o gradiente térmico estabelecido ao longo de uma camada durante a deposição. O efeito deste gradiente sobre as dimensões da camada (largura e altura), por sua vez, ainda não foi bem estudado, mas os resultados de Jorge et al. (2022) indicam que não devem ocorrer grandes mudanças, uma vez que a temperatura sob a poça (mais influente sobre a geometria da camada) é praticamente constante.

Tabela 3.2 – Variabilidade da temperatura ao longo do comprimento da camada ($\Delta T/\Delta L$), quantificada em $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, das paredes construídas de acordo com a matriz experimental da Tabela 3.1

TI ($^{\circ}\text{C}$)	VA = 3 m/min; VD = 15,0 cm/min				VA = 5 m/min; VD = 21,7 cm/min			
	Camadas				Camadas			
	2 ^a	4 ^a	6 ^a	8 ^a	2 ^a	4 ^a	6 ^a	8 ^a
100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
300	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
400	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,6	0,6
500	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,6	0,6	0,6

A Figura 3.9 apresenta as características geométricas dos ensaios preliminares. Em geral, para a mesma combinação VA e VD, o aumento de TI implica em maiores larguras externa (L_{ext}) e efetiva (L_{efe}), e menores alturas de camada (AC). Em termos dos processos de soldagem, já é conhecido que o aumento da temperatura interpasses tende a formar um cordão mais largo e de menor reforço em função do aumento da molhabilidade, que ocorre graças à elevação de temperatura nas adjacências do cordão. Para o caso da manufatura aditiva de paredes finas em si, é até possível que a molhabilidade também apresente algum grau de contribuição. No entanto, essa contribuição fenomenológica deve ser menor, já que a largura da camada anterior se torna um fator limitante. Assim, a viscosidade da poça de fusão pode ser apontada como mais um fator para explicar o efeito observado. Nesse caso, o aumento da TI deve diminuir a taxa de resfriamento, fazendo com que a viscosidade fique menor por mais tempo. Isso torna a poça menos resistente ao movimento induzido pela pressão do arco, resultando em uma camada de geometria mais larga e mais baixa (menor altura da camada).

Examinando a Figura 3.9(c) e considerando a mesma combinação de VA e VD, percebe-se que a ondulação lateral (OL) é uma característica geométrica menos sensível a mudança de TI. Quando avaliada a mesma TI e contrastando as duas combinações de VA e VD, é possível verificar que os resultados de L_{ext} , OL e AC tenderam a ser, em geral, um pouco mais elevados para a combinação de VA de 5,0 m/min e VD de 21,7 cm/min. Ao mesmo tempo, os resultados de L_{efe} ficaram relativamente próximos entre si (com exceção dos resultados obtidos para a TI de 500 $^{\circ}\text{C}$). A diferença na quantidade de material depositada por unidade de comprimento pode ser responsável por tal efeito. A combinação de VA de 3,0 m/min e VD de 15,0 cm/min depositou 0,17 kg/m em média, enquanto a combinação de VA de 5,0 m/min e VD de 21,7 cm/min depositou 0,20 kg/m em média.

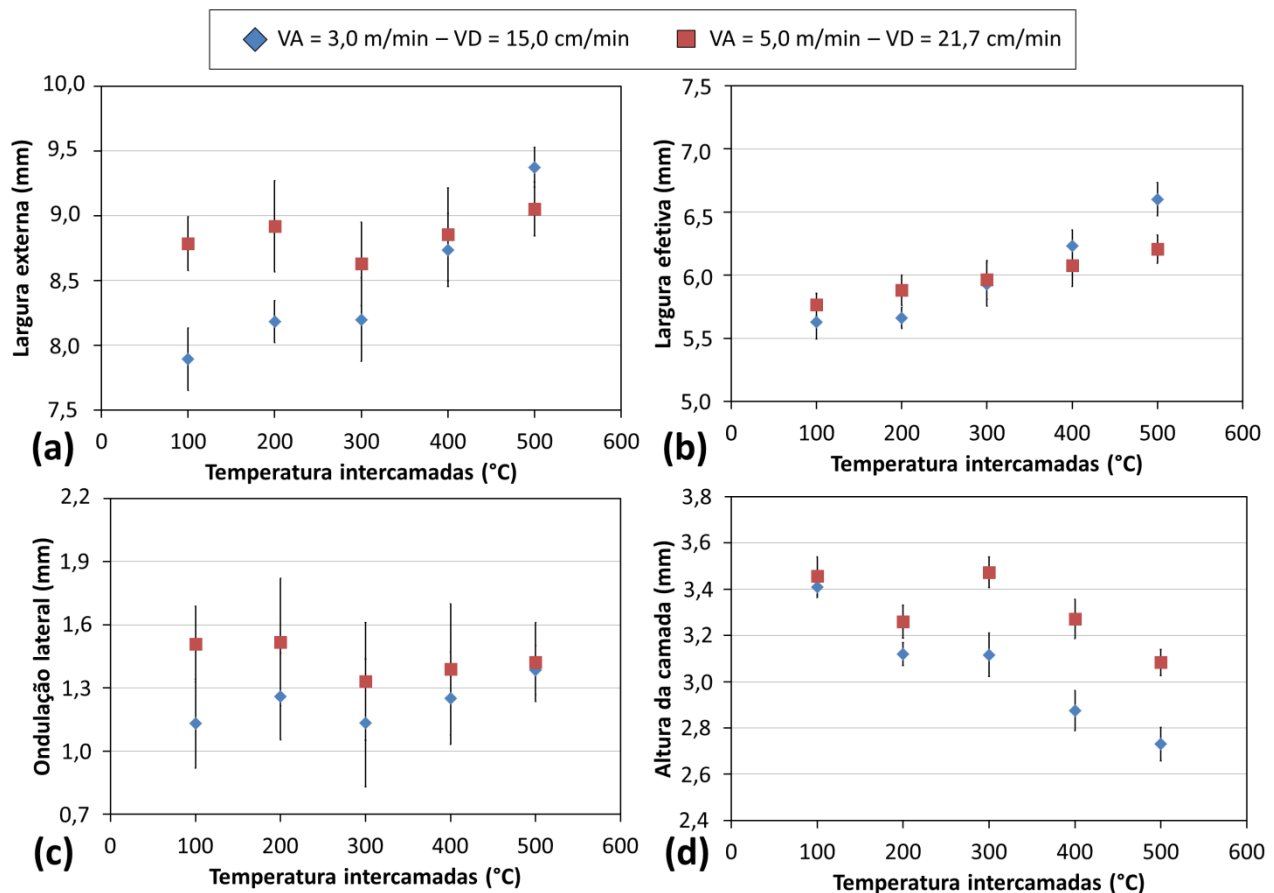


Figura 3.9 – Características geométricas dos testes preliminares (de acordo com a Tabela 3.1): (a) largura externa; (b) largura efetiva; (c) ondulação lateral; e (d) altura da camada (onde: VA = velocidade de alimentação e VD = velocidade de deslocamento)

3.4.2 Testes principais

Os testes principais visaram avaliar o efeito combinado da temperatura intercamadas (TI) com a velocidade de deslocamento (VD) para uma dada velocidade de alimentação (VA) sobre aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos em paredes finas com a mesma largura efetiva (L_{efe}) (escolhida arbitrariamente como 5,7 mm). Uma VA de 5,0 m/min (o maior nível empregado nos testes preliminares) e três níveis de TI (100, 300 e 500 °C) foram selecionados para o planejamento experimental. Para abranger mais o alcance dos resultados, além de resfriamento natural (RN), resfriamento ativo por quase imersão (RAQI) foi empregado. Conforme visto nos testes preliminares, a TI influencia a L_{efe} (Figura 3.9(b)). Para compensar esse efeito e assim manter a mesma L_{efe} , valores mais rápidos de VD precisaram ser utilizados à medida que a TI foi aumentada. Como não existiam dados que permitiam uma seleção imediata, alguns experimentos foram previamente conduzidos para encontrar os níveis de VD (usando

apenas RN). A Tabela 3.3 apresenta o planejamento experimental para os testes principais, incluindo os níveis de VD utilizados para a deposição das três paredes com RN e de outras três usando RAQI.

Tabela 3.3 – Matriz experimental dos testes principais (largura efetiva alvo de 5,7 mm e velocidade de alimentação de 5 m/min)

Abordagem de resfriamento	TI (°C)	VD (cm/min)
Resfriamento Natural (RN)	100	21,7
Resfriamento Natural (RN)	300	28,4
Resfriamento Natural (RN)	500	33,3
Resfriamento ativo por quase imersão (RAQI)	100	21,7
Resfriamento ativo por quase imersão (RAQI)	300	28,4
Resfriamento ativo por quase imersão (RAQI)	500	33,3

A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros ajustados e monitorados a partir das condições experimentais da Tabela 3.3. Percebe-se que as diferentes combinações de TI com VD para a mesma média de velocidade de alimentação (VA_m) não afetaram nem a corrente (I_m ou I_{RMS}) nem a tensão (U_m ou U_{RMS}), confirmando a robustez dos testes. Naturalmente, a média da energia do arco (E_m) diminui com valores mais rápidos de VD.

Tabela 3.4 – Matriz experimental dos testes principais (largura efetiva alvo de 5,7 mm e velocidade de alimentação de 5 m/min)

Resfriamento	TI (°C)	VD (cm/min)	VA_m (m/min)	I_m (A)	I_{RMS} (A)	U_m (V)	U_{RMS} (V)	E_m (J/mm)
RN	100	21,7	5,1±0,1	162,1±0,6	181,9±0,5	13,2±0,1	16,5±0,1	702,2±6,9
RN	300	28,4	5,1±0,3	160,9±1,1	181,2±0,9	13,4±0,2	16,8±0,2	558,3±8,9
RN	500	33,3	5,1±0,2	162,7±0,4	182,4±0,4	13,4±0,2	16,8±0,2	473,6±6,8
RAQI	100	21,7	5,1±0,2	161,7±0,4	181,7±0,4	13,3±0,1	16,6±0,1	711,9±8,3
RAQI	300	28,4	5,2±0,2	161,4±0,8	181,3±0,7	13,4±0,3	16,8±0,2	549,7±9,3
RAQI	500	33,3	5,2±0,2	161,5±0,8	181,5±0,8	13,4±0,2	16,9±0,2	457,6±5,3

A Figura 3.10 mostra o aspecto superficial obtido para cada parede. Para a mesma abordagem de resfriamento, observa-se que a menor TI (consequentemente, VD mais lento para atingir a mesma L_{efe}) levou a um pior aspecto superficial, o que concorda com os resultados de Geng et al. (2016) e Knezovic et al. (2020). Por um lado, baixos níveis de TI tenderiam a promover poças de fusão mais rígidas, uma vez que maiores taxas de resfriamento devem garantir menor volume e maior viscosidade à poça. Portanto, maior resistência ao movimento induzido pela pressão de arco. Por outro lado, a maior quantidade de material depositada por unidade de comprimento, que é atingida com menores níveis de VD regulados para a mesma VA, aumenta o volume da poça de fusão e tende a resultar numa poça mais instável (mais

susceptível a não uniformidades para a mesma pressão de arco). Diante do comportamento observado, o efeito promovido pela maior quantidade de material depositada parece ser predominante. Tomando agora as mesmas combinações de parâmetros, nenhuma mudança significativa é observada no aspecto superficial quando comparadas as duas abordagens de resfriamento, corroborando o efeito prejudicial de uma maior quantidade de material depositado por unidade de comprimento em relação ao resfriamento mais rápido.

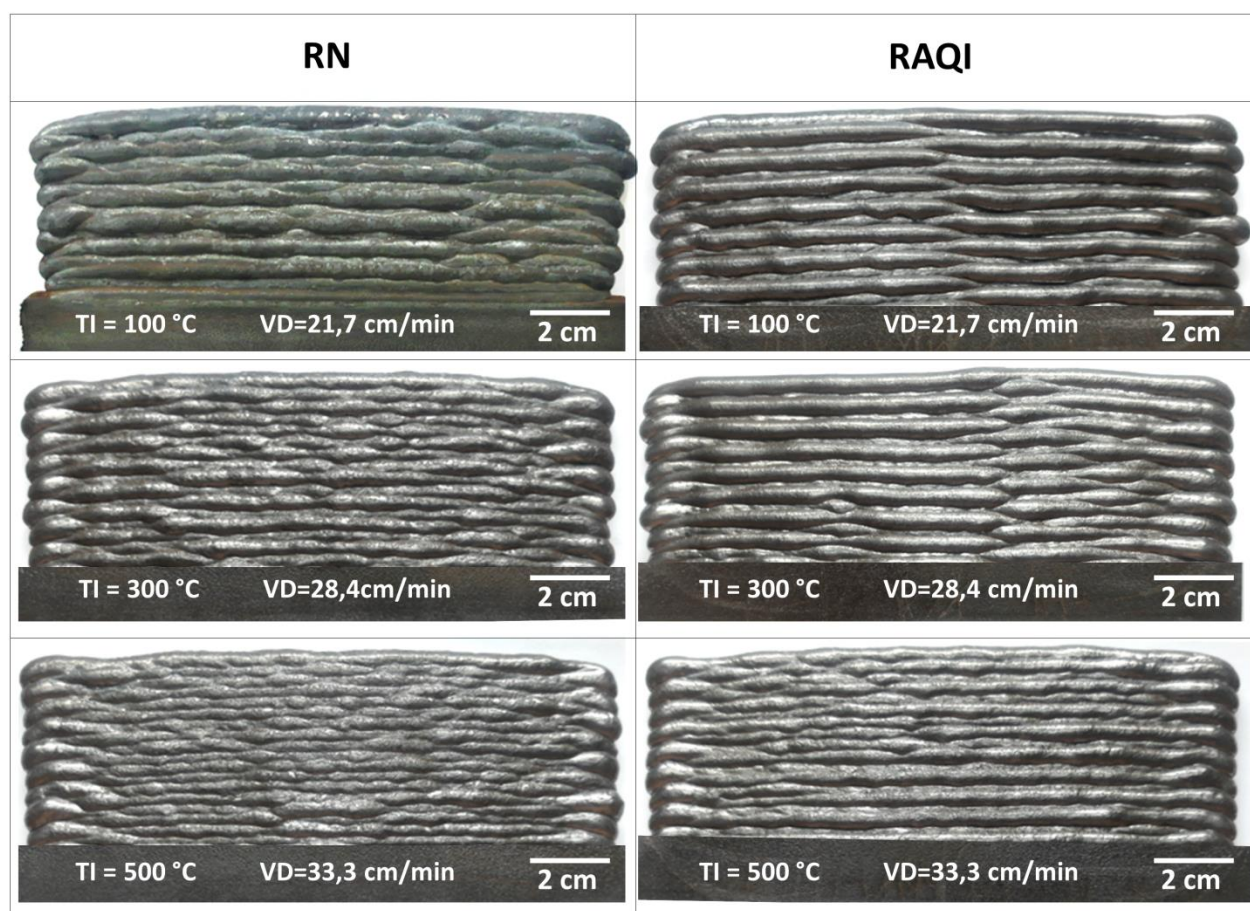


Figura 3.10 – Aspecto superficial dos testes principais (matriz experimental da Tabela 3.3)

De forma análoga às Figuras 3.7 e 3.8, a Figura 3.11 apresenta os perfis de temperatura correspondentes a quatro ciclos de movimento da tocha (oito camadas), mas agora obtidos para os testes principais. Sob a mesma abordagem de resfriamento (RN ou RAQI), menores combinações de TI com VD levaram a tempos de produção mais longos (td_8), uma vez que ambos implicam em um maior tempo de resfriamento entre uma camada e outra. Porém, ao comparar as duas abordagens de resfriamento para a mesma combinação de TI com VD, as condições com RAQI apresentaram um td_8 consideravelmente menor, devido à maior taxa de resfriamento exercida pela troca de calor entre a parede e a água.

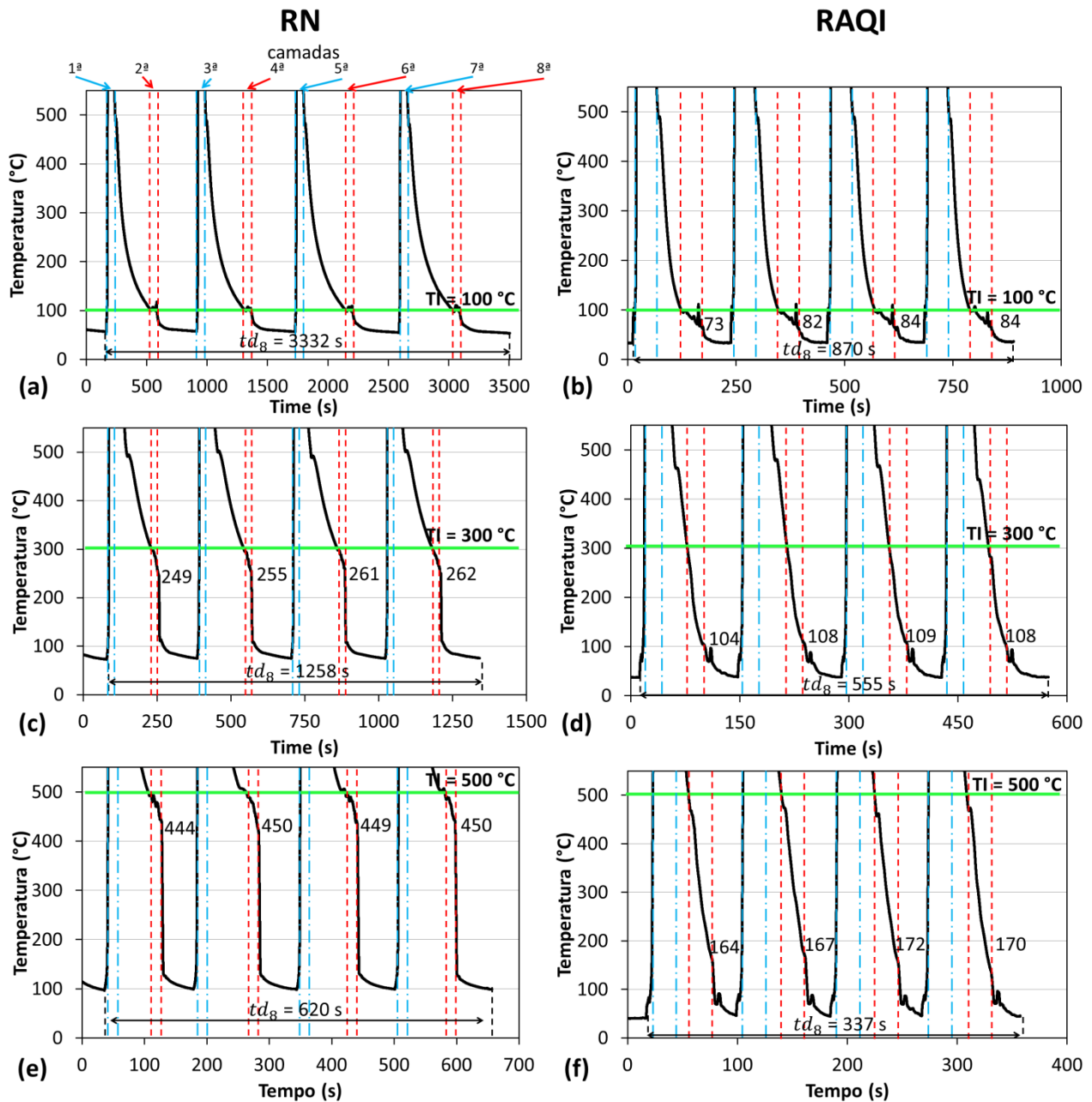


Figura 3.11 – Perfis de temperatura para diferentes temperaturas intercamadas (TI) da matriz experimental da Tabela 3.3: (a) RN, TI=100 °C e VD=21,7 cm/min; (b) RAQI, TI=100 °C e VD=21,7 cm/min; (c) RN, TI=300 °C e VD=28,4 cm/min; (d) RAQI, TI=300 °C e VD=28,4 cm/min; (e) RN, TI=500 °C e VD=33,3 cm/min; (f) RAQI, TI=500 °C e VD=33,3 cm/min. Onde td_8 representa a soma dos tempos de deposição e de espera após a deposição das oito camadas - as linhas horizontais verdes indicam o nível de referência de TI para iniciar uma nova camada, as linhas verticais vermelhas delimitam os intervalos de tempo em que o pirômetro mede a temperatura à frente da poça de fusão (entre as linhas 4 e 5 da Figura 3.4(b)) e as linhas verticais azuis delimitam os intervalos de tempo em que o pirômetro mede a temperatura atrás da poça de fusão (entre as linhas 2 e 3 da Figura 3.4(b))

Ainda pela análise da Figura 3.11, verifica-se que a tendência discutida durante os testes preliminares foi mantida, ou seja, há um desvio de temperatura em relação a TI alvo, desvio este que tende a aumentar com o avanço da deposição da camada, o qual se torna um pouco menor à medida que mais camadas são depositadas (devido ao acúmulo de calor). Em função do maior gradiente térmico estabelecido na parede, estes desvios foram maiores quando o RAQI foi utilizado (sendo possível registrá-lo para a TI de 100 °C, inclusive). Na condição com TI de 300 °C e VD de 28,4 cm/min (Figura 3.11(d)), por exemplo, uma variação de temperatura de quase 200 °C foi alcançada ao longo da camada, enquanto para a TI de 500 °C e VD de 33,3 cm/min (Figura 3.11(f)) um desvio superior a 300 °C foi registrado. Esses resultados reforçam a recomendação de monitorar o gradiente térmico ao longo da camada. Os mesmos comportamentos também podem ser evidenciados sob a perspectiva da variabilidade da temperatura ao longo do comprimento da camada ($\Delta T/\Delta L$), conforme indica a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Matriz experimental dos testes principais (largura efetiva alvo de 5,7 mm e velocidade de alimentação de 5 m/min)

Abordagem de Resfriamento	TI (°C)	VD (cm/min)	$\Delta T/\Delta L$ (°C/mm)			
			Camadas			
			2 ^a	4 ^a	6 ^a	8 ^a
RN	100	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0
RN	300	28,4	0,5	0,4	0,4	0,3
RN	500	33,3	0,5	0,5	0,5	0,5
RAQI	100	21,7	0,2	0,2	0,1	0,1
RAQI	300	28,4	1,8	1,7	1,7	1,7
RAQI	500	33,3	3,1	3,0	3,0	3,0

Por rigor experimental, para verificar se a quantidade de material depositado por unidade de comprimento foi realmente mantida para a mesma combinação de parâmetros, quatro seções transversais foram avaliadas a partir de cada malha 3D das paredes (Figura 3.12). Como visto, as áreas das seções transversais foram praticamente iguais entre as duas abordagens para a mesma combinação de parâmetros. Isso significa que a mesma quantidade de material por unidade de comprimento foi depositada. Assim, uma vez que a quantidade de material por unidade de comprimento é a mesma para cada combinação de TI e VD, espera-se que a altura da camada (AC) aumente à medida que larguras se reduzam (e vice-versa), ou não se altere caso as larguras sejam as mesmas.

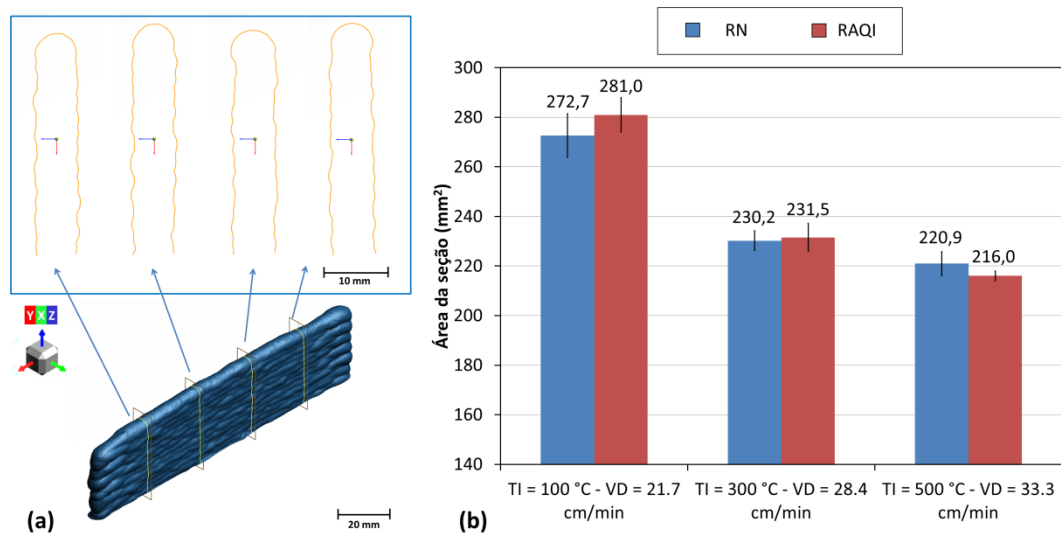


Figura 3.12 – (a) Esquema de parede em 3D e dos perfis das áreas das seções transversais; e (b) áreas de seção transversal dos testes principais (onde: RN = resfriamento natural; RAQI = resfriamento ativo por quase imersão; TI = temperatura intercamadas; VD = velocidade de deslocamento)

A Figura 3.13 apresenta as características geométricas das paredes construídas durante os testes principais. A partir da Figura 3.13(a) é possível verificar que as larguras efetivas (L_{efe}) foram iguais entre si e corresponderam ao valor alvo para as diferentes combinações de TI e VD, usando a abordagem de resfriamento natural (RN). Os resultados de L_{efe} para as condições com resfriamento ativo quase imersão (RAQI), por sua vez, diminuíram à medida que aumentou a combinação de TI e VD (Figuras 3.13(a)). Vale lembrar que as considerações tomadas para realizar a seleção dos níveis de VD a serem admitidos para cada nível de TI pré-estabelecido (visando atingir uma L_{efe} de 5,7 mm) foram tomadas com base em paredes depositadas com a abordagem RN. Isso justifica a concordância desses resultados para essa abordagem de resfriamento e atestam novamente a consistência do trabalho experimental. Além disso, desde que seja admitida a mesma abordagem de resfriamento, as demais características geométricas (L_{ext} , OL e AC) tenderam a diminuir à medida que foram aumentados os valores de TI e VD, em resposta à variação da quantidade de material depositada por unidade de comprimento.

Quando avaliada a mesma combinação de parâmetros (TI e VD) e contrastadas às duas abordagens de resfriamento, percebe-se que os resultados de largura efetiva (L_{efe}), largura externa (L_{ext}), ondulação lateral (OL) e altura da camada (AC) foram iguais ou muito próximos entre si. Ressalta-se que as diferenças de larguras entre abordagens RN e RAQI estão (0,3 mm em média), típicas de incertezas das medições. Quanto às inaccurácias instrumentais, a AC foi determinada usando um paquímetro de resolução de 0,05 mm, enquanto as L_{efe} e L_{ext} foram obtidas usando um scanner 3D (ver comentários sobre a resolução na seção 3.3.2). Quanto a

erros experimentais, destaca-se a inexistência de replicagem das paredes. Diante destas observações, incertezas distintas entre os instrumentos de medição podem justificar os alguns resultados de medição levemente diferentes para as larguras entre as duas abordagens de resfriamento considerando a mesma combinação de parâmetros.

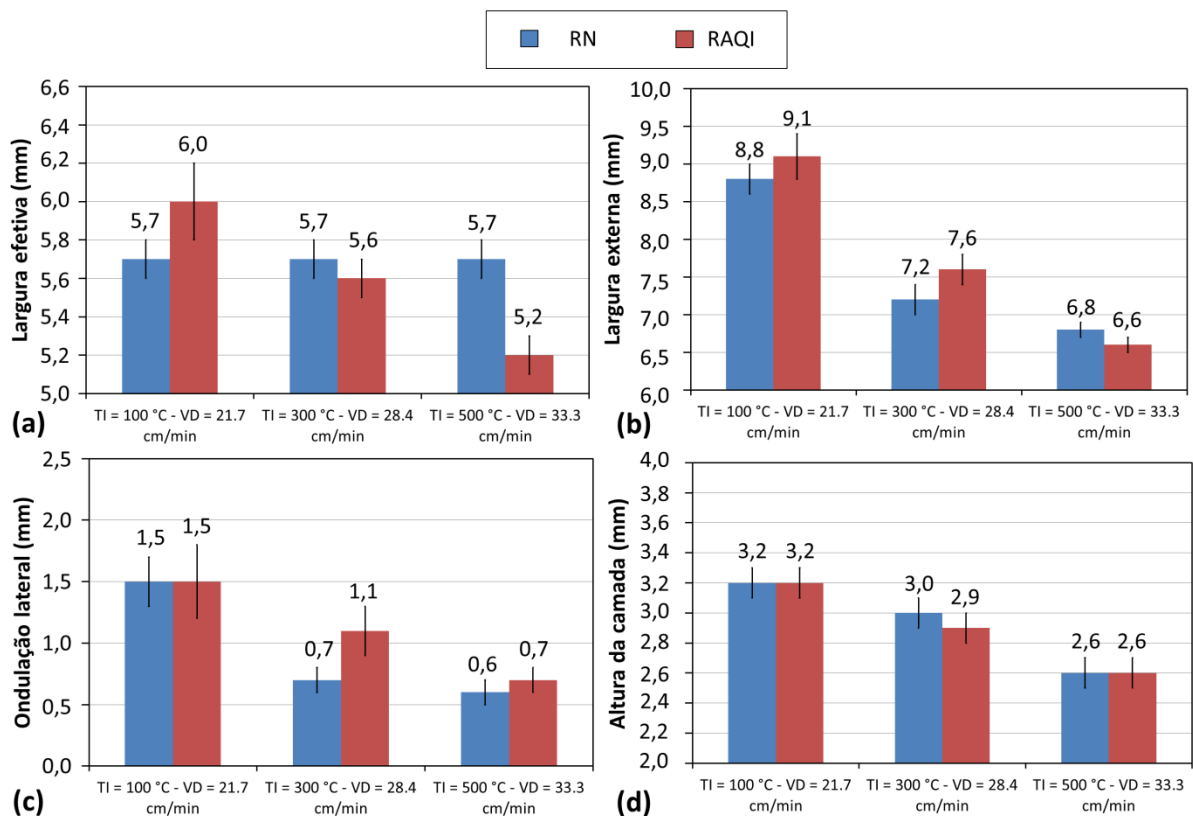


Figura 3.13 – Características geométricas dos testes principais conforme a Tabela 3.3: (a) largura efetiva; (b) largura externa; (c) ondulação lateral; (d) e altura da camada (onde: RN = resfriamento natural; RAQI = resfriamento ativo por quase imersão; TI = temperatura intercadas; VD = velocidade de deslocamento)

Conforme ilustrado nas Figuras 3.14 e 3.15, não foram observadas diferenças microestruturais marcantes entre os testes principais. Uma microestrutura composta principalmente por martensita e bainita é evidenciada, independentemente da posição ao longo da direção de construção (Z). Deve-se lembrar que maiores valores de TI foram combinados a níveis de VD mais rápidos (consequentemente, a energia do arco por unidade de comprimento diminuiu) para manter a mesma L_{efe} alvo. Por um lado, isso significa que as taxas de resfriamento devem ficar mais lentas pelo uso de uma TI mais alta. Por outro lado, as taxas de resfriamento tornam-se mais rápidas devido a maior VD (menor energia do arco por unidade de comprimento). Considerando o mecanismo de transferência de calor predominante (condução) em um plano, a área da seção transversal é outro fator que também governa o fluxo de calor da

parede (considerando que a área da seção longitudinal é a mesma). A Figura 3.13 mostra que as seções transversais podem ser consideradas estatisticamente iguais (desvios padrão se interceptam) entre as duas abordagens de resfriamento para a mesma combinação de parâmetros, mas que o aumento combinado de TI com VD levou a menores seções transversais, o que resulta em um menor fluxo de calor por condução (taxas de resfriamento mais lentas). Apesar da existência de todos esses fatores que governam a taxa de resfriamento, ainda é possível que as taxas de resfriamento das combinações de parâmetros avaliadas sejam mantidas numa mesma região (em relação às curvas de transformação) do diagrama TRC (transformação em resfriamento contínuo), levando a semelhança microestrutural observada. Nesse caso, o mesmo nível de dureza não seria uma surpresa.

A Figura 3.16 mostra os perfis de microdureza realizados nas regiões de interesse das paredes (topo, centro e base) para cada condição experimental da Tabela 3.3. Os valores médios bem como os respectivos desvios padrão para cada região das paredes são apresentados sobre o eixo superior de cada gráfico. Em geral, microdurezas menos dispersas (menores desvios padrão) são observadas nos topos das paredes. Essa região (última e penúltima camadas) apresenta em sua grande maioria uma estrutura de solidificação primária, já que não sofre reaquecimentos significativos, sendo formada predominantemente por martensita não revenida e bainita. Em função dos múltiplos ciclos térmicos experimentados, o centro e a base das paredes representam melhor um componente depositado por MADA. Na maioria dos casos, a microdureza nas regiões do centro e da base variou de 250 a 400 HV, seguindo um perfil em V que sugere a formação de bandas de microconstituintes mais duros e mais macios. Os valores mais altos podem corresponder a regiões reaquecidas em que houve crescimento de grão e, portanto, aumento da temperabilidade, resultando em uma maior formação de martensita do que de bainita. Os valores mais baixos podem vir de regiões que experimentaram temperaturas dentro do campo de revenimento, resultando na formação de martensita revenida. Quando a abordagem de resfriamento natural (RN) foi utilizada, percebe-se que a dispersão de microdureza ficou mais estreita e com menor incidência de regiões tão duras (de ordem superior 400 HV) à medida que aumentou a combinação de TI com VD. Este comportamento é um indício de que, quando o RN foi utilizado, o balanço entre os fatores que governam o fluxo de calor (TI, energia do arco, área da seção) resultou em menores taxas de resfriamento à medida que foram aumentados os valores de TI e VD (prevalecendo o aumento da TI). Logo, tempos mais longos dentro da faixa de temperatura para revenimento devem ter sido alcançados, fazendo com que os resultados de microdureza fossem menos dispersos e concentrados em valores mais baixos. No entanto, esse comportamento não ocorreu para as condições com RAQI. Nesse caso, os elevados níveis de taxa de resfriamento impostos por esta abordagem devem ter superado o efeito do aumento da TI sobre as taxas de resfriamento.

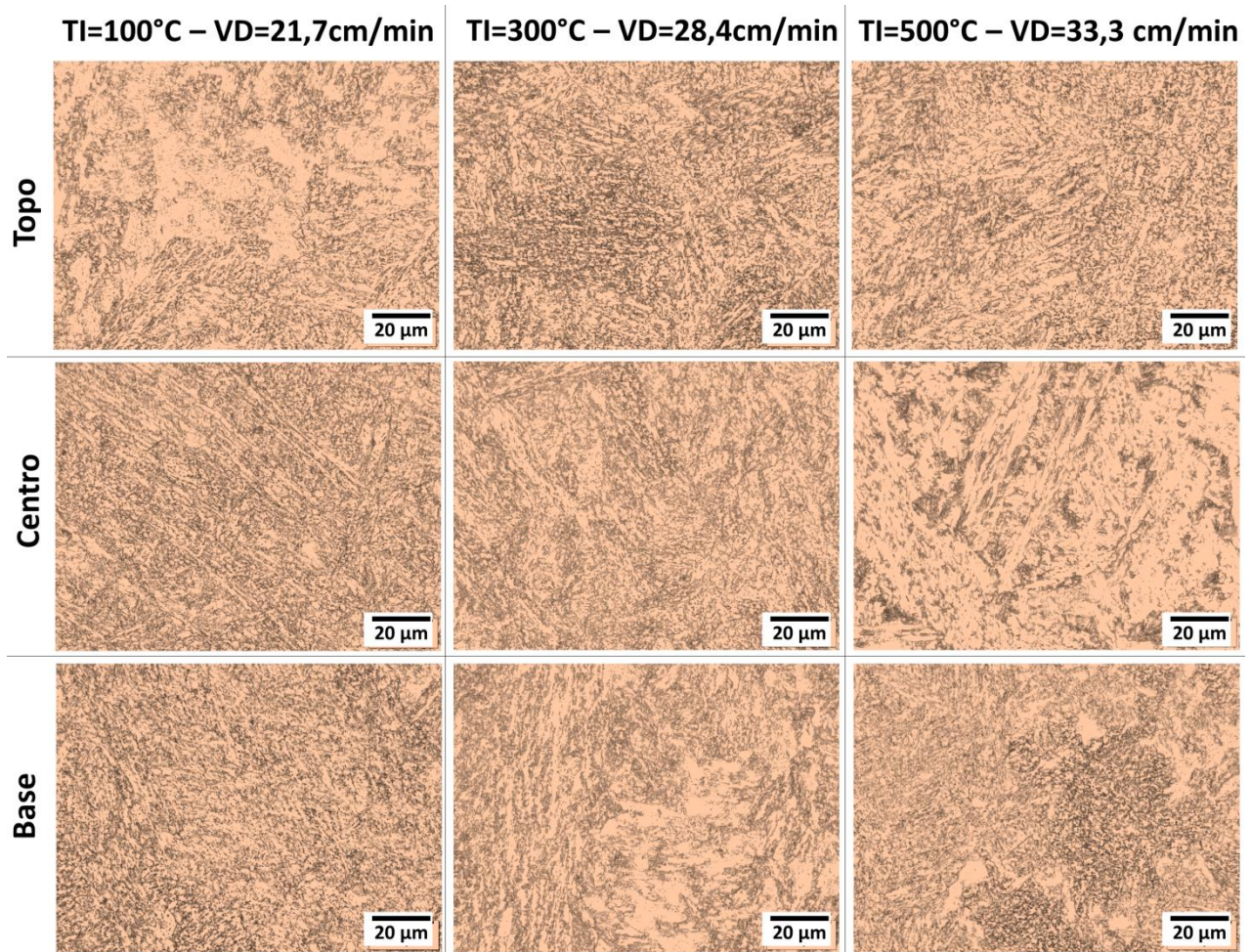


Figura 3.14 – Micrografias representativas do topo, do centro e da base das paredes depositadas com as condições experimentais da Tabela 3.3, usando resfriamento natural (onde: TI = temperatura intercamada e VD = velocidade de deslocamento)

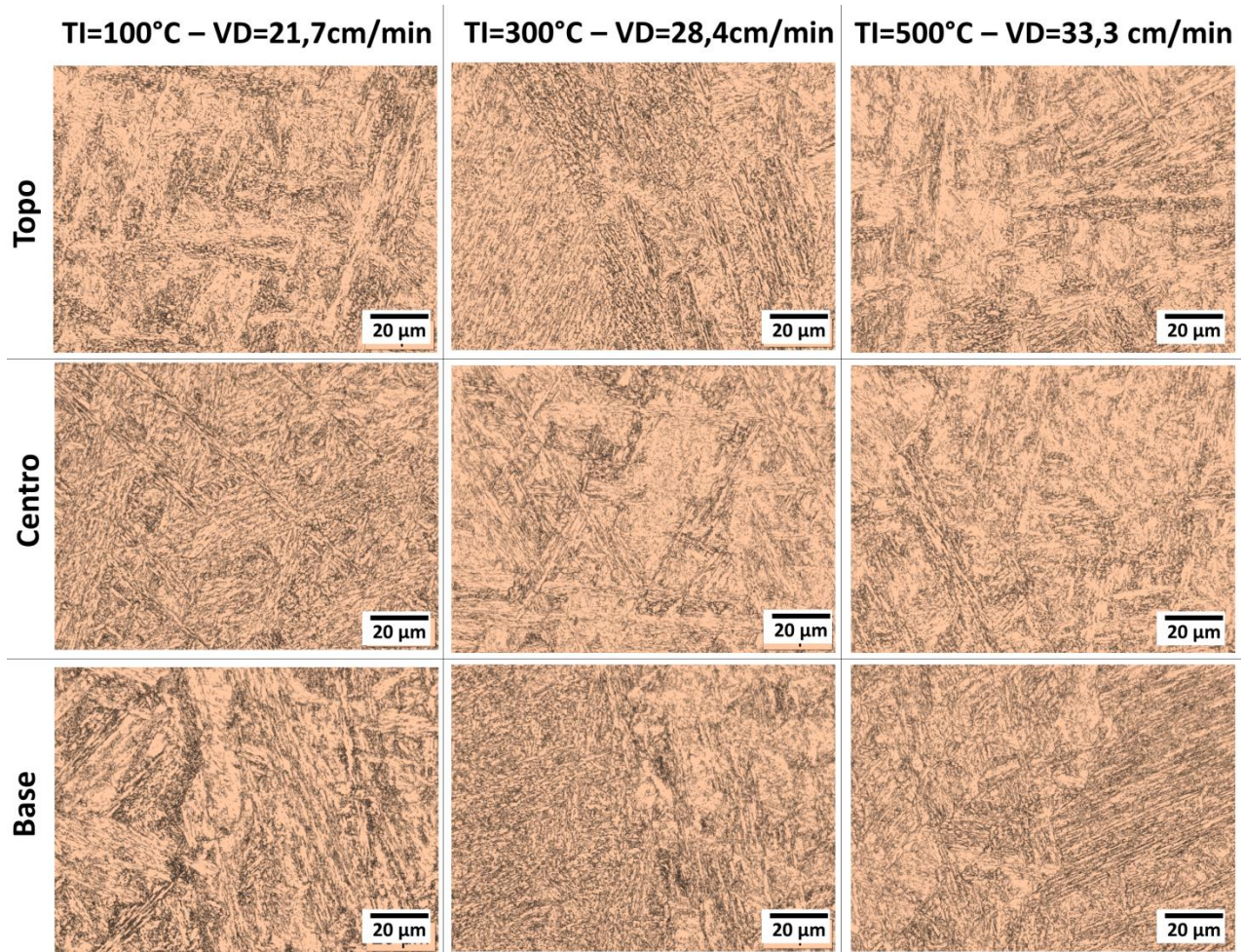


Figura 3.15 – Micrografias representativas do topo, do centro e da base das paredes depositadas com as condições experimentais da Tabela 3.3, usando resfriamento ativo por quase imersão (onde: TI = temperatura intercamada e VD = velocidade de deslocamento)

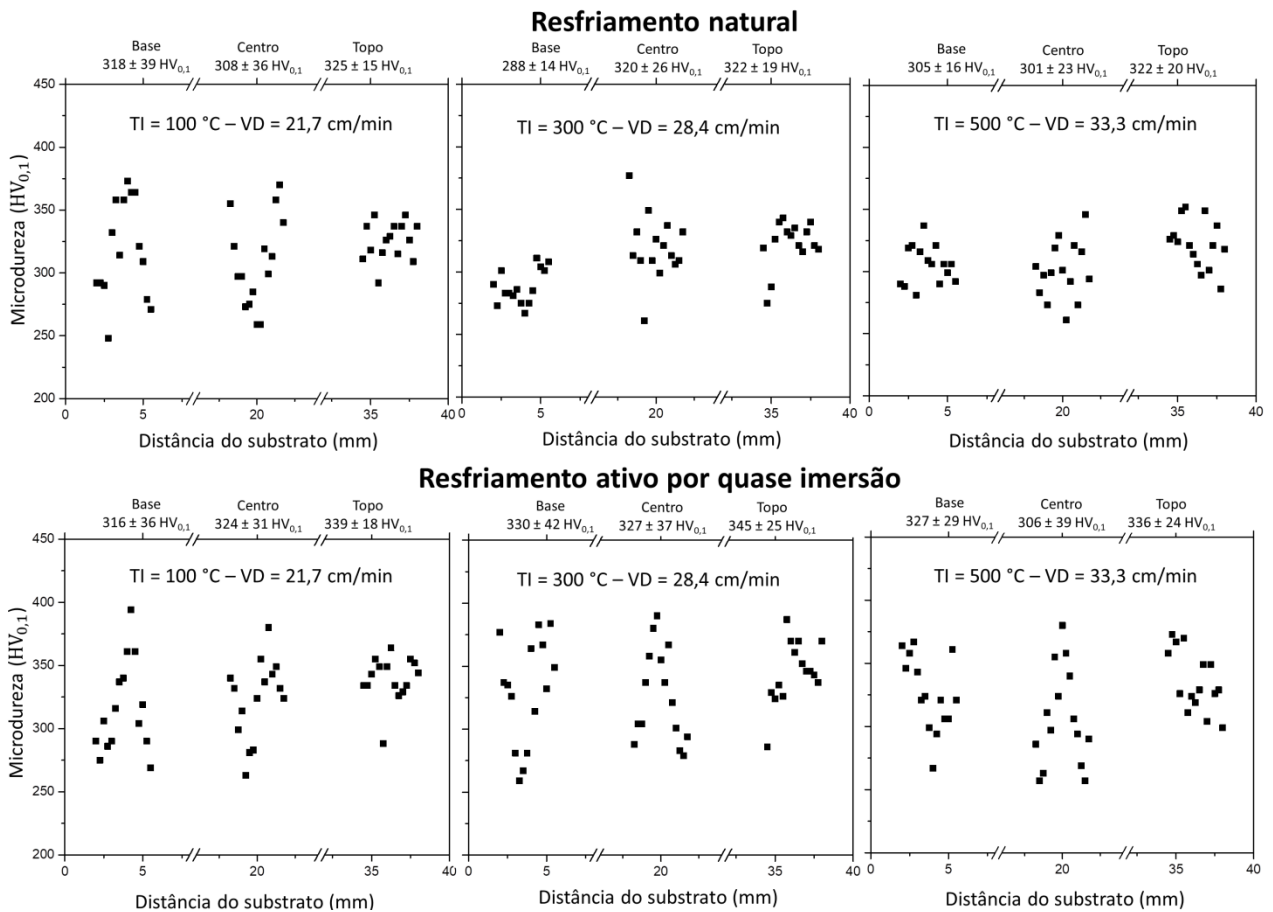


Figura 3.16 – Perfis de microdureza para os testes principais com resfriamento natural (superior) e com resfriamento ativo por quase imersão (inferior) (onde: TI = temperatura intercamada e VD = velocidade de deslocamento)

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foi avaliado o efeito combinado da temperatura intercamadas (TI) com a velocidade de deslocamento (VD) para uma dada velocidade de alimentação (VA) sobre aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos em paredes finas de mesma largura efetiva depositadas por MADA, usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo. Previamente, buscou-se definir uma faixa operacional de temperatura intercamadas e avaliar o efeito isolado da TI sobre aspectos operacionais e geométricos de paredes finas.

A largura externa, a ondulação lateral (melhor acabamento superficial), a altura da camada e o tempo de produção tenderam a diminuir à medida que os valores de TI e VD foram aumentados, independentemente da abordagem de resfriamento considerada. Para a mesma combinação de parâmetros, um menor tempo de produção é alcançado utilizando resfriamento ativo por quase imersão. Para a mesma combinação de TI com VD, as abordagens de resfriamento avaliadas não afetaram as características geométricas, praticamente.

A faixa de TI avaliada previamente (entre 100 e 500 °C) mostrou-se adequada para operar com o arame utilizado, já que não houve colapso da poça de fusão. Quando avaliado o efeito isolado da TI, verificou-se que o aspecto superficial não sofreu variações à medida que a TI foi alterada. Por outro lado, o aumento da TI resultou em tempos de produção mais curtos. Em geral, o aumento de TI resultou na formação de uma geometria menos convexa para a camada (maiores larguras e menor altura).

CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO EM MADA DE PAREDES FINAS SOBRE ASPECTOS OPERACIONAIS, GEOMÉTRICOS E METALÚRGICOS

4.1 Introdução, Questões Científicas/Tecnológicas e Objetivos específicos

Para produzir um componente com qualidade, a utilização do processo GMA (gas metal arc) requer um fluxo de gás em volta da poça de fusão e do arame-eletrodo de modo a proteger a poça e as gotas metálicas em transferência de efeitos nocivos vindos do contato com o ar atmosférico. Por conta desta função, este gás é chamado de proteção. Adaptando para a manufatura aditiva as contribuições adicionais descritas por Scotti e Ponomarev (2008), pode-se dizer que o gás de proteção também estabiliza o arco, controla a operacionalidade e transferência metálica, exerce influência sobre a geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas dos componentes depositados.

Considerando a literatura de soldagem, os gases normalmente utilizados são o argônio, hélio, dióxido de carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. Esses gases podem ser utilizados puros ou em misturas de dois ou mais gases de acordo com os diferentes modos de transferência metálica, materiais e perfis geométricos de interesse para o cordão (maior ou menor convexidade e penetração). Além disso, estes podem ser classificados como inertes ou ativos. Conforme mencionado por Scotti e Ponomarev (2008), os gases inertes são aqueles que não reagem quimicamente com o metal de solda (Ar e He), enquanto os ativos são aqueles usados puros ou combinados com gases inertes que apresentam reatividade química moderada e controlada (sendo mais utilizados o CO₂ e o O₂, e, em menor escala, o N₂ e NO).

Para realizar suas funções adequadamente, o gás de proteção deve ser selecionado de acordo com o material de deposição. Em termos da soldagem com os aços inoxidáveis austeníticos, por exemplo, Norrish (2006) afirma que misturas com argônio e pequenas adições de oxigênio (1-2 %) podem ser utilizadas quando a transferência metálica ocorre por spray, porém, em caso de transferência metálica por curto-circuito, o aspecto do cordão e as características de fusão tendem a ser pobres. Norrish (2006) menciona também que misturas de Ar com 5% CO₂ podem ser usadas com aços inoxidáveis austeníticos, mas que o nível de carbono resultante no metal de solda pode aumentar acima de 0,04%, tornando essa mistura

inadequada para os aços com baixo teor de carbono, que são indicados com um “L” na nomenclatura. Provavelmente por isto, Scotti e Ponomarev (2008) mencionam uma faixa ainda mais restrita de CO_2 ($< 3\%$) para aplicações com os aços inoxidáveis. Adições de He também podem ser empregadas nas misturas com Ar e CO_2 para reduzir o ângulo de molhabilidade, melhorar a fusão e o aspecto do cordão de solda de aço inoxidável. Além disso, misturas a base de Ar, He e CO_2 com pequenas adições de O_2 ou H_2 podem ser usadas em alguns casos. Norrish (2006) afirma que a adição de 1-2% de H_2 em gases com teores de He entre 20-40% melhora a molhabilidade (menos convexo) e o aspecto do cordão de aços inoxidáveis austeníticos.

Considerando o exposto e uma vez que a transferência metálica por curto-circuito (principalmente, controlado) é amplamente utilizada em MADA de componentes com paredes finas, estudar o efeito de misturas contendo Ar, He, CO_2 e H_2 sobre o desempenho de paredes fabricadas com os aços inoxidáveis austeníticos é de grande relevância para MADA. Embora já existam estudos que abordaram o efeito de diferentes combinações desses gases em operações de soldagem para materiais desta classe (Vaidya, 2002; Gault, 2001), a literatura vinculada a MADA sobre este assunto é inexistente até o momento. Além disso, uma vez que o gás de proteção apresenta uma correlação com diversas variáveis do processo GMA, avaliar o efeito de sua mudança não é trivial. Portanto, o estudo desta problemática vai de encontro com o objetivo geral desta tese que é avaliar como diferentes variáveis do processo GMA se relacionam entre si e como estas podem afetar o desempenho de paredes finas de aços depositadas por MADA. Diante disso, duas questões científicas (QC) e suas respectivas hipóteses (H) são elaboradas:

- QC 4.1 – Como avaliar o efeito de gases de proteção em MADA de paredes finas de uma forma sistemática?
- H 4.1 - Se um maior número possível de variáveis for mantido constante sob ação de diferentes gases de proteção, mas também garantindo algumas condições ideais (parametricamente falando) entre cada gás, como a maior regularidade de transferência metálica possível e dimensões mais próximas possíveis entre as paredes (mesma condição para dissipação de calor), uma avaliação sistemática pode ser estabelecida.
- QC 4.2 – Qual efeito de adições de diferentes teores de gases com diferentes propriedades físico-químicas (como Ar, He, CO_2 e H_2) em um gás de proteção a base de Ar sobre os aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas depositadas por MADA?

- H 4.2 – Uma vez fabricadas paredes sob uma metodologia sistemática e tentando manter somente a composição do gás como variável alvo, os aspectos mencionados poderão ser avaliados.

Considerando as questões científicas e hipóteses mencionadas, os seguintes objetivos específicos (OE) são propostos:

- OE 4.1 – Propor e avaliar uma metodologia sistemática de comparação entre gases de proteção com diferentes propriedades físico-químicas, que possibilite a confecção de paredes finas com o maior número possível de variáveis sendo mantido constante, mas também a maior regularidade de transferência metálica possível entre os diferentes gases;
- OE 4.2 - Avaliar o efeito de gases de proteção contendo diferentes teores de adições em Ar sobre os aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas depositadas por MADA com um aço inoxidável austenítico.

4.2 Revisão Bibliográfica: Propriedades dos gases de proteção

Cada gás ou mistura gasosa apresenta suas propriedades físico-químicas específicas. Na revisão sobre os gases de proteção usados na soldagem a arco elétrico elaborada por Tatagiba et al. (2012), por exemplo, o potencial de ionização, a condutividade térmica e o potencial de oxidação recebem destaque. Entretanto, os autores não mencionam entalpia no lugar de potencial de ionização, que seria a quantidade de energia necessária não somente para ionizar, mas também para aquecer (calor sensível) e mudar de fase (calor latente). Na mesma linha, condutividade térmica também não seria uma propriedade representativa para gases e plasmas aplicados em soldagem a arco, pois nestes estados a convecção e a radiação são os mecanismos governantes de transferência de calor. Apesar de entalpia e dos coeficientes de radiação e convecção serem as propriedades corretas a se lidar, em soldagem, tradicionalmente, refere-se apenas ao potencial de ionização e a condutividade. Por isto, essas mesmas propriedades do gás de proteção e suas influências sobre a tensão superficial e a viscosidade da poça de fusão serão abordadas no presente tópico.

Para um entendimento de como a densidade (D) e o potencial de ionização (PI) podem variar de um gás para outro, a Tabela 4.1 indica valores médios considerando certas condições de temperatura e pressão.

Tabela 4.1 – Propriedades dos gases de proteção usados para soldagem (ASM, 1993)

Gás	Símbolo químico	Peso molecular	D (g/l)	PI (eV)
Argônio	Ar	39,95	1,784	15,7
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	1,978	14,4
Hélio	He	4,00	0,178	24,5
Hidrogênio	H ₂	2,016	0,090	13,5
Nitrogênio	N ₂	28,01	12,5	14,5
Oxigênio	O ₂	32,00	1,43	13,2

Onde: D = densidade do gás, medida a 0 °C e 1 atm (densidade do ar atmosférico ≈ 1,2); PI = potencial de ionização

Conforme verificado na Tabela 4.1, a densidade é uma propriedade que pode variar significativamente entre os gases. Mas deve-se lembrar de que a densidade é altamente dependente da temperatura. Gases menos densos do que o ar proporcionam melhor proteção na posição sobrecabeça. Em contrapartida, a vazão precisa ser aumentada para garantir proteção em outras posições. Logo, durante a confecção de componentes em que a posição da tocha é modificada em relação à peça, este é um fator a ser considerado para permitir que cada gás exerça seu papel adequadamente (papel corrigido até certo ponto pelo posicionamento mais próximos ou mais afastado do bocal).

Nos processos a arco elétrico, a facilidade de abertura e manutenção do arco estão relacionadas ao menor potencial de ionização (melhor seria dizer entalpia) dos elementos presentes na atmosfera do mesmo. Esta atmosfera é composta por materiais do fluxo e vapores metálicos, bem como por gases introduzidos externamente com o propósito de proteção (AWS, 1987). Os vapores metálicos seriam provenientes do material de base e de adição. Os fluxos dos revestimentos e enchimentos, mas englobariam também as reações gás-metal que formam escórias. Conforme amplamente encontrado na literatura (ASM, 1993; Scotti e Ponomarev, 2008), o potencial de ionização é a energia, expressa em elétron-volts (eV), necessária para remover um elétron de um átomo de gás tornando-o um íon ou um átomo de gás eletricamente carregado.

Uma vez ionizada, a atmosfera conduz eletricidade, sendo que quanto maior o potencial de ionização, mais difícil é a abertura e manutenção do arco. Por este motivo, para um mesmo comprimento de arco e corrente de soldagem, a tensão é maior para o He (elevado PI) do que para o Ar (baixo PI). Conforme discutido por Scotti e Ponomarev (2008), os gases de proteção constituídos por moléculas de dois ou mais gases (CO₂, H₂ e O₂) sofrem uma dissociação no

arco devido às elevadas temperaturas, antes de serem ionizados. Assim, certa quantidade de energia é necessária para dissociá-los e outra parte para ionizar os átomos dos mesmos. Para esses casos, a soma desta energia normalmente é maior do que a do Ar, mas menor do que a do He (que possui um PI muito elevado). Scotti e Ponomarev (2008) afirmam que este é o motivo para misturas a base de argônio com gases moleculares ou CO₂ puro demandarem maior tensão de soldagem do que argônio puro.

A condutividade térmica de um gás é uma medida de quão bem ele é capaz de conduzir o calor. Esta propriedade influencia a perda de calor radial do centro para a periferia da coluna do arco, bem como a transferência de calor entre o plasma e o metal líquido (ASM, 1993). Como mencionado por Scotti e Ponomarev (2008), quanto maior a capacidade de troca de calor (pelos mecanismos de transferência de calor), maior a tensão de arco.

A ASM (1993) afirma que o argônio, que tem baixa condutividade térmica, produz um arco composto por duas zonas: um núcleo quente estreito e uma zona externa consideravelmente mais fria. Então, o perfil de penetração da área de fusão da solda exibe um "dedo" estreito na raiz e um topo mais largo (aspecto em forma de cálice). Contudo, conforme detalhado por Scotti e Ponomarev (2008), a geometria do cordão também depende de outros fatores, sendo a ação mecânica muito importante. O fato de que o perfil em forma de cálice não é evidenciado com o processo TIG, mesmo com o uso de Ar puro, é um argumento bem consistente apresentado por Scotti e Ponomarev (2008) para fazer este contraponto.

Gases com alta condutividade térmica, por sua vez, conduzem o calor para fora do núcleo do arco, resultando em um arco mais largo e mais quente. Esse tipo de distribuição de calor ocorre em misturas com adições de He, CO₂ e H₂, resultando em uma distribuição de calor mais uniforme sobre o substrato e favorecendo a eficiência de fusão (maior zona fundida).

Vale ressaltar que a magnitude da condutividade térmica varia com a temperatura, por isso deve ser avaliada em toda a faixa de temperatura estabelecida no arco. Para nível de exemplificação e apesar de considerar um arame de aço carbono, a Figura 4.1(a) exibe valores de condutividade térmica em função da temperatura considerando Ar puro e algumas misturas binárias de CO₂, O₂, He e H₂ com Ar em balanço. A Figura 4.1(b), por sua vez, mostra a distribuição de temperatura no arco com Ar puro. Tanto os resultados de condutividade quanto a distribuição de temperatura foram estimados por Hertel et al. (2015) via simulações numéricas assumindo condições operacionais específicas de transferência metálica, material de arame, corrente média, velocidade de alimentação. A mudança destas condições resulta em valores de condutividade diferentes. Considerando os níveis de temperatura mais altos (8000 a 15000 K) estabelecidos no núcleo do arco, percebe-se que os resultados de condutividade foram maiores para mistura rica em He.

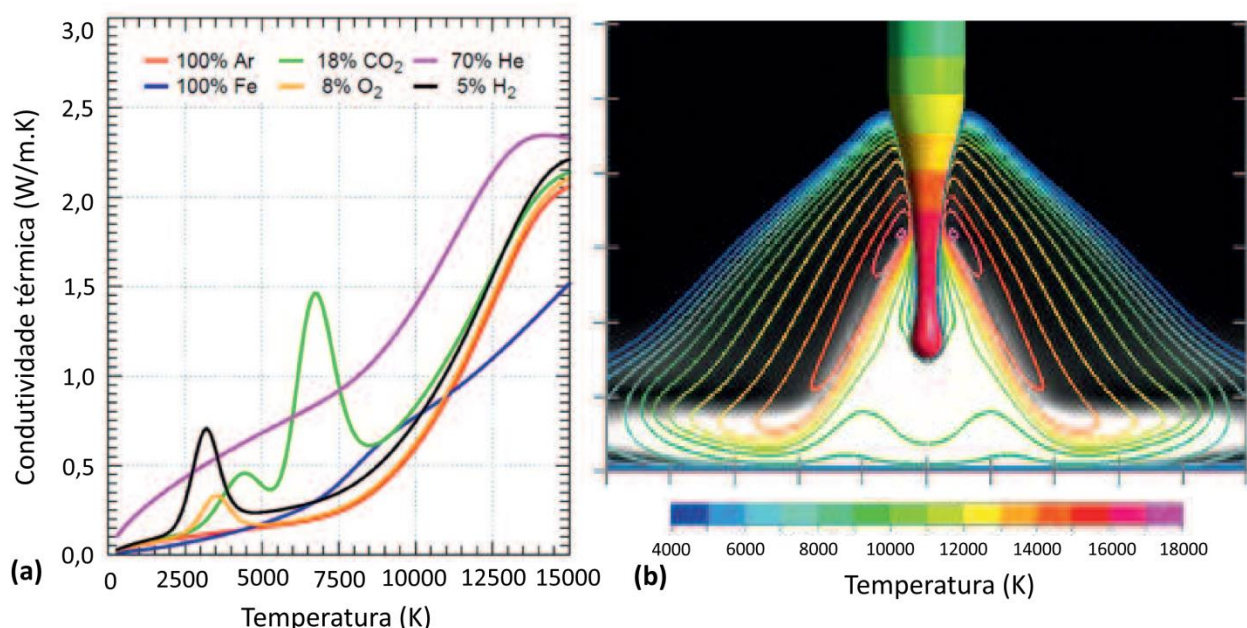


Figura 4.1 – (a) Condutividade térmica em função da temperatura no arco considerando Ar puro e algumas misturas binárias de CO₂, O₂, He e H₂ com Ar em balanço; (b) Distribuição de temperatura no arco com Ar puro (Adaptado de Hertel et al., 2015)

Tatagiba et al. (2012) afirmam que o potencial de oxidação (PO) de um gás de proteção corresponde à capacidade que o mesmo possui em promover a oxidação do metal e varia com a porcentagem volumétrica de O₂ e CO₂ na mistura. Scotti e Ponomarev (2008) advertem que um elevado PO para o gás pode ser maléfico por oxidar os materiais da solda, o que justificaria a utilização apenas de gases inertes (Ar e/ou He) quando materiais muito reativos (ligas de Al e Ti) são soldados. Contudo, uma vez que na soldagem com eletrodo consumível os elétrons são emitidos graças um fenômeno conhecido como emissão catódica ou emissão por campo, a presença de uma camada de óxidos sobre a poça de fusão é essencial para a formação de um arco estável. A Figura 4.2 ilustra o mecanismo mais aceito para explicar esse fenômeno.

Na emissão por campo os elétrons são facilmente emitidos por camadas de óxidos (que normalmente têm ligações elétron-átomos mais fracas do que do próprio metal) formadas sobre a poça e arredores, tornando-as positivamente carregadas. O alto gradiente de tensão localizado criado entre esta camada e o metal de base propicia as condições necessárias para que elétrons se agrupem e se acelerem em direção ao ânodo, sem a necessidade de um valor muito alto de tensão entre o eletrodo e a chapa. Com esta aceleração, os elétrons removem a camada de óxido localmente (quebrando-a e/ou fundindo-a), atravessam-na nestes pontos e passam a viajar pela coluna de plasma até o ânodo (Scotti e Ponomarev, 2008).

Estes pontos de emissão de elétrons são denominados de pontos catódicos. Os pontos catódicos (de grande luminosidade) têm a vida muito curta, pois uma vez que removem a

camada de óxido, perdem a condição de existir. Mas novos pontos são criados momentaneamente, dando a impressão visual de pontos brilhantes dinâmica e aleatoriamente distribuídos sobre a chapa (como vaga-lumes), enquanto persistir óxidos sobre a poça e arredores. Desta forma, durante a passagem do arco há um fenômeno de limpeza de óxidos da chapa, denominado de limpeza catódica (Scotti e Ponomarev, 2008).

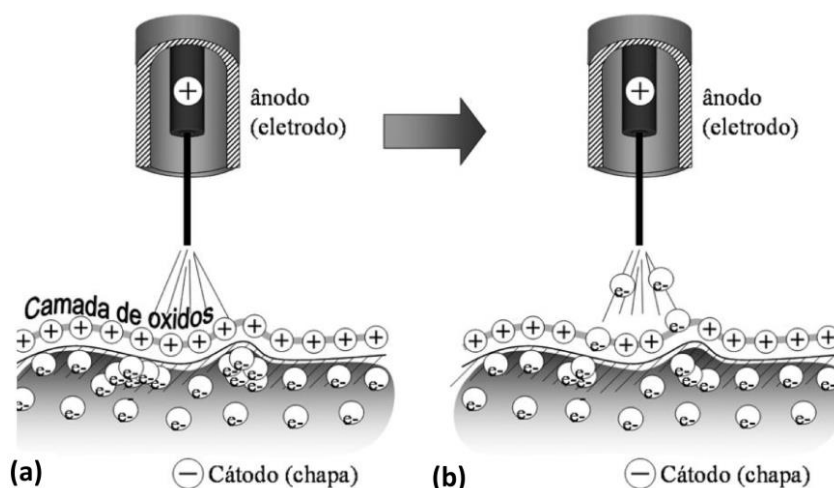


Figura 4.2 – Representação esquemática do fenômeno de emissão catódica: (a) fase de agrupamento de elétrons sob a camada de óxido; (b) fase de quebra localizada da camada óxida e emissão de elétrons (Scotti e Ponomarev, 2008)

Como os materiais mais reativos formam facilmente uma camada de óxidos sobre sua superfície, estes apresentam estabilidade mesmo sob uma atmosfera protetora de gás inerte. Porém, outros materiais, como os aços carbono e também os aços inoxidáveis (em menor escala), necessitam de certa quantidade de gases oxidantes na proteção para garantir a estabilidade do arco. Scotti e Ponomarev (2008) ressaltam também que gases oxidantes reagem com elementos presentes nos metais de adição e de base, formando uma escória na superfície dos cordões. Isto pode levar a perdas de elementos de liga, afetar a quantidade de escória, a geração de fumos, a fluidez da poça de fusão e as propriedades mecânicas do cordão final. Para prevenir tais efeitos, elementos desoxidantes (Mn, Si e Al) são adicionados no metal de adição, sendo que quanto maior o PO do gás de proteção, maior deve ser a quantidade desses elementos presentes no arame.

Embora não seja uma propriedade dos gases em si, a tensão superficial do metal líquido também pode ser afetada pelo gás de proteção. Como mencionado por Lancaster (1996), a força devido à tensão superficial exerce influência tanto na transferência metálica do eletrodo para a poça quanto no fluxo da poça de fusão. Ao discutir sobre observações práticas dos líquidos, Çengel e Cimbala (2000) afirmam que as gotas comportam-se como pequenos balões esféricos

cheios de líquido, e que a superfície do líquido age como uma membrana elástica esticada sob tensão. A força de tração que causa tal tensão atua no sentido paralelo à superfície e é devida às forças atrativas entre as moléculas do líquido. A intensidade de tal força por unidade de comprimento é denominada tensão superficial e geralmente é expressa na unidade N/m.

Em metais puros, a tensão superficial diminui com o aumento de temperatura (Figura 4.3). Nesse caso, como ilustrado na Figura 4.4(a), o metal líquido mais quente (menor tensão superficial) que está próximo ao centro da superfície da poça de fusão (posição 1) é puxado pelo metal líquido mais frio (maior tensão superficial) que está na borda da poça (posição 2). Assim, uma tensão de cisalhamento externa é induzida na superfície da poça devido ao gradiente de tensão superficial, fazendo com que o metal líquido flua do centro da superfície da poça para a borda e retorne abaixo da superfície da mesma. Este fluxo é chamado de fluxo Marangoni. Contudo, conforme apontado por Heiple e Roper (1982), o gradiente de tensão pode ser alterado de negativo para positivo com a presença de elementos tensoativos, resultando no fluxo inverso (Figura 4.4(b)). Este sentido favorece a transferência de calor para o fundo da poça de fusão, levando a um aumento de penetração.

Kou (2002) afirma que o S, O, Se e Te são exemplos de elementos tensoativos nos aços inoxidáveis. A Figura 4.5 mostra um gráfico típico da tensão superficial em função da temperatura para diferentes concentrações de oxigênio no ferro líquido. Como visto, o gradiente de tensão superficial torna-se cada vez mais positivo à medida que as concentrações de oxigênio no ferro líquido aumentam. Em termos da transferência metálica do eletrodo para a poça, Scotti e Ponomarev (2008) afirmam que pequenas adições de oxigênio (até 5%) diminuem o tamanho das gotas e aumentam a frequência de destacamento, em função da diminuição da tensão superficial; e também que na transferência por curto-circuito, a composição do gás pode alterar a duração do curto, afetando sua estabilidade.

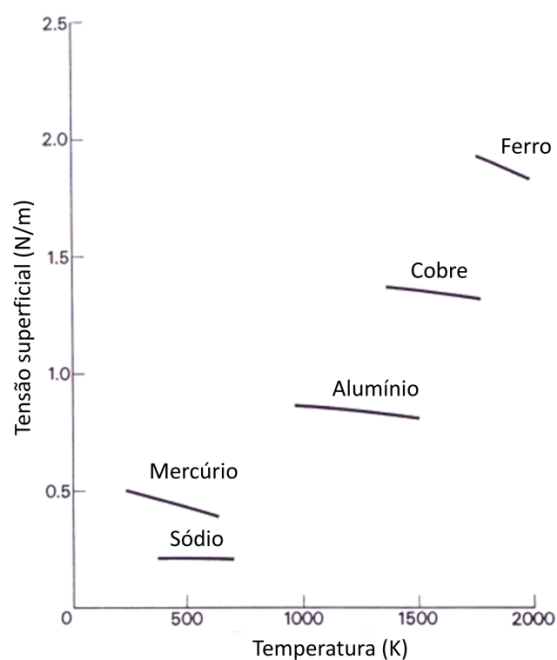


Figura 4.3 – Tensão superficial de metais líquidos (Lancaster (1996), apud Moundain-Monval (1973))

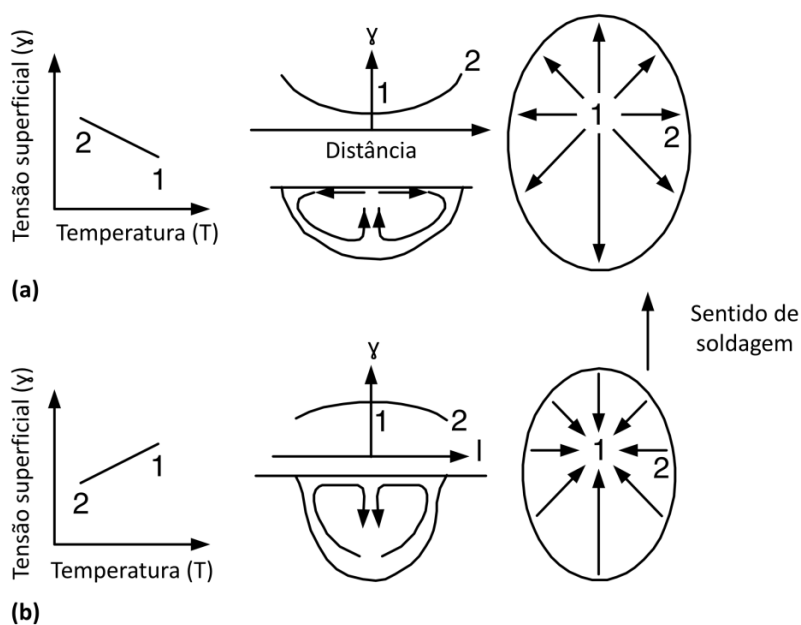


Figura 4.4 – Modelo de Heiple para o fluxo Marangoni na poça de fusão: (a) baixo teor de elementos tensoativos; (b) alto teor de elementos tensoativos (Adaptado de Kou, 2002)

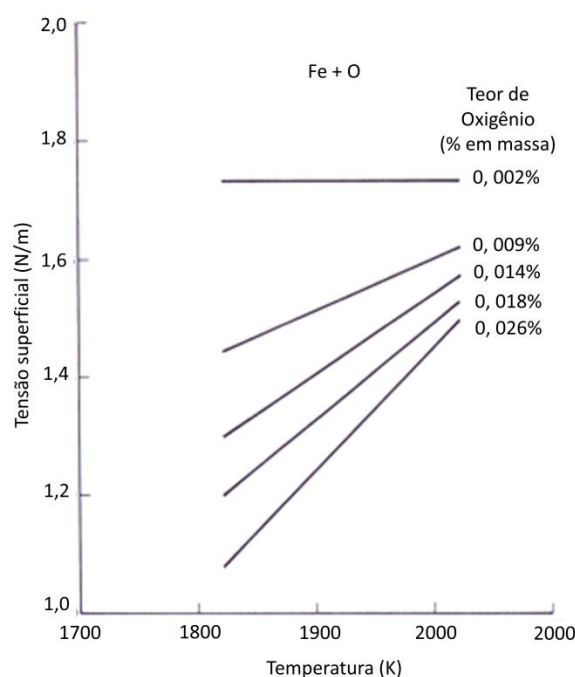


Figura 4.5 – Tensão superficial em função da temperatura para diferentes concentrações oxigênio no ferro líquido (Lancaster (1996), apud Popel et al. (1975))

4.3 Metodologia

Os experimentos realizados e descritos ao longo deste capítulo são divididos em duas etapas, a saber, testes preliminares e testes principais. Durante os testes preliminares procurou-se definir os parâmetros de deposição que atendem potenciais critérios de comparação estabelecidos entre os diferentes gases (para uma comparação consistente). Nos testes principais, por sua vez, avaliou-se o efeito de gases proteção com diferentes teores de Ar, He, CO₂ e H₂ sobre os aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de três paredes finas depositadas (uma para cada gás avaliado) por MADA, sob a perspectiva de serem comparados numa mesma condição (advindas dos testes preliminares). Para o presente estudo, um aço inoxidável austenítico foi empregado como estudo de caso.

Para o estudo dos aspectos operacionais, propôs-se avaliar a regularidade da transferência metálica por métodos qualitativos (usando oscilogramas e ciclogramas) e quantitativos (usando a frequência de curto-circuito, os tempos de arco aberto e curto-circuito e um índice de regularidade da transferência metálica). Para o estudo dos aspectos geométricos incluiu-se avaliar o aspecto da superfície e as características geométricas. Em complemento, estimativas do tempo de deposição são apresentadas para as paredes. Por fim, o estudo dos aspectos metalúrgicos foi feito através de ensaios de microdureza, da avaliação de macro e microestruturas, e da medição do teor de ferrita- δ .

Nesta proposta experimental, os materiais de consumo (gases de proteção e arame) são meios e não fins. Assim, para satisfazer os objetivos específicos, três gases de proteção comerciais foram empregados, a saber: mistura 1 (2%CO₂ + Ar); mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) e mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar). Os nomes comerciais de cada mistura gasosa foram omitidos por não serem uma variável essencial. Uma vazão de 15 L/min foi usada para todos os gases. Paredes finas foram depositadas com o mesmo arame. O arame AWS ER316LSi (1,2 mm diâmetro) foi utilizado como metal de adição, por ser compatível com os gases escolhidos.

Durante os testes preliminares, observou-se que a poça de fusão tinha um perfil alongado (devido à baixa condutividade térmica do aço inoxidável austenítico) que se estendia além do diâmetro do bocal. Assim, um sistema auxiliar de gás de proteção foi utilizado na forma de uma extensão da tocha (Figura 4.6(a)), contribuindo com uma maior cobertura linear da proteção do cordão. Argônio ultrapuro comercial (Ar5.0) foi aplicado nas extensões da tocha para garantir uma proteção adicional, a uma vazão de 15 L/min. Espera-se que, devido ao sistema auxiliar de proteção empregado, esta proteção adicional não interfira na composição das misturas dos gases estudados, atuando somente na proteção da “cauda” da poça. Conforme visualizado na Figura 4.6 (b e c), o aspecto da superfície foi consideravelmente melhorado com o uso do dispositivo.

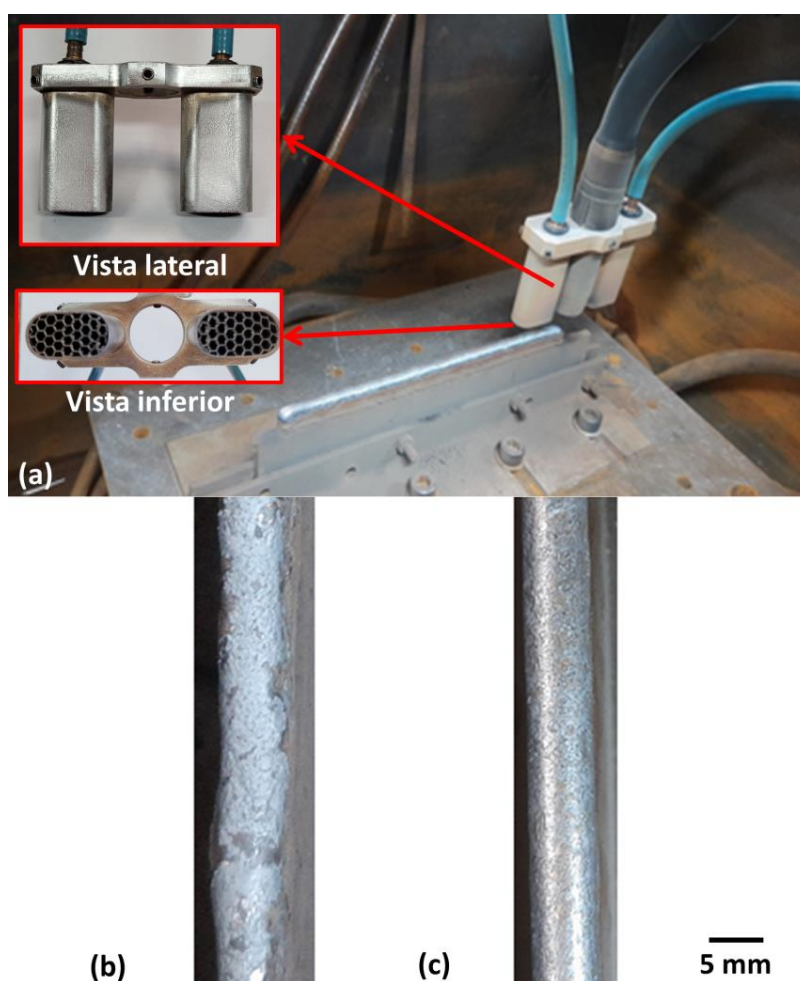


Figura 4.6 – (a) Sistema auxiliar de gás de proteção acoplado à tocha de soldagem; (b e c) aparência da superfície, sendo (b) antes e (c) depois do uso da proteção adicional

Assim como nos outros capítulos, a versão Cold Metal Transfer (CMT) do processo GMA foi utilizada como fonte de potência para deposição com arco. A linha sinérgica CMT 928 (CrNi 19 9, $\phi = 1,2$ mm, 2,5%CO₂ + Ar) foi empregada para todos os três gases, uma vez que nenhuma linha sinérgica específica para uma mistura com Ar + He ou Ar + baixo teor de hidrogênio estava disponível. Nenhuma abordagem de resfriamento da parede em deposição (ativa ou passiva) foi utilizada, ou seja, ocorreu apenas o resfriamento natural do componente. Uma temperatura intercamadas de 50 °C foi mantida durante a deposição de cada parede, visando evitar a formação de fases deletérias, tal como a fase sigma que requer longos tempos de permanência dentro de uma faixa de temperatura entre 600 e 900 °C (Lippold e Kotecki, 2005). A mesma estratégia detalhada no capítulo anterior (tópico 3.3.1) foi utilizada para monitorar a temperatura intercamadas, sendo regulada uma emissividade de 0,63 (aspecto da superfície diferente). Porém, uma distância de 40 mm foi usada entre o ponto de medição e a linha de centro do arame, mais afastada neste caso por conta do uso do sistema auxiliar de gás

de proteção. A distância bico de contato-peça (DBCP) foi mantida em 12 mm durante todas as deposições (verificada com um gabarito a cada camada depositada).

Um total de 30 camadas foi depositado para cada parede. A estratégia de deposição bidirecional foi utilizada, ou seja, a deposição de uma camada subsequente sempre ocorre no sentido oposto à anterior. Semelhantemente aos ensaios descritos nos capítulos anteriores, os substratos foram posicionados em um dispositivo de fixação com o lado mais estreito voltado para cima (servindo como uma pré-parede), visando manter o fluxo de calor o mais constante possível desde as primeiras camadas. Barras chatas de aço carbono (220 mm x 50 mm x 6,4 mm) foram utilizadas como substrato

Um condicionador de sinais (14 bits), operando com uma taxa de aquisição de 5 kHz durante 8 s, foi empregado para monitorar os sinais elétricos (corrente e tensão) e a velocidade de alimentação do arame. Os valores médios e eficazes (root mean square - RMS) de corrente e de tensão, juntamente com os valores médios de velocidade alimentação e de energia do arco por unidade de comprimento foram determinados para cada camada das paredes depositadas. A energia do arco por unidade de comprimento foi determinada pela média das potências instantâneas (média do produto ponto a ponto entre a corrente e a tensão) dividida pela velocidade de deslocamento empregada.

A mesma metodologia descrita no tópico 3.2.2 foi utilizada para quantificar as características geométricas das paredes, ou seja, largura externa (L_{ext}), largura efetiva (L_{efe}), ondulação lateral (OL) e altura da camada (AC). Como as dimensões das paredes depositadas neste capítulo são maiores (220 mm x 70 mm x 6,4 mm), a área útil da região central avaliada via escâner 3D foi aumentada de 90 mm x 28 mm para 180 mm x 50 mm, passando a serem avaliados 360 perfis.

4.3.1 Método de parametrização estabelecido para comparação sistemática de diferentes gases de proteção

O gás de proteção apresenta uma correlação com diversas variáveis do processo GMA. No caso do CMT, se a mesma regulagem de parâmetros for mantida entre diferentes gases, além da possibilidade de mudança na tensão (intrínseco pela variação do potencial de ionização e da condutividade térmica do gás), a velocidade de alimentação e a corrente também podem ser alteradas. Esse comportamento foi constatado por meio de testes preliminares. Diante deste cenário, algumas opções poderiam ser consideradas para estabelecer uma comparação entre diferentes gases:

- a) Manter configurados os mesmos valores de velocidade de alimentação (VA_{config}) e velocidade de deslocamento (VD), ao custo de diferentes velocidades de alimentação média (VA_m), correntes média (I_m) e, conseqüentemente, diferentes quantidades de material depositado por unidade de comprimento (diferente relação VA_m/VD);
- b) Empregar diferentes valores de VA_{config} para atingir as mesmas VA_m , ao custo de diferentes I_m . Mas ao mesmo tempo empregar a mesma VD para manter as mesmas quantidades de material depositado por unidade de comprimento (mesma relação VA_m/VD);
- c) Empregar diferentes valores de VA_{config} para manter a mesma I_m , implicando em diferentes VA_m . Mas ao mesmo tempo alterar a VD para manter a mesmas quantidades de material depositado por unidade de comprimento (mesma relação VA_m/VD).

Variar as quantidades de material depositadas por unidade de comprimento (diferentes volumes de camada) implicaria em uma mudança de geometria imediata, dificultando a avaliação do efeito dos gases. Este aspecto torna a opção (a) menos razoável. Adicionalmente, as opções (b) e (c) ainda permitem a manutenção de um maior número de parâmetros. Pensando agora no efeito da variação da corrente média (I_m), Scotti e Ponomarev (2008), ao detalhar a formação do cordão de solda no processo GMA, explicam que a pressão exercida sobre a poça tem grande influência na geometria do cordão. Como esta pressão apresenta correlação direta com a corrente (já que é decorrente principalmente do campo eletromagnético do arco), torna-se importante manter a mesma I_m para deixar a pressão o mais próximo possível entre os diferentes gases. Diz-se o mais próximo possível porque o simples fato de usar gases com maior densidade (por exemplo, Ar em contraste com He e H_2) já deve aumentar a pressão exercida pelo jato de plasma. Do mesmo modo, caso os gases resultem em diferentes formatos de coluna do arco (mais ou menos cônico), a pressão do jato de plasma também deve alterar. Diante disso, a terceira opção (c) foi escolhida como critério de comparação.

4.3.2 Métodos utilizados para avaliar a regularidade da transferência metálica

Métodos qualitativos e quantitativos foram empregados para avaliar a regularidade da transferência metálica durante os testes preliminares e principais. As análises qualitativas foram estabelecidas pela comparação visual de oscilogramas (gráficos de corrente x tempo e tensão x tempo) e ciclogramas (gráficos de tensão x corrente). As análises quantitativas ocorreram pela comparação dos valores de frequência de curto-circuito, dos tempos de arco aberto e de curto-circuito, que são usados nos cálculos de um índice de regularidade de transferência metálica.

Para nível de exemplificação, a Figura 4.7 mostra um conjunto de oscilogramas típicos obtido com o uso da mistura 1 (2%CO₂ + Ar) com a linha a sinérgica CMT 928, os quais podem ser considerados estáveis devido ao comportamento regular e periódico das ondas de corrente e tensão ao longo do tempo. A Figura 4.8, por sua vez, ilustra dois ciclogramas obtidos por Jorge et al. (2021) em um trabalho onde foram avaliadas diferentes frequências de pulsação de arame, utilizando um dispositivo de pulsação linear desenvolvido pelos próprios autores. Nesse caso, acredita-se que quanto mais concentrada a superposição dos sinais de tensão x corrente, maior a estabilidade do processo para os parâmetros de deposição ajustados.

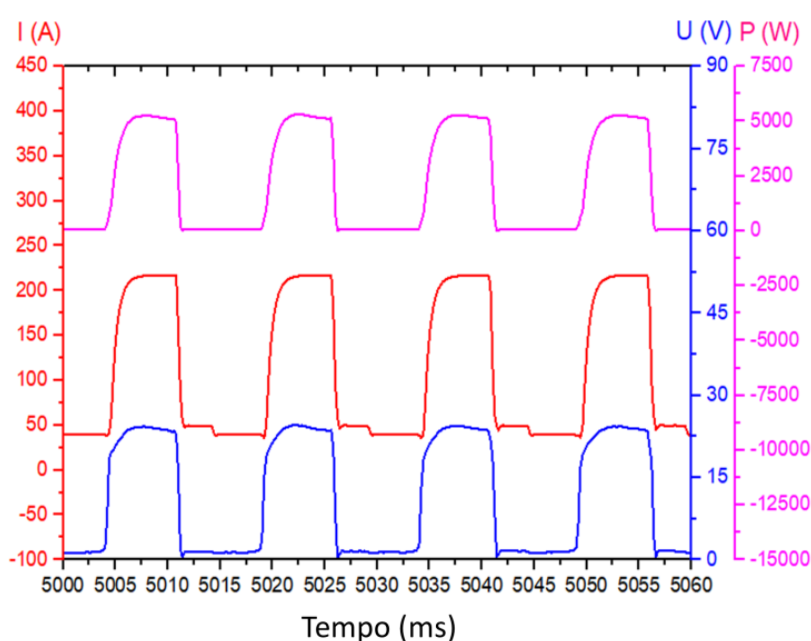


Figura 4.7 – Oscilogramas típicos de corrente (I), tensão (U) e potência (P) obtidos para a linha sinérgica CMT 928 (considerando: a mistura 1 (2%CO₂ + Ar) como gás de proteção; VA_{config} = 4,9 m/min; VD = 35 cm/min e DBCP = 12 mm)

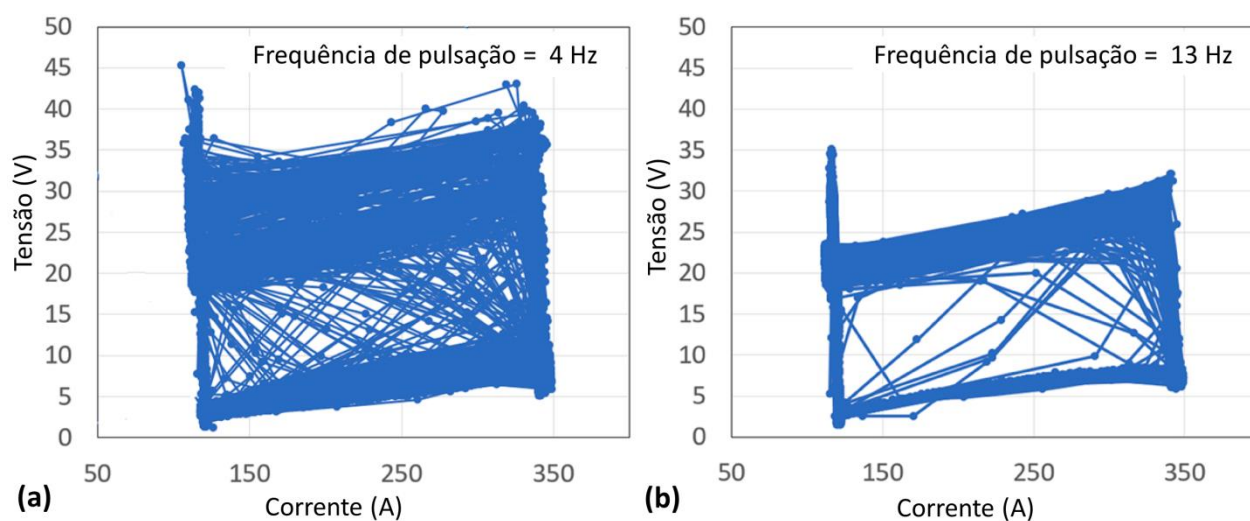


Figura 4.8 – Ciclogramas típicos de tensão x corrente: (a) frequência de pulsação do arame de 4 Hz e (b) frequência de pulsação do arame de 13 Hz (considerando: arame AWS ER70S-6 de 1,0 mm; $VA_{\text{config}} = 4,8$ m/min; $VD = 20$ cm/min; Ar+25%CO₂ como gás de proteção à 16 L/min; DBCP = 18 mm; amplitude de pulsação do arame de 2 mm) (Adaptado de Jorge et al., 2021)

Os valores médios e os desvios padrão de frequência de curto-circuito (F_{cc}), tempo de arco aberto (t_{aa}) e tempo de curto-circuito (t_{cc}) foram calculados através dos dados de tensão (sinal que possui relação direta com o comprimento de arco) de vinte e cinco camadas de cada parede, usando um software desenvolvido e registrado por Vilarinho e Araújo (2019). Com base em um valor de tensão de curto-circuito pré-estabelecido (5 V), o código do programa é capaz de identificar os curtos-circuitos e extrair os resultados mencionados.

O mesmo software também quantificou o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}). Conforme descrito por Souza et al. (2011), o índice de regularidade IV_{cc} é baseado na premissa de que a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto. Como indica a Equação 4.1, o IV_{cc} quantifica as constâncias nos tempos através de um coeficiente de variação, o qual considera os desvios padrão das amostras ($\propto t_{cc}$ e $\propto t_{aa}$) e suas médias (t_{cc} e t_{aa}). Desta forma, quanto menor o IV_{cc} , maior a estabilidade do processo.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma t_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma t_{aa}}{t_{aa}} \quad (4.1)$$

4.3.3 Caracterização metalúrgica

Uma amostra transversal foi removida no centro do eixo Y de cada uma das paredes dos testes principais. Após lixamento e polimento, dois perfis de microdureza (L1 e L2) foram levantados no centro das seções transversais de cada parede fina (Figura 4.9(a)). Um

microdurômetro (Shimadzu HMV-2) foi utilizado para realizar os testes com uma carga de 100 gf (980,7 mN), um tempo de 15 s e uma distância entre indentações de 0,25 mm.

Como será mostrado, observou-se uma diferença nos resultados dos perfis de microdureza entre as paredes. Para verificar esses resultados, um novo procedimento envolvendo mapas de microdureza foi realizado, agora empregando um microdurômetro Shimadzu HMV-G. Para cada mapa, foram realizadas 256 indentações em uma área de 8,0 mm x 3,5 mm, também localizada no centro das seções transversais. A Figura 4.10 apresenta uma ilustração esquemática das distâncias adotadas entre cada indentação. Os testes empregaram uma carga de 500 gf (4903,3 mN) e um tempo de 15 s.

Após os testes de microdureza, as amostras foram atacadas com água régia (HCl + HNO₃) e macrografias foram obtidas a partir das seções transversais de cada parede. Conforme representado na Figura 4.9(b), as microestruturas foram tomadas em dois centros das camadas (CC1 e CC2) e em duas regiões entre camadas (EC1 e EC2) usando um microscópio óptico (Olympus BX40).

Um ferritoscópio (Fisher MP30) foi usado para estimar o teor de ferrita- δ ao longo do centro das seções transversais (mesma região mostrada na Figura 4.9(a)). Um total de 30 medições foram realizadas ao longo dos 8 mm de altura. Para estimar o teor de ferrita- δ na condição como solidificada, também foram conduzidas medições na última camada depositada (10 medições).

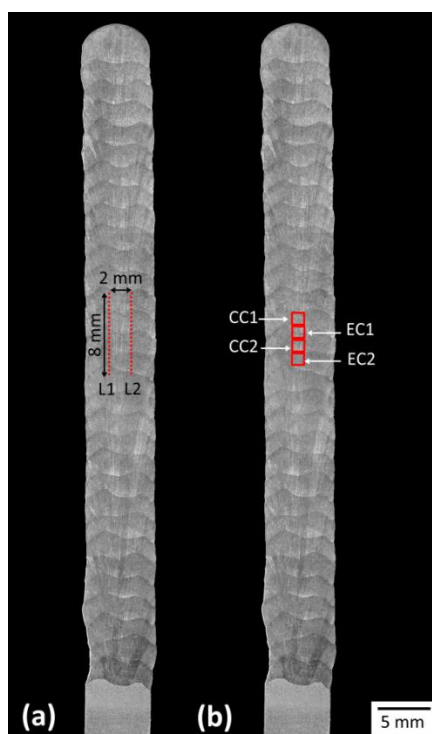


Figura 4.9 – Representação das posições para: (a) perfis de microdureza; e (b) micrografia

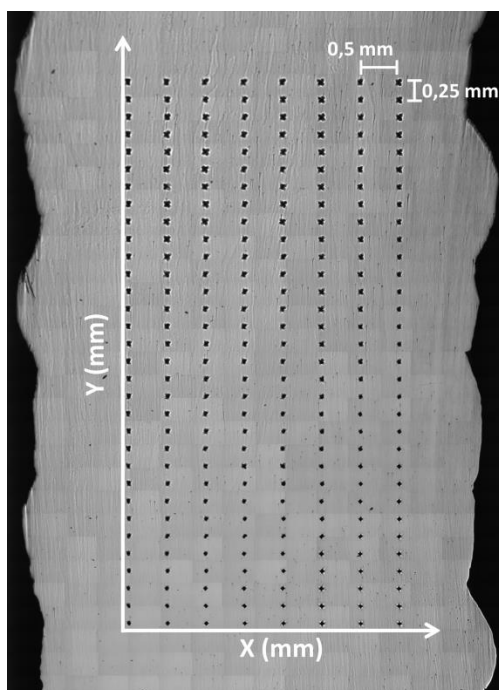


Figura 4.10 – Ilustração das distâncias adotadas entre cada indentação nos mapas de microdureza

4.4 Resultados e Discussões

4.4.1 Testes preliminares

Um gás foi escolhido como mistura de referência para que, posteriormente, fossem definidos os valores de velocidade de alimentação configurada na fonte (VA_{config}) e velocidade de deslocamento (VD) a serem utilizados com os outros dois gases, visando manter a corrente média (I_m) e a relação entre velocidade de alimentação média e velocidade de deslocamento (VA_m/VD) da mistura de referência (método de parametrização “c” escolhido em 4.3.1). Como a mistura 1 (2%CO₂ + Ar) é a mais próxima da recomendada para a linha sinérgica em uso, esta foi definida como de referência. Para garantir um fluxo de calor mais uniforme possível desde as primeiras camadas, os testes preliminares conduzidos com a mistura 1 visaram encontrar uma combinação de VA_{config} e VD capaz de atingir a largura mais próxima possível da espessura do substrato (6,4 mm). Além disso, os parâmetros de comprimento de arco (CA) e correção dinâmica (CD) do processo CMT foram ajustados para possibilitar a menor formação de respingos possível e uma transferência metálica estável. Uma regulagem de $VA_{\text{config}} = 4,9$ m/min, VD = 35 cm/min, CA = -30 e CD = -4 foi capaz de formar poucos respingos, atingir a largura alvo e um $IV_{\text{cc}} = 0,05$ (considerado muito regular) com a mistura de referência, sendo então considerada apta para a deposição da parede com a mistura 1 (2%CO₂ + Ar) durante os testes

principais. Essa regulagem de parâmetros forneceu uma $I_m = 112,7 \pm 0,8$ A e uma relação $VA_m/VD = 10,9 \pm 0,2$, os quais passaram a ser os valores alvo para as misturas 2 e 3. A Figura 4.11 apresenta o conjunto de oscilogramas e um ciclograma obtido para a regulagem de parâmetros mencionada.

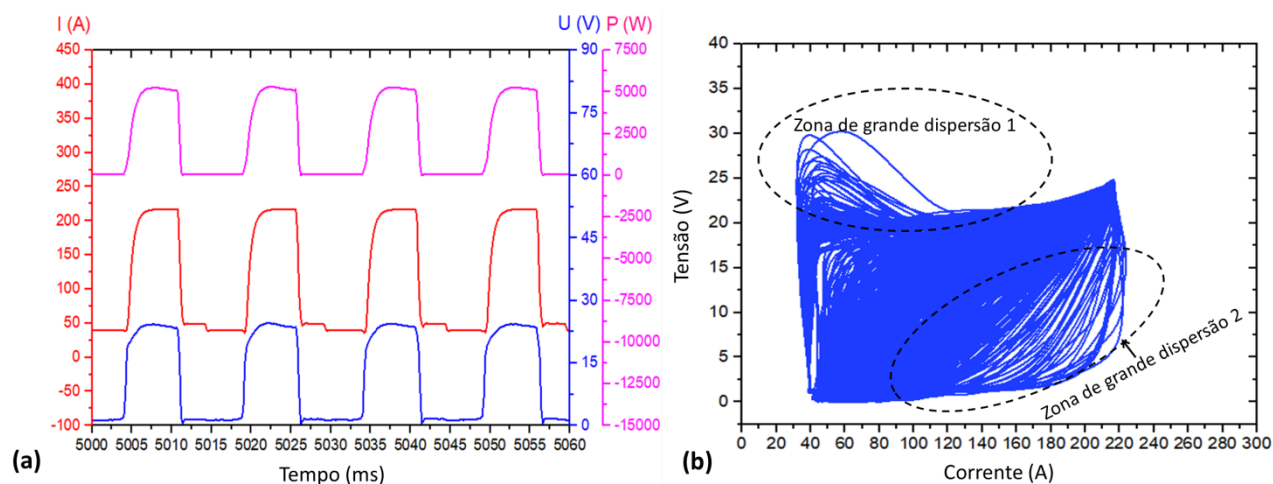


Figura 4.11 – (a) Oscilogramas de corrente (I), tensão (U) e potência (P); e (b) ciclograma de tensão x corrente obtidos para a linha sinérgica CMT 928 (considerando: a mistura 1 (2%CO₂ + Ar) como gás de proteção; $VA_{config} = 4,9$ m/min; $VD = 35$ cm/min, $CA = -30$ e $CD = -4$)

Apesar da alta regularidade de transferência metálica constatada pelo oscilograma (Figura 4.11(a)), quantificada pelo IV_{cc} , o ciclograma apresenta grande dispersão entre as curvas de tensão x corrente formadas para diferentes ciclos de curto-circuito, principalmente, dentro de duas zonas destacadas (1 e 2). Em resumo, a zona 1 provém de picos de tensão estabelecidos no início dos períodos de arco aberto em diferentes ciclos, enquanto a zona 2 é formada devido a variações no sincronismo entre os sinais de corrente e tensão em um curto espaço de tempo (1,9 ms, em média) que precede o início de um novo curto-circuito. Embora existam variações no sincronismo dos sinais, houve manutenção dos tempos de arco aberto e curto-circuito entre cada ciclo, o que justifica o baixo IV_{cc} . Desta forma, qualquer variação no sincronismo entre os sinais de corrente e tensão (mesmo em alguns milissegundos) pode resultar em uma dispersão significativa nos ciclogramas. Para não fugir do objetivo deste tópico, um estudo detalhado sobre este comportamento é apresentado à parte na seção Análise Crítica dos Ciclogramas de Tensão x Corrente (Apêndice).

A Tabela 4.2 apresenta as combinações de parâmetros adotadas para atingir os valores alvo ($I_m = 112,7 \pm 0,8$ A e $VA_m/VD = 10,9 \pm 0,2$) utilizando agora a mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppm CO₂ + Ar). A seguinte sequência de atividades foi conduzida durante a parametrização com esse gás de proteção:

1. A mesma VD da mistura de referência foi mantida, enquanto um ajuste grosseiro do VA_{config} foi realizado para atingir a I_m alvo (camadas 1 a 4);
2. A VD foi alterada para atingir a relação VA_m/VD desejada (camadas 5 e 6);
3. Ajuste fino da VA_{config} para atingir a I_m alvo (camadas 7 e 8);
4. Mesmo atingindo valores próximos dos alvos, constatou-se que o comprimento do arco estava alto e instável. Como a correção do comprimento do arco (CA) já estava no menor valor possível (CA varia de +30 a -30), a correção dinâmica (CD) foi alterada na tentativa de atingir uma condição mais estável (CD varia de +5 a -5);
5. Novamente, um ajuste fino da VA_{config} foi realizado para atingir a I_m alvo, mas agora para uma CD = -5 (camada 10).

Conforme avaliado pela última coluna da Tabela 4.2, a diminuição da CD levou a um IV_{cc} levemente menor (mais regularidade). Apesar disso, não se percebeu nenhuma mudança visualmente durante a deposição, tampouco nos oscilogramas e ciclogramas.

Tabela 4.2 – Parâmetros elétricos monitorados durante os testes preliminares usando a mistura 2 (2% H_2 + 20% He + 500ppm CO_2 + Ar)

Camada	VA_{config}	VD	CA	CD	I_m	I_{RMS}	U_m	U_{RMS}	VA_m	E_m	VA_m/VD	IV_{cc}
1	4,9	35,0	-30	-4	108,3	134,7	15,0	21,2	3,9	459,0	11,03	-
2	5,0	35,0	-30	-4	107,0	133,8	14,4	20,5	3,8	440,7	11,00	-
3	5,4	35,0	-30	-4	111,7	139,2	14,7	20,8	4,0	469,0	11,41	-
4	5,5	35,0	-30	-4	112,8	140,7	14,9	21,0	4,0	478,7	11,52	-
5	5,5	36,8	-30	-4	112,7	140,6	15,0	21,1	4,1	456,6	11,04	-
6	5,5	36,8	-30	-4	115,6	143,2	14,7	20,7	4,1	454,3	11,27	-
7	5,4	36,8	-30	-4	111,2	138,7	14,9	21,1	4,0	450,7	10,74	-
8	5,4	36,8	-30	-4	112,0	139,7	14,0	19,9	3,9	427,2	10,49	0,22
9	5,4	36,8	-30	-5	111,1	136,5	14,7	20,8	4,0	435,3	10,74	0,14
10	5,5	36,8	-30	-5	111,4	137,2	15,1	21,2	4,0	447,8	10,91	0,10

Onde: VA_{config} = velocidade de alimentação configurada na fonte, m/min; VD = velocidade de deslocamento, cm/min; CA = correção do arco; CD = correção dinâmica; I_m = corrente média, A; I_{RMS} = corrente RMS, A; U_m = tensão média, V; U_{RMS} = tensão RMS, V; VA_m = velocidade de alimentação média, m/min; E_m = média da energia por unidade de comprimento, J/mm; VA_m/VD = relação entre velocidade de alimentação média e velocidade de deslocamento; IV_{cc} = índice Vilarinho de regularidade da transferência em curto-circuito

O mesmo procedimento para atingir a parametrização foi aplicado para a mistura 3 (1% CO_2 + 1% H_2 + Ar). Nesse caso, uma deposição estável e com pouca formação de respingos foi observada com os mesmos valores de CA e CD ajustados para a mistura de referência.

Como pode ser observado na Tabela 4.3, os IV_{cc} foram iguais ou muito próximos do obtido com a mistura de referência ($IV_{cc} = 0,05$).

Tabela 4.3 – Parâmetros elétricos monitorados durante os testes preliminares usando a mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar)

Camada	VA _{config}	VD	CA	CD	I _m	I _{RMS}	U _m	U _{RMS}	VA _m	P _{inst}	VA _m /VD	IV _{cc}
1	4,9	35,0	-30	-4	112,1	138,2	12,2	16,8	3,7	383,3	10,6	0,05
2	4,9	35,0	-30	-4	110,1	136,3	12,5	17,3	3,7	383,9	10,5	0,06
3	4,9	33,4	-30	-4	111,4	137,5	12,2	16,8	3,6	402,0	10,9	0,04
4	4,9	33,4	-30	-4	109,4	135,7	12,6	17,4	3,7	403,5	11,1	0,07
5	4,9	33,4	-30	-4	111,5	137,6	12,2	16,8	3,6	402,3	10,7	0,05

Onde: VA_{config} = velocidade de alimentação configurada na fonte, m/min; VD = velocidade de deslocamento, cm/min; CA = correção do arco; CD = correção dinâmica; I_m = corrente média, A; I_{RMS} = corrente RMS, A; U_m = tensão média, V; U_{RMS} = tensão RMS, V; VA_m = velocidade de alimentação média, m/min; E_m = média da energia por unidade de comprimento, J/mm; VA_m/VD = relação entre velocidade de alimentação média e velocidade de deslocamento; IV_{cc} = índice Vilarinho de regularidade da transferência em curto-circuito

4.4.2 Testes principais

4.4.2.1 Aspectos operacionais

A Tabela 4.4 indica os resultados de medição dos parâmetros elétricos calculados a partir de 25 camadas para cada uma das três paredes depositadas com as misturas 1, 2 e 3. Para atingir níveis de I_m o mais próximo possível daquele obtido para a mistura de referência (mistura 1 - 2%CO₂ + Ar), os valores de VA_{config} para as misturas 2 (2%H₂ + 20% He + 500ppm CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar) foram ligeiramente alterados em relação aos valores obtidos durante os testes preliminares. Quando comparados os dados entre as diferentes paredes, verifica-se que os resultados de I_m e da relação VA_m/VD são iguais ou muito próximos entre si, o que atende a condição imposta para garantir a comparação entre diferentes gases de proteção. Para a mesma I_m, a VA_m foi maior para a mistura 2, indicando uma taxa de fusão levemente maior. Os resultados de tensão (U_m e U_{RMS}) foram maiores para a mistura 2, conseqüentemente, ainda que essa mistura possua o maior nível de VD para manter a relação VA_m/VD, um maior nível de energia por unidade de comprimento também foi atingido. Esse comportamento pode ser justificado pela maior taxa de troca de calor e pelo maior potencial de ionização

alcançado com a adição de 20%He. A pequena adição de hidrogênio resultou no mesmo efeito para a mistura 3, mas em menor grau.

Tabela 4.4 – Médias e desvios padrão dos parâmetros elétricos monitorados para 25 camadas de cada parede

Gás	VA _{config}	VD	CA	CD	I _m	I _{RMS}	U _m	U _{RMS}	VA _m	E _m	VA _m /VD
Mistura1	4,9	35,0	-30	-4	112,7±0,8	138,7±0,7	11,6±0,2	16,0±0,2	3,8±0,1	367,5±3,7	10,9±0,2
Mistura2	5,7	36,8	-30	-5	110,9±1,4	137,1±1,3	15,0±0,3	20,9±0,3	4,0±0,1	442,5±8,7	10,9±0,3
Mistura3	5,2	33,4	-30	-4	111,8±1,1	138,8±1,1	12,1±0,2	16,8±0,2	3,8±0,1	401,7±3,6	11,2±0,2

Onde: VA_{config} = velocidade de alimentação configurada na fonte, m/min; VD = velocidade de deslocamento, cm/min; CA = correção do arco; CD = correção dinâmica; I_m = corrente média, A; I_{RMS} = corrente RMS, A; U_m = tensão média, V; U_{RMS} = tensão RMS, V; VA_m = velocidade de alimentação média, m/min; E_m = média da energia por unidade de comprimento, J/mm; VA_m/VD = relação entre velocidade de alimentação média e velocidade de deslocamento; IV_{cc} = índice Vilarinho de regularidade da transferência em curto-circuito

A Tabela 4.5 apresenta os resultados de frequência de curto-circuito (F_{cc}), do índice de regularidade de transferência de metálica (IV_{cc}), dos tempos de arco aberto (t_{aa}) e curto-circuito (t_{cc}), e das suas razões (t_{aa}/t_{cc}) calculados a partir de 25 camadas para cada uma das três paredes depositadas com as misturas 1, 2 e 3. Uma F_{cc} ligeiramente maior foi obtida com a mistura 1 (2%CO₂ + Ar). Para uma mesma temperatura, quanto maior o percentual de oxigênio no Fe líquido menor a tensão superficial (Figura 4.5). Assim, o maior potencial de oxidação obtido com a mistura 1 pode ter reduzido a força devido à tensão superficial na gota metálica aderida na ponta do arame, deixando-a menos resistente ao destacamento e aumentando a frequência de curto-circuito. Além disso, menores IV_{cc} foram obtidos com as misturas 1 e 3, indicando maior regularidade de transferência metálica em relação à mistura 2, embora esta ainda seja muito boa. As razões t_{aa}/t_{cc} foram iguais ou muito próximas entre os três gases de proteção avaliados e um pouco menores que uma unidade, ou seja, um pouco mais de 50% do ciclo corresponde a curto-circuito.

Tabela 4.5 – Médias e desvios padrão de frequência de curto-circuito (F_{cc}), do índice de regularidade de transferência de metálica (IV_{cc}), dos tempos de arco aberto (t_{aa}) e curto-circuito (t_{cc}), e das suas razões (t_{aa}/t_{cc}) quantificadas para 25 camadas de cada parede

Gás	VA_m (m/min)	VD (cm/min)	VA_m/VD	F_{cc} (Hz)	IV_{cc}	t_{aa} (ms)	t_{cc} (ms)	t_{aa} / t_{cc}
Mistura 1	3,8±0,1	35,0	10,9±0,2	66,9±0,7	0,05±0,02	7,1±0,1	7,8±0,1	0,9±0,0
Mistura 2	4,0±0,1	36,8	10,9±0,3	57,8±1,1	0,11±0,03	8,3±0,2	9,0±0,2	0,9±0,0
Mistura 3	3,8±0,1	33,4	11,2±0,2	60,8±0,7	0,06±0,02	7,5±0,1	9,0±0,2	0,8±0,0

Onde: VA_m = velocidade de alimentação média; VD = velocidade de deslocamento; VA_m/VD = relação entre velocidade de alimentação média e velocidade de deslocamento; F_{cc} = frequência de curto-circuito; IV_{cc} = índice Vilarinho de regularidade da transferência em curto-circuito; t_{aa} = tempo de arco aberto; t_{cc} = tempo de curto-circuito; t_{aa}/t_{cc} = razão entre t_{aa} e t_{cc}

A Figura 4.12 apresenta os oscilogramas obtidos para a 15ª camada de cada uma das paredes depositadas nos testes principais considerando um intervalo de 100 ms. É possível verificar, agora de forma visual, a maior frequência de curto-circuito constatada para mistura 1. Avaliando as setas destacadas que indicam as médias dos valores de t_{aa} (setas marrons) e t_{cc} (setas verdes), percebe-se uma elevada manutenção da duração de cada semi-ciclo. Contudo, é difícil distinguir qual gás de proteção apresenta mais regularidade. Isso ressalta a importância de utilizar o índice IV_{cc} para quantificar as diferenças.

Novamente, apesar da alta regularidade de transferência metálica quantificada pelo IV_{cc} e constatada pelos oscilogramas, uma elevada dispersão entre as curvas de tensão x corrente é observada dentro de duas zonas do ciclogramas (Figura 4.13), mas desta vez para todos os gases avaliados. Conforme já discutido, a zona 1 decorre de picos de tensão estabelecidos no início dos períodos de arco aberto em diferentes ciclos. Como esses picos foram mais frequentes e longos com as misturas 2 e 3 (ver Figura 4.12), há uma maior dispersão dentro dessa zona para esses dois gases. A zona 2, por sua vez, é estabelecida por variações no sincronismo entre os sinais de corrente e tensão em um curto intervalo de tempo que precede o início de um novo curto-circuito. Nesse caso, todos os gases apresentaram grande dispersão dentro da zona 2.

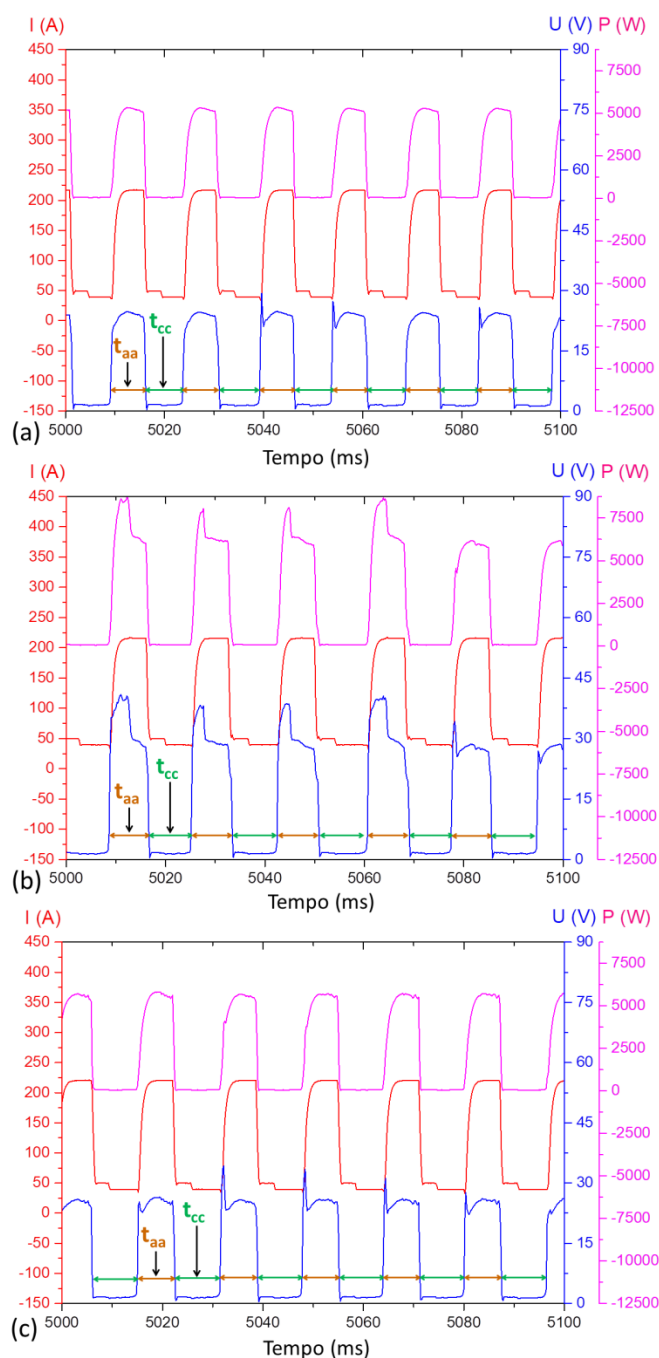


Figura 4.12 – Oscilogramas de corrente (I), tensão (U) e potência (P) da 15^a camada utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 (2%CO₂ + Ar); (b) mistura 2 (2%H₂ + 20% He + 500ppm CO₂ + Ar) e (c) mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar) (Onde: as setas marrons indicam as médias de tempo de arco aberto (t_{aa}) e as setas verdes indicam as médias de tempo de curto-circuito (t_{cc}) da Tabela 4.5)

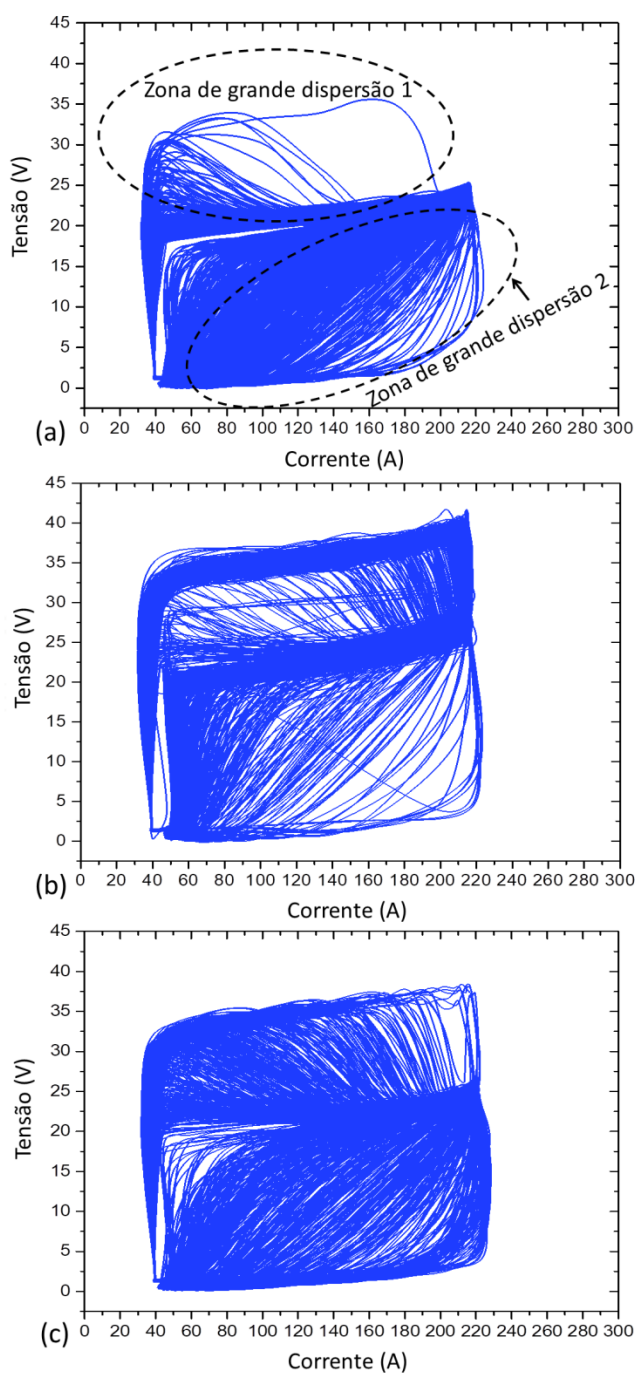


Figura 4.13 – Ciclogramas de tensão x corrente da 15ª camada utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 (2%CO₂ + Ar); (b) mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) e (c) mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar)

4.4.2.2 Aspectos geométricos

A Figura 4.14 apresenta o aspecto superficial obtido para cada parede após limpeza com escova de aço manual. Conforme visualizado, as paredes depositadas com as misturas 1 (2%CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar) apresentaram um aspecto parecido e mais plano,

enquanto a mistura 2 ($2\%H_2 + 20\%He + 500ppmCO_2 + Ar$) levou à formação de um aspecto mais irregular. Por apresentar maiores concentrações de gases que possuem uma maior capacidade de troca de calor e também devido ao maior nível de energia alcançado (Tabela 4.4), menores taxas de resfriamento devem ter sido obtidas com a mistura 2. Com isso, a viscosidade da poça deve ser menor por mais tempo e, conseqüentemente, menos resistente ao movimento induzido pela pressão de arco. Vale destacar que embora os níveis de corrente sejam iguais ou muito próximos entre os diferentes gases (Tabela 4.4), a pressão exercida pelo jato de plasma deve ser menor na mistura 2, por conta da menor densidade do H_2 e do He . Assim, mesmo com uma menor pressão atuando sobre a poça, o fato de haver uma poça menos rígida com a mistura 2 deve ser responsável pela formação de uma geometria mais irregular.

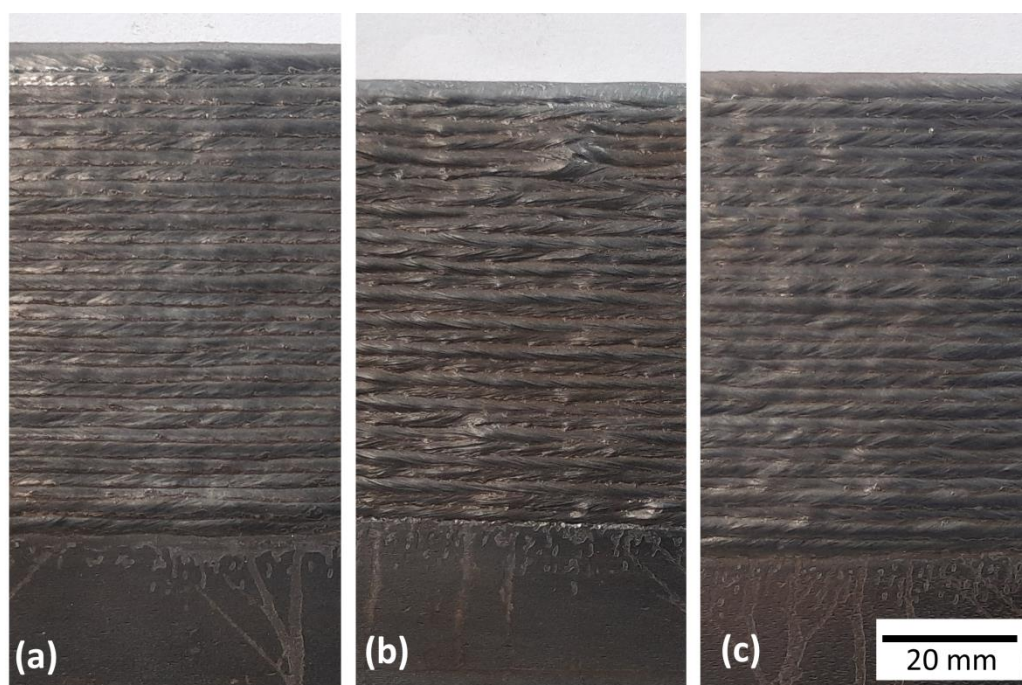


Figura 4.14 – Aspecto superficial (após limpeza com escova de aço) das paredes utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 ($2\%CO_2 + Ar$); (b) mistura 2 ($2\%H_2 + 20\%He + 500ppmCO_2 + Ar$) e (c) mistura 3 ($1\%CO_2 + 1\%H_2 + Ar$)

A Figura 4.15 apresenta os resultados das características geométricas quantificadas, isto é: largura efetiva (L_{efe}); largura externa (L_{ext}); ondulação lateral (OL) e altura da camada (AC). Novamente, por apresentar maiores concentrações de gases que possuem uma maior capacidade de troca de calor (o que deve implicar também em aumento de molhabilidade) e devido o maior nível de energia alcançado (Tabela 4.4), menores taxas de resfriamento devem ter sido obtidas (menor viscosidade por mais tempo) com a mistura 2 ($2\%H_2 + 20\%He + 500ppmCO_2 + Ar$), resultando na formação de uma poça menos resistente a pressão induzida

pele do arco. Consequentemente, esperava-se que a geometria da parede depositada com a mistura 2 tivesse maiores larguras efetiva e externa, mas menor altura da camada em relação aos outros gases de proteção. Contudo, tal comportamento só foi observado em comparação com a mistura 1 (2%CO₂ + Ar). Conforme visualizado na Tabela 4.4, a relação V_{A_m}/V_D foi um pouco maior para a mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar), levando a uma maior quantidade de material depositado e a um aumento nas dimensões (provavelmente de largura). Os valores de ondulação lateral, por sua vez, foram iguais quando as misturas 1 e 3 foram usadas, mas um pouco pior com a mistura 2. Esses resultados concordam com o aspecto superficial das paredes mostrados na Figura 4.14.

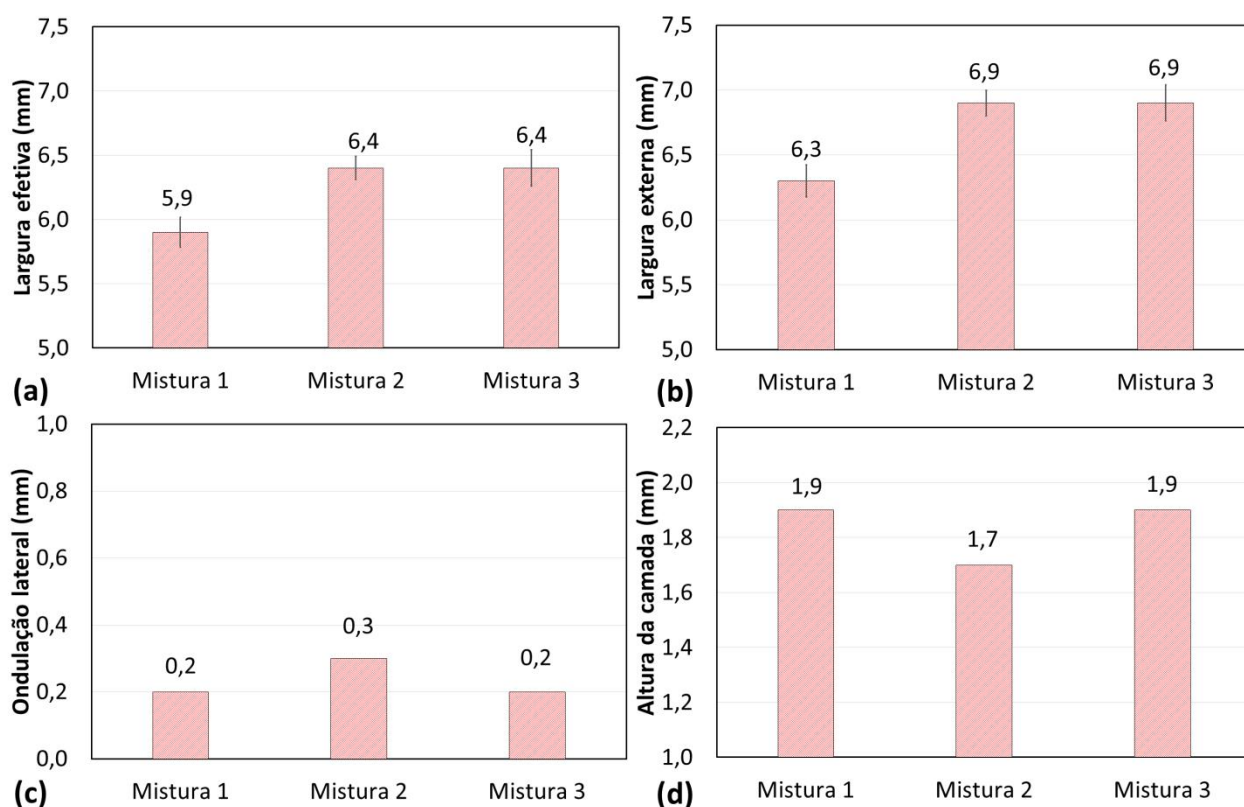


Figura 4.15 – Características geométricas dos testes principais: (a) largura efetiva; (b) largura externa; (c) ondulação lateral; e (d) altura da camada

Para avaliar se uma parametrização mais eficiente (menor desperdício de tempo) pode ser obtida entre os gases avaliados, uma estimativa do tempo total de deposição (T_{TD}) foi originalmente proposta. O T_{TD} pode ser quantificado pela Equação 4.2, onde T_D é o tempo de deposição de uma camada, NC é o número de camadas depositadas e T_E é o tempo de espera entre as camadas para alcançar uma dada temperatura intercamadas. O T_D foi calculado dividindo o comprimento da camada pela V_D empregada com cada gás, enquanto o NC foi

determinado pela divisão da altura alvo de parede pela altura média da camada alcançada com cada gás de proteção.

$$T_{TD} = T_D \times NC + T_E \times NC \quad (4.2)$$

Os valores L_{efe} e L_{ext} não foram os mesmos entre as condições avaliadas (Figura 4.15). Assim, para fins de comparação, torna-se necessário normalizar a largura da parede entre os três gases e considerar parâmetros capazes de atingir a mesma largura alvo durante os cálculos. Por esse motivo, a VD foi ajustada para cada gás utilizando um fator de normalização, visando atingir a mesma largura efetiva. Este fator parte da simplificação de que a largura e a altura da camada mudariam proporcionalmente com a mudança no volume da camada, que, por sua vez, possui uma relação direta com a relação VA_m/VD . Desta forma, se a largura efetiva alvo for 10% menor do que a largura efetiva da parede alcançada com um dado gás, um aumento de 10% é aplicado na VD (reduzindo o volume da poça e implicando em T_D mais curto). O mesmo raciocínio também foi aplicado às alturas de camada, resultando em diferentes NC para atingir uma altura de parede alvo com cada gás.

Desta forma, uma largura efetiva de 5 mm e uma altura de parede de 100 mm foram arbitrariamente definidas como alvos para os cálculos. Além disso, com o objetivo de estimar a influência do gás de proteção no tempo total de produção em termos de diferentes condições, os cálculos de T_{TD} consideraram tempos de espera (T_E) entre 0,3 e 28 min (sempre considerando o mesmo T_E entre os gases – na prática, esses valores podem ser diferentes entre eles) e diferentes comprimentos de parede (200, 1000 e 5000 mm), o que implica em variações nos tempos de deposição (T_D). A Figura 4.16 apresenta os resultados das estimativas de T_{TD} , considerando diferentes T_E e comprimentos de parede. Naturalmente, quanto maior o tempo de espera e comprimento da parede, maior o tempo total de deposição, independentemente do gás de proteção. Para um mesmo comprimento de camada, o T_{TD} sempre foi mais curto com a mistura 1 (linhas pretas), seguido pela mistura 3 (linhas laranjas). Desta forma, o uso da mistura 2 atrasa a produção de uma parede com as mesmas dimensões (comprimento, altura e largura). Além disso, quanto maior o tempo de espera, maior a diferença entre os gases avaliados, já que as retas ficam mais afastadas entre si. Isso enfatiza a importância de utilizar um resfriamento forçado da parede para acelerar a produção e ao mesmo tempo reduzir o efeito que a mudança dos gases pode exercer sobre o T_{TD} .

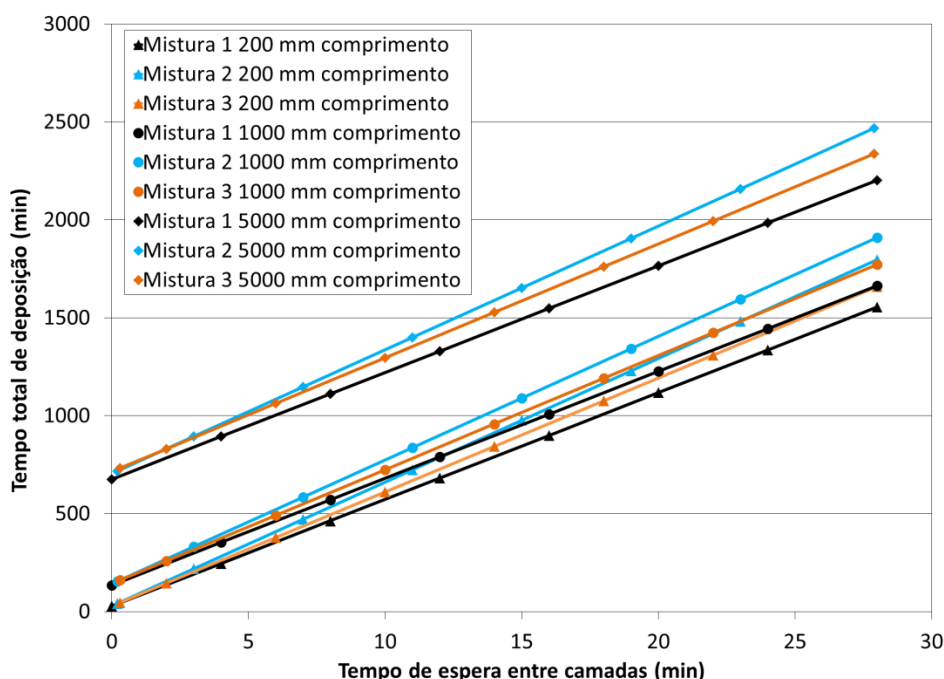


Figura 4.16 – Tempos totais de deposição para diferentes comprimentos de camada (marcadores triangulares, circulares e losangos consideram comprimentos de 200, 1000 e 5000 mm, respectivamente) usando a mistura 1 (linhas pretas), mistura 2 (linhas azuis) e mistura 3 (linhas laranjas)

4.4.2.3 Aspectos metalúrgicos

A Figura 4.17 mostra os perfis de microdureza das paredes finas depositadas considerando as misturas 1, 2 e 3 como gás de proteção. Além disso, as médias e os desvios padrão obtidos para cada parede também são apresentados. Como pode ser visto, não há grandes variações entre os dois perfis de microdureza para uma mesma parede. Contudo, quando é avaliada a mudança do gás de proteção, verificam-se maiores resultados para a mistura 1 ($209,7 \pm 5,3 \text{ HV}_{0,1}$), seguida pela mistura 2 ($205,9 \pm 5,3 \text{ HV}_{0,1}$) e pela mistura 3 ($195,8 \pm 5,7 \text{ HV}_{0,1}$). Apesar da diferença entre os perfis de microdureza, os resultados obtidos a partir dos mapas (Figura 4.18) mostram que eles são iguais ou muito próximos entre si. Nesse caso, o fato das médias serem muito próximas e dos desvios padrão se interceptarem reforça essa afirmação (esses valores são apresentados na parte superior de cada mapa). Em geral, a maioria dos resultados se concentrou entre 190 (azul claro) e 205 $\text{HV}_{0,5}$ (verde), coincidindo com a faixa entre 180 e 200 $\text{HV}_{0,5}$ encontrada por Wang et al. (2019) em paredes finas de aço inoxidável 316L também depositadas com MADA.

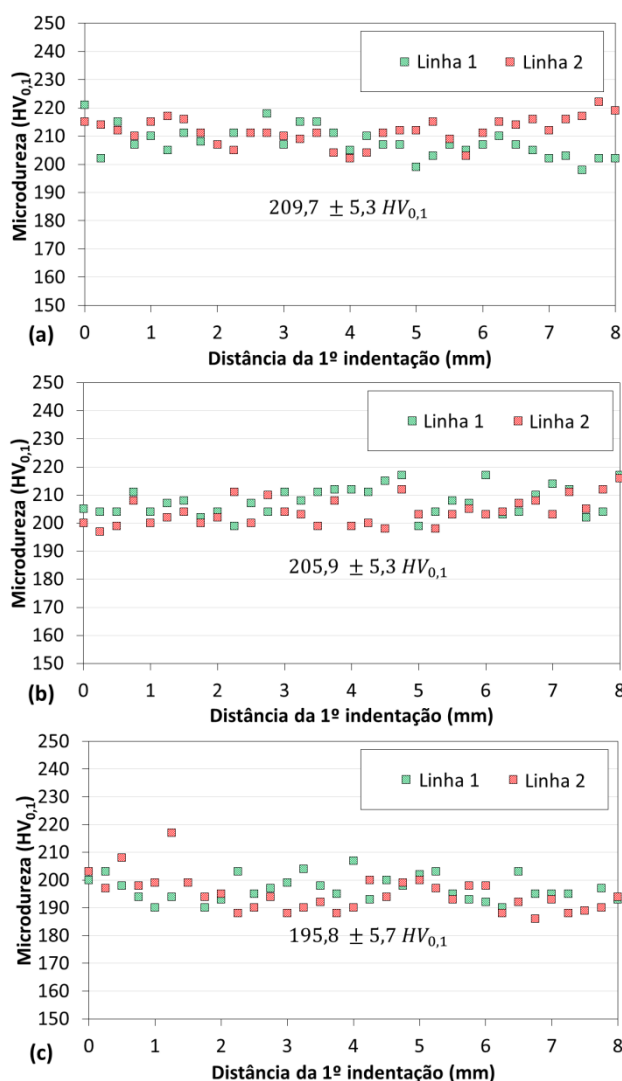


Figura 4.17 – Perfis de microdureza das paredes utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 (2%CO₂ + Ar); (b) mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) e (c) mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar)

A Figura 4.19 apresenta as macrografias das seções transversais das paredes finas. A partir dessas imagens, pode-se notar que, em geral, nenhuma descontinuidade (falta de fusão, trincas, porosidades) foi observada. Além disso, mais uma vez, torna-se nítido o melhor acabamento de superfície (menor ondulação lateral) obtido com as misturas 1 (2%CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar), e a formação de uma geometria mais irregular com a mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar).

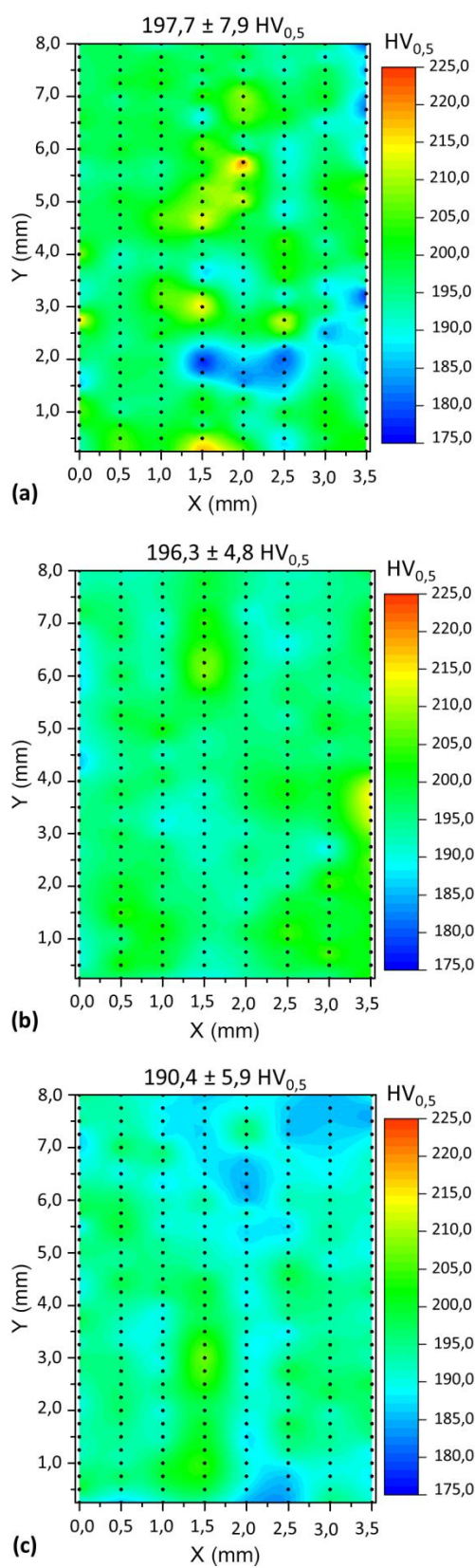


Figura 4.18 – Mapas de microdureza das paredes utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 (2%CO₂ + Ar); (b) mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) e (c) mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar) (os pontos pretos indicam as posições das indentações)

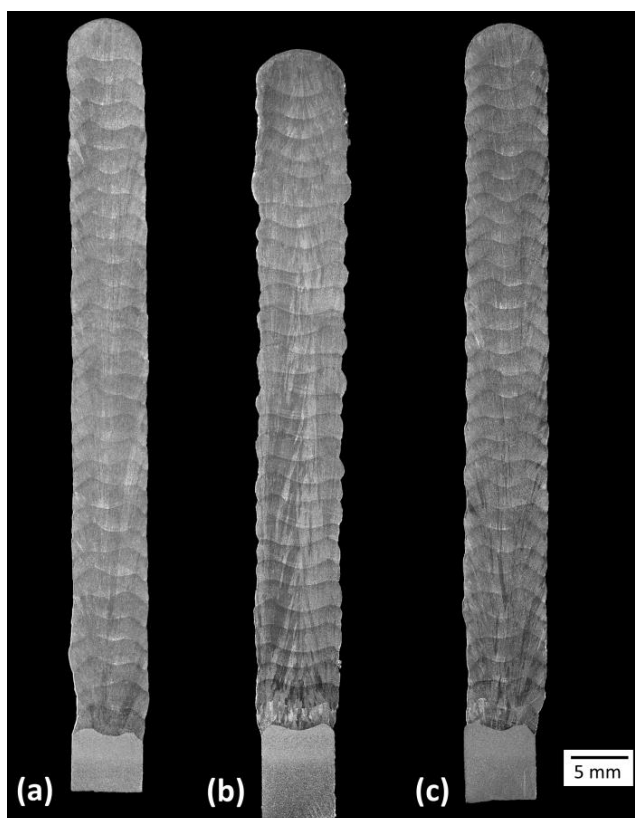


Figura 4.19 – Macrografias das seções transversais das paredes utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 ($2\%CO_2 + Ar$); (b) mistura 2 ($2\%H_2 + 20\%He + 500ppmCO_2 + Ar$) e (c) mistura 3 ($1\%CO_2 + 1\%H_2 + Ar$)

Para melhor discutir os resultados de microestrutura, a Tabela 4.6 apresenta a composição química do arame. O arame AWS ER316LSi é um aço inoxidável austenítico. Conforme mencionado por Kou (2003), esses aços possuem uma matriz austenítica (estrutura CFC) com quantidades variáveis de ferrita- δ (estrutura CCC). Uma quantidade adequada de ferrita- δ é essencial nesses materiais, já que muita ferrita- δ ($\geq 10\%$) tende a reduzir a ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão, enquanto pouca ferrita- δ ($\leq 5\%$) torna a microestrutura susceptível a trincas de solidificação. Considerando a importância desta fase, o diagrama de Schaeffler foi utilizado para prever o teor de ferrita- δ nas paredes depositadas. Os valores de cromo (Cr_{eq}) e níquel (Ni_{eq}) equivalentes foram determinados com base na composição química da Tabela 4.6, sendo iguais a 21,8% e 12,6%, respectivamente. Conforme visto no diagrama constitucional da Figura 4.20, o teor de ferrita- δ previsto é de cerca de 9% e está dentro da faixa ideal.

Tabela 4.6 – Composição química (% em peso) do arame AWS ER316LSi medida por espectroscopia de emissão óptica (dados cedidos pelo fornecedor)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0,018	1,770	0,880	0,006	0,024	11,230	18,380	2,080	0,100	Bal,

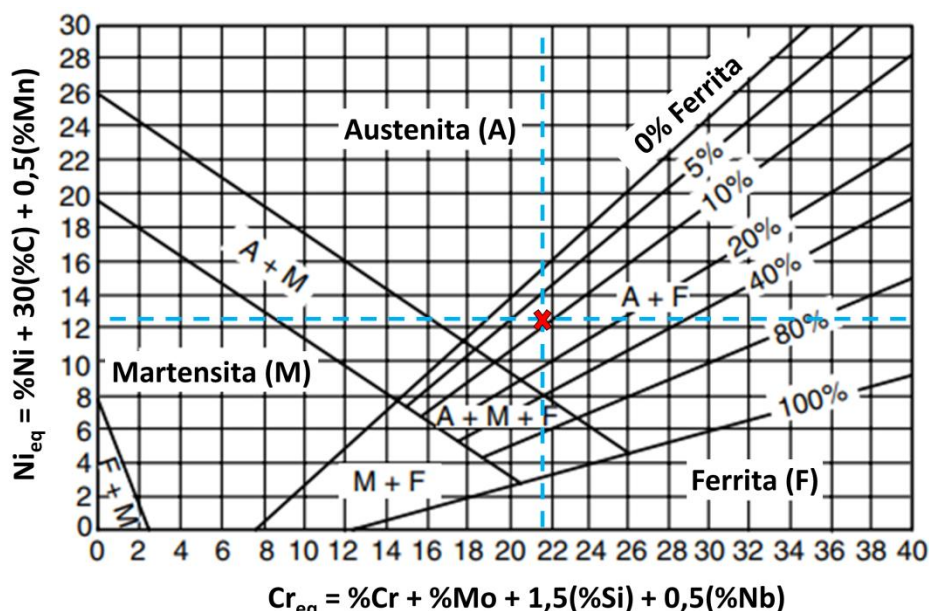


Figura 4.20 – Diagrama de constituição de Schaeffler (Schaeffler, 1949)

As Figuras 4.21 e 4.22 ilustram as microestruturas do centro e da região entre camadas usando ampliações de 200x e 500x, respectivamente. Como a microestrutura foi semelhante para a mesma região de interesse avaliada, ou seja, centro de camada e região entre camadas (ver Figura 4.9(b)), apenas as imagens correspondentes a CC1 e EC1 são apresentadas. A primeira vista, as dendritas parecem ser compostas por austenita- γ (fase branca) e as regiões interdendríticas por ferrita- δ (fase escura), ou seja, modo de solidificação AF. Entretanto, considerando apenas microscopia óptica, a análise microestrutural desta liga em condições diferentes do equilíbrio térmico pode ser de caráter indefinido. Por exemplo, ao se julgar pela literatura, poderia se dizer que nas Figuras 4.21 e 4.22 as dendritas são compostas por ferrita- δ (fase escura) e as regiões interdendríticas por austenita- γ (fase branca).

Por esta segunda linha de raciocínio, esta microestrutura é típica do modo de solidificação FA, ou seja, quando a solidificação ocorre como ferrita primária seguida pela formação de austenita ao final da solidificação. Uma formação majoritária de ferrita- δ com morfologia vermicular (também chamada em espinha) foi observada em ambas as regiões avaliadas, independentemente do gás de proteção considerado. Para corroborar, a Figura 4.23 exibe algumas microestruturas do modo de solidificação FA, as quais são caracterizadas como ferrita vermicular pela literatura. Conforme enfatizado por David (1981) e visualizado na Figura 4.23(b),

o aspecto da microestrutura pode variar de acordo com a orientação de crescimento das dendritas em relação a um dado plano de corte, mas ainda manter a morfologia. Dessa forma, já que ocorre uma extração de calor tridimensional na poça de fusão, a ferrita- δ com morfologia vermicular pode aparecer na forma de dendritas longas e alinhadas (laterais do cubo) ou com curvas suaves (topo do cubo). As duas formas são observadas nas Figuras 4.21 e 4.22.

Morfologias descontínuas de ferrita- δ (destacadas em vermelho na Figura 4.22) são observadas, principalmente, quando utilizada a Mistura 2 e nas regiões entre camadas. Estas microestruturas são compatíveis com a observada por David (1981) após tratar termicamente, por 10 min e a uma temperatura de 1050 °C, um aço inoxidável austenítico (AWS ER308) que possuía antes do tratamento ferrita- δ com morfologia vermicular (Figura 4.24). Conforme discutido pelo autor, a formação de tal microestrutura pode estar relacionada com a dissolução da ferrita- δ . Para facilitar o entendimento, a Figura 4.25 apresenta um diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni considerando 63% (em peso) de Fe, que foi o diagrama encontrado com o teor de Fe mais próximo ao estimado para o arame utilizado (65,56%). A linha pontilhada no diagrama considera os valores de Cr_{eq} e Ni_{eq} calculados a partir da Tabela 4.6. Algumas publicações (Lundin e Chou, 1985; Chen e Chou, 1999) já observaram uma dissolução de ferrita- δ em soldagem multipasses ou durante o reparo de soldas de aço inoxidável austenítico. Isso acontece quando o material é reaquecido abaixo da linha γ -solvus, que está logo abaixo da região bifásica $\gamma + \delta$ e é destacada na Figura 4.25. Como vários ciclos térmicos são estabelecidos durante a construção de uma parede via MADA, a mesma região pode experimentar temperaturas logo abaixo da linha γ -solvus várias vezes. Porém, somente através da simulação numérica seria possível avaliar quantas vezes isso aconteceu em cada parede para uma mesma região.

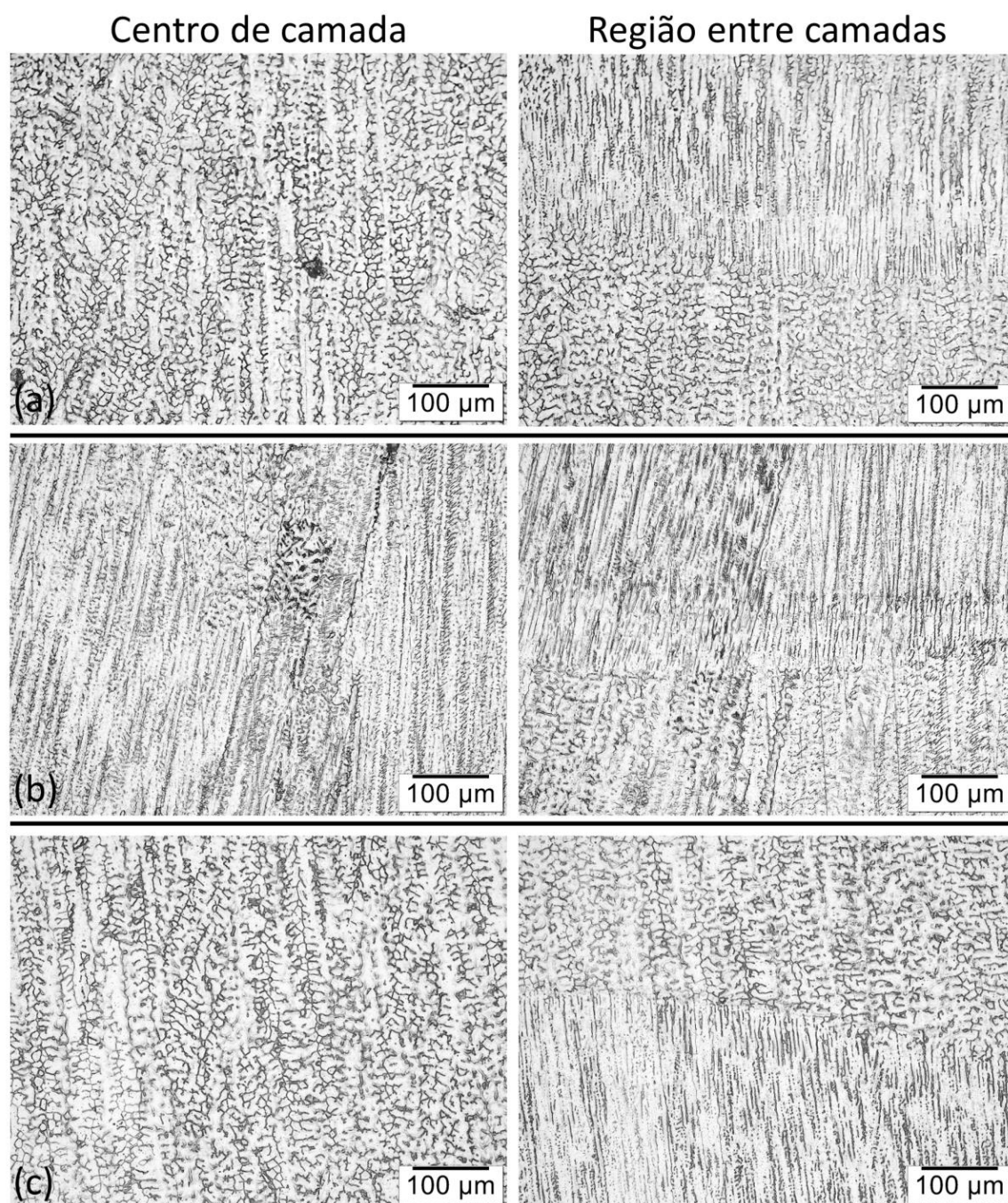


Figura 4.21 – Microestruturas (ampliação de 200x) das paredes utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 (2%CO₂ + Ar); (b) mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) e (c) mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar)

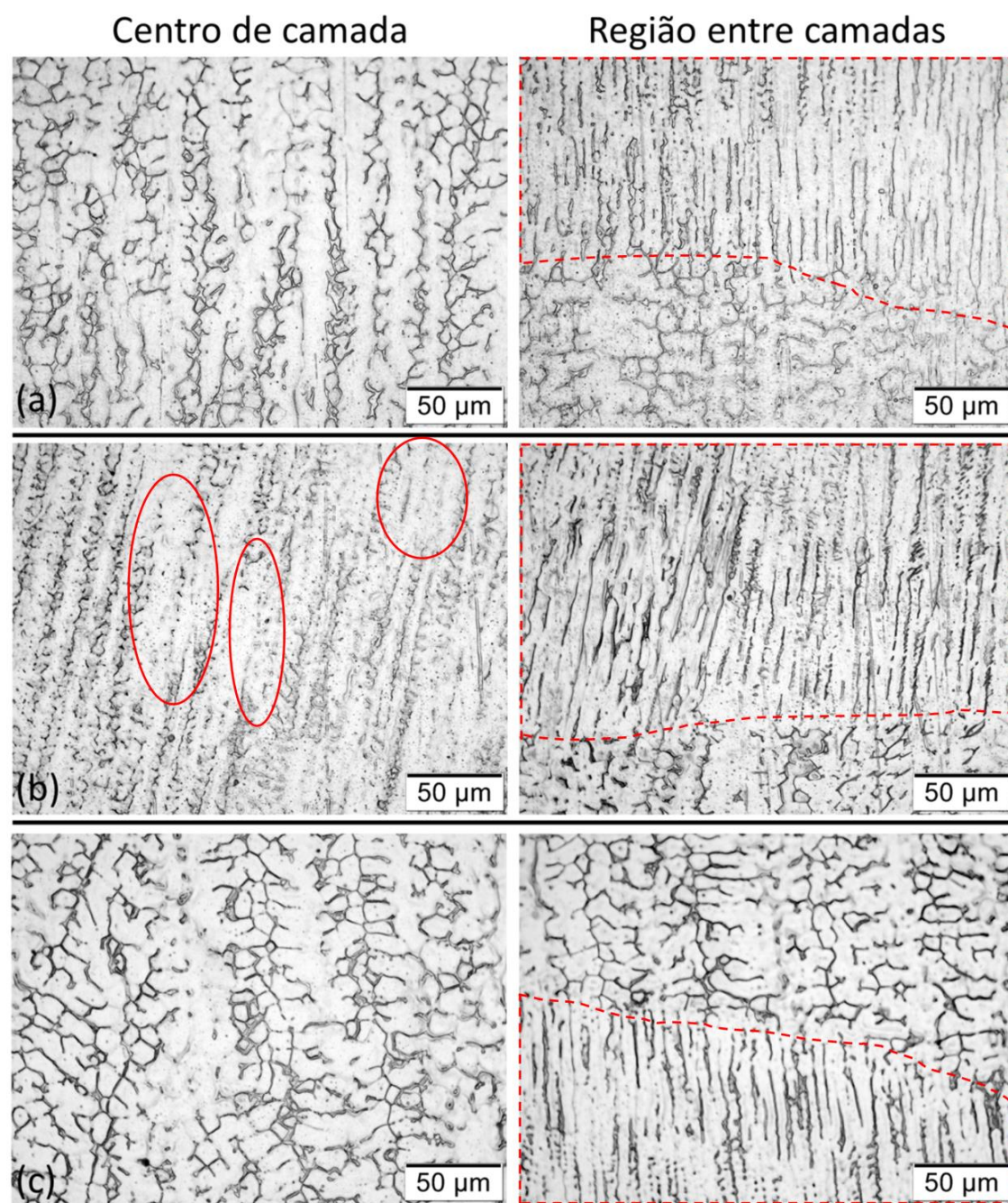


Figura 4.22 – Microestruturas (ampliação de 500x) das paredes utilizando como gases de proteção: (a) mistura 1 (2%CO₂ + Ar); (b) mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) e (c) mistura 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar)

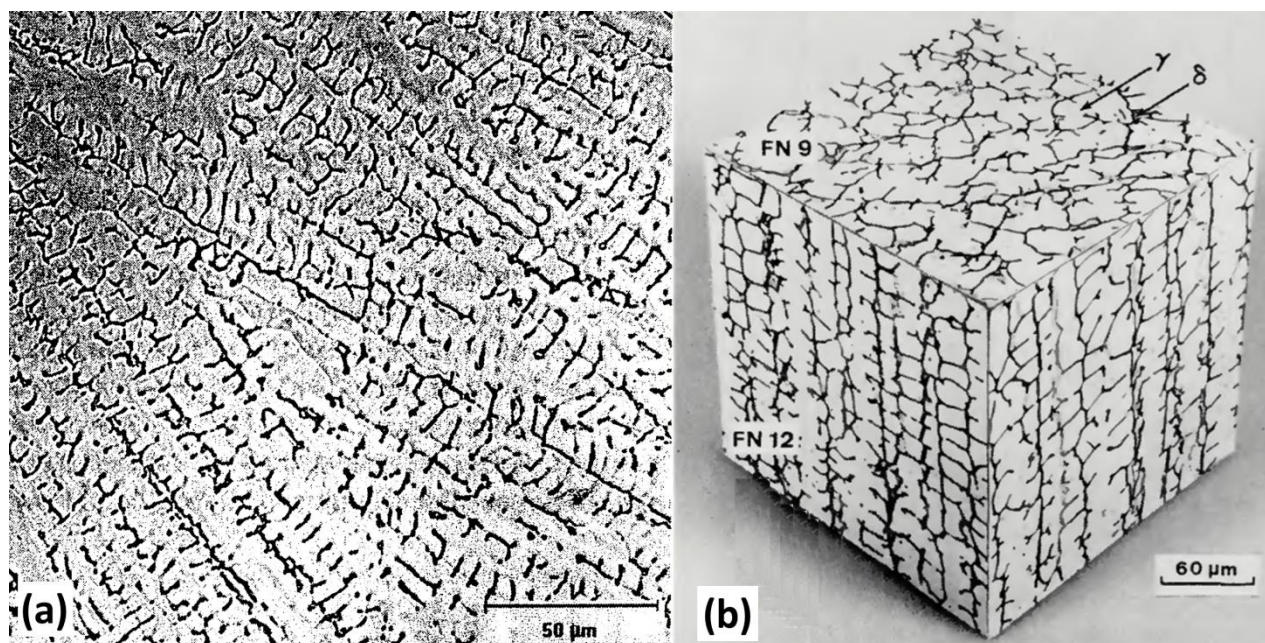


Figura 4.23 – Microestruturas do modo de solidificação FA: (a) ferrita- δ com morfologia vermicular (Adaptado de Lippold e Kotecki, 2005); (b) ferrita- δ com morfologia vermicular considerando diferentes planos de corte (Adaptado de David, 1981)

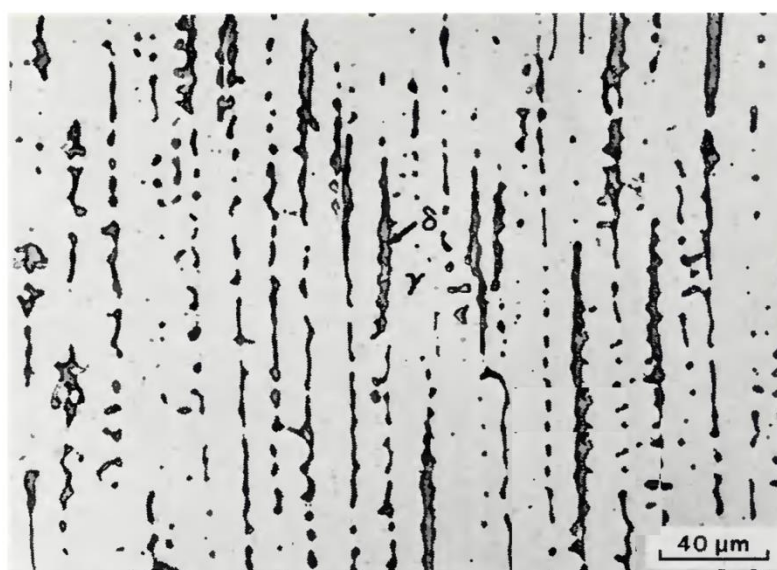


Figura 4.24 – Microestrutura de uma amostra com ferrita- δ vermicular após tratamento térmico por 10 min e a uma temperatura de 1050 °C (David, 1981)

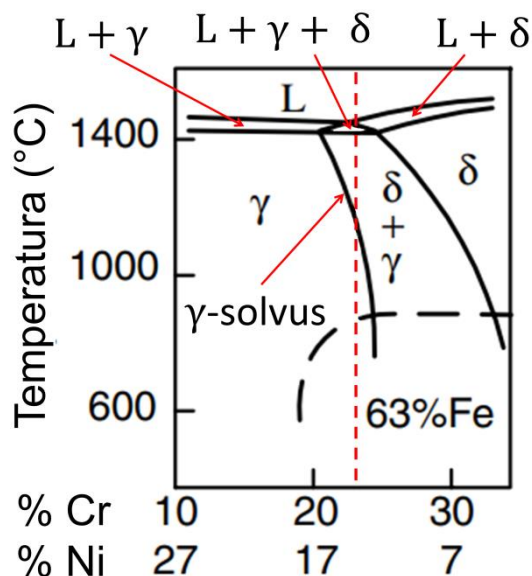


Figura 4.25 – Diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni, considerando 63% (em peso) de Fe e $Cr_{eq} = 22\%$ e $Ni_{eq} = 13\%$ (Adaptado de Kou e Le, 1982)

Para complementar as discussões, a Figura 4.26 apresenta os teores de ferrita- δ quantificados usando um ferritoscópio ao longo do centro do comprimento das paredes e na última camada depositada (ver tópico 4.3.3). Comparando a última camada depositada com as do centro, percebe-se que o teor de ferrita- δ sempre diminuiu, indicando uma dissolução parcial para todos os gases de proteção avaliados. Contudo, a mistura 2 apresentou maior diferença em termos dos valores médios (2,4 %), sugerindo maior dissolução de ferrita- δ . Devido à presença de gases com alta capacidade de troca de calor (H_2 , He e CO_2) e também ao maior nível de energia alcançado (Tabela 4.4), um maior aporte de calor pode ser obtido com a mistura 2 (2% H_2 + 20%He + 500ppm CO_2 + Ar). Caso isso ocorra, menores taxas de resfriamento seriam obtidas e maiores tempos logo abaixo da linha γ -solvus poderiam ser atingidos, justificando a maior dissolução de ferrita observada. Além disso, os teores de ferrita na última camada foram maiores para as misturas 1 (2% CO_2 + Ar) e 3 (1% CO_2 + 1% H_2 + Ar), sendo próximos do valor estimado pelo diagrama de Schaeffler (9%). O menor teor de ferrita na última camada para a mistura 2 pode indicar maior evaporação de elementos formadores de ferrita, o que reforça a hipótese de maior aporte de calor para esta mistura.

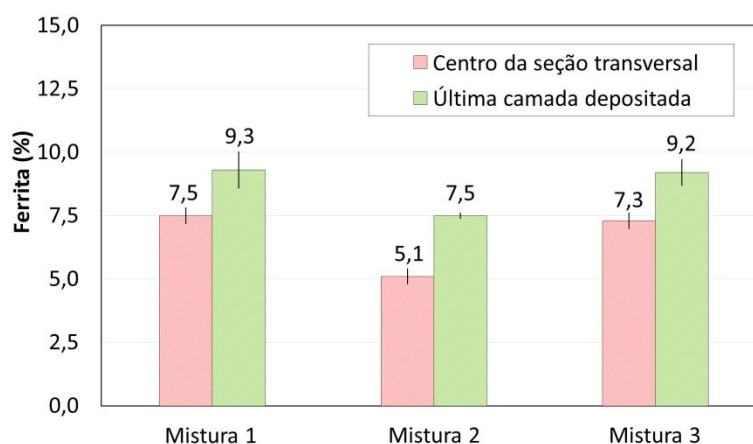


Figura 4.26 – Teor de ferrita medido usando um ferritoscópio ao longo do centro das seções transversais e na última camada depositada

4.5 Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo apresentar a proposição de uma metodologia de comparação entre diferentes gases de proteção que possibilite a confecção de paredes finas com o maior número possível de variáveis constantes e a maior regularidade de transferência metálica possível entre os diferentes gases. Para validar a metodologia e achar o efeito de diferentes gases sobre a confecção de paredes finas com MADA, avaliou-se o efeito de gases de proteção contendo diferentes teores de Ar, He, CO₂ e H₂ sobre os aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas depositadas por MADA com um aço inoxidável austenítico.

Uma metodologia de comparação foi proposta considerando a utilização do processo CMT. Esta se baseia em empregar diferentes valores de velocidade de alimentação configurada (VA_{config}) para manter a mesma corrente média (I_m), implicando em diferentes velocidades de alimentação média (VA_m). E, ao mesmo tempo, alterar a velocidade de deslocamento (VD) para manter a mesmas quantidades de material depositado por unidade de comprimento (mesma relação VA_m/VD). Além de garantir a manutenção do maior número de variáveis possíveis entre os gases avaliados, a metodologia proposta também permitiu o alcance da maior regularidade de transferência metálica possível com cada gás de proteção por meio da alteração de parâmetros de ajuste do processo CMT.

Com relação a análise do efeito de diferentes gases, verificou-se de forma quantitativa uma maior regularidade de transferência metálica com as misturas 1 (2%CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar). O uso da mistura 1 (2%CO₂ + Ar) como gás de proteção resultou em menores larguras (externa e efetiva) e, conseqüentemente, maior altura de camada. As ondulações laterais foram iguais entre as misturas 1 (2%CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar), mas um pouco

maiores com a mistura 2 (2% H_2 + 20%He + 500ppm CO_2 + Ar). Além disso, a mudança dos gases de proteção não exerceu nenhuma alteração significativa entre os resultados de microdureza, e o uso da mistura 2 (2% H_2 + 20%He + 500ppm CO_2 + Ar) levou a uma menor quantidade de ferrita- δ em relação aos outros gases de proteção avaliados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Conforme descrito no Capítulo I, o desenvolvimento experimental da tese é apresentado nos Capítulos II, III e IV, os quais, apesar de interconectados pelo objetivo geral da tese, apresentam seus próprios objetivos específicos. Desta forma, as conclusões abaixo são divididas por capítulos da tese.

- a) No que diz respeito a: verificar a possibilidade de parametrizar paredes finas depositadas por MADA, baseado em um envelope de trabalho pré-existente feito com um material diferente e comum (transportabilidade) - Capítulo II, OE 2.1; e investigar se o envelope de trabalho pode ser usado como ferramenta de seleção de parâmetros para uma largura da parede alvo, em termos de características operacionais, tais como o acabamento da superfície, o tempo ativo de deposição, a energia do arco (que governa a microestrutura e a microdureza) - Capítulo II, OE 2.2. Tem-se:
- Em relação ao OE 2.1, é possível selecionar parâmetros para paredes finas depositadas por MADA com um número muito pequeno de experimentos se utilizado um envelope de trabalho pré-existente para outro material (transportabilidade de parâmetros), implicando em menor tempo e consumo de recursos antes da deposição de um componente final. No entanto, é essencial mencionar que os desvios entre os valores previstos e medidos são altamente dependentes da compatibilidade dos metais de adição em termos das propriedades físico-químicas. Assim, nem toda parametrização com outros materiais (diferentes classes) utilizando esta abordagem será necessariamente bem-sucedida sem algum grau de adaptação;
 - Em relação ao OE 2.2, o uso da abordagem de envelope de trabalho combinado às superfícies de resposta torna a seleção de parâmetros mais intuitiva e, portanto, pode ser usada como ferramenta de parametrização para atingir uma largura de parede alvo.
- b) No que diz respeito a: avaliar o efeito combinado da temperatura intercamadas com a velocidade de deslocamento para uma dada velocidade de alimentação sobre

aspectos operacionais (aspecto superficial, tempo de produção e perfil de temperatura), geométricos e metalúrgicos (microestrutura e microdureza) em paredes finas de mesma largura depositadas por MADA, usando ou não uma abordagem de resfriamento ativo - Capítulo III, OE 3.1; definir uma faixa operacional de temperatura intercamadas - Capítulo III, OE 3.2; e avaliar o efeito isolado da temperatura intercamadas sobre aspectos operacionais (aspecto superficial, tempo de produção e perfil de temperatura) e geométricos em paredes finas depositadas por MADA - Capítulo III, OE 3.3. Tem-se:

- Em relação ao OE 3.1 (restrito a mesma largura efetiva e mesma velocidade de alimentação):
 - Um melhor acabamento superficial foi obtido para maiores combinações de temperatura intercamadas (TI) com velocidade de deslocamento (VD), independentemente da abordagem de resfriamento (resfriamento natural (RN) ou resfriamento ativo por quase imersão (RAQI)), mas não foram evidenciadas diferenças entre RN e RAQI para a mesma combinação de TI com VD;
 - Menores tempos de produção foram obtidos quando se aumentou a combinação de TI com VD. Para a mesma combinação de parâmetros, um menor tempo de produção foi alcançado com RAQI do que com RN;
 - Em relação ao perfil de temperatura, uma maior variabilidade de temperatura ao longo do comprimento da camada ($\Delta T/\Delta L$) foi constatada para maiores combinações de TI com VD e quando o RAQI foi empregado (ponto de medição de temperatura 30 mm à frente do arco);
 - De fato, larguras efetivas iguais ou muito próximas entre si foram alcançadas com as diferentes combinações de parâmetros e abordagens de resfriamento utilizadas. No entanto, a largura externa, a ondulação lateral e a altura da camada tenderam a diminuir à medida que os valores de TI e VD foram aumentados. Para a mesma combinação de TI com VD, as abordagens de resfriamento (RN ou RAQI) não afetaram as características geométricas, praticamente;
 - Considerando o aço de baixa liga alta resistência empregado, não foram evidenciadas diferenças microestruturais marcantes com a mudança das combinações de parâmetros (TI com VD) ou das abordagens de resfriamento (RN ou RAQI) visando atingir a mesma largura efetiva. No entanto, certo nível de revenimento (redução da microdureza) foi observado nas paredes depositadas com RN usando maiores combinações de TI com VD.

- Em relação ao OE 3.2:
 - Considerando os níveis de VA e VD escolhidos para desenvolver os experimentos do Capítulo III, uma faixa de TI entre 100 e 500 °C mostrou-se adequada para operar com este material, pois não houve colapso da poça de fusão.
- Em relação ao OE 3.3 (restrito a mesma combinação de velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento):
 - O aspecto superficial não sofreu variações à medida que a TI foi alterada;
 - O aumento da TI levou a tempos de produção mais curtos;
 - Em relação ao perfil de temperatura, quanto maior a TI, maior foi a variabilidade da temperatura ao longo do comprimento da camada ($\Delta T/\Delta L$), quantificada em °C/mm;
 - Em geral, o aumento de TI implicou em maiores larguras externas e efetivas, e menores alturas de camadas.
- c) No que diz respeito a: propor uma metodologia de comparação entre os diferentes gases de proteção que possibilite a confecção de paredes finas com o maior número possível de variáveis sendo mantido constante, mas também a maior regularidade de transferência metálica possível entre os diferentes gases - Capítulo IV, OE 4.1; e avaliar o efeito de gases de proteção contendo diferentes teores de adições em Ar sobre os aspectos operacionais, geométricos e metalúrgicos de paredes finas depositadas por MADA com um aço inoxidável austenítico - Capítulo IV, OE 4.2. Tem-se:
- Em relação ao OE 4.1, uma metodologia de comparação sistemática considerando a utilização do processo CMT pôde ser proposta. Nesse caso, critérios foram estabelecidos para manter a maior quantidade de variáveis e também a pressão exercida pelo arco o mais constante possível entre os diferentes gases. Esta metodologia se baseia em empregar diferentes valores de velocidade de alimentação configurada (VA_{config}) para manter a mesma corrente média (I_m), implicando em diferentes velocidades de alimentação média (VA_m). E, ao mesmo tempo, alterar a velocidade de deslocamento (VD) para manter a mesmas quantidades de material depositado por unidade de comprimento (mesma relação VA_m/VD). Além disso, parâmetros de ajuste do processo CMT (correção do comprimento do arco e correção dinâmica) foram modificados para possibilitar a melhor regularidade de transferência metálica possível com cada gás de proteção utilizado;
- Em relação ao OE 4.2:

- Uma maior regularidade de transferência metálica foi constatada com as misturas 1 (2%CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar), já que apresentaram menor índice de regularidade de transferência metálica (IV_{cc}). Porém, foi difícil estabelecer diferenças entre os gases usando abordagens qualitativas (oscilogramas e ciclogramas);
- Considerando os critérios de comparação estabelecidos, a mistura 1 (2%CO₂ + Ar) resultou em menores larguras (externa e efetiva) e, conseqüentemente, maior altura de camada. As ondulações laterais foram iguais entre as misturas 1 (2%CO₂ + Ar) e 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar), mas um pouco maiores (pior acabamento da superfície) com a mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar);
- Para uma parede fina com as mesmas dimensões (largura x altura x comprimento), o tempo total de deposição (T_{TD}) quantificado foi menor com a mistura 1 (2%CO₂ + Ar), seguida pelas misturas 3 (1%CO₂ + 1%H₂ + Ar) e 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar). Além disso, quanto maior o tempo de espera, maior foi a diferença entre os gases avaliados em termos do T_{TD} ;
- Nenhuma descontinuidade (falta de fusão, porosidades, trincas) foi observada nas seções transversais das paredes. A mudança dos gases de proteção não exerceu nenhuma alteração significativa entre os resultados de microdureza. A mistura 2 (2%H₂ + 20%He + 500ppmCO₂ + Ar) levou a uma menor quantidade de ferrita- δ em relação aos outros gases de proteção avaliados.

Satisfazendo o objetivo geral, avaliou-se como diferentes variáveis do processo GMA se relacionam entre si, por meio da combinação de VA com VD (Capítulo II), e de TI com VD (Capítulo III) para atingir uma largura efetiva de interesse. Conforme apresentado, estas combinações de parâmetros afetam o desempenho das paredes, cabendo ao usuário do processo decidir qual combinação utilizar para atingir uma dada largura efetiva em função de uma característica (acabamento da superfície, tempo de produção) que se pretende dar prioridade. Além disso, no que diz respeito a viabilizar uma parametrização robusta, eficiente e eficaz de paredes finas para usuários do processo, as seguintes alternativas são propostas:

- O uso de um envelope de trabalho pré-existente durante a parametrização de outro material da mesma classe, já que implica em menor tempo e consumo de recursos antes da deposição de um componente final;
- A utilização da abordagem de envelope de trabalho combinado às superfícies de resposta para otimizar a seleção de parâmetros para uma largura da parede alvo, pois facilita a visualização do efeito das variáveis do processo;
- O uso de maiores combinações de temperatura intercamadas (TI) com velocidade de

deslocamento (VD) considerando a mesma largura efetiva, velocidade de alimentação e abordagem de resfriamento, já que resulta em melhor acabamento superficial e menor tempo de produção;

- O uso da metodologia de comparação proposta no Capítulo IV para comparar diferentes gases de proteção utilizando o processo CMT. Esta metodologia viabiliza uma parametrização consistente, pois, além de garantir a manutenção do maior número de variáveis e também a pressão exercida pelo arco o mais constante possível entre os diferentes gases, possibilita a maior regularidade de transferência metálica possível entre os diferentes gases pela mudança dos parâmetros de ajuste do CMT.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar os dados e informações obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho, as seguintes sugestões são propostas:

- Conduzir ensaios de tração ao longo dos eixos horizontal e vertical das paredes a fim de avaliar se os resultados do ensaio se mantêm (como constatado pelos resultados de microdureza) ou se variam à medida que diferentes combinações de VA com VD e TI com VD, e diferentes gases de proteção são utilizados;
- Conduzir simulações numéricas dos ciclos térmicos nas paredes depositadas com o aço ARBL (AWS ER90S-B3) considerando diferentes posições ao longo da camada, visando entender o histórico térmico e investigar quais microconstituintes levaram ao comportamento cíclico observado durante ensaios de microdureza;
- Conduzir simulações numéricas dos ciclos térmicos nas paredes depositadas com o aço inoxidável (AWS ER316LSi) considerando diferentes posições ao longo da camada, visando entender o histórico térmico e comprovar que tempos mais longos abaixo da linha γ -solvus foram atingidos com a mistura 2 (2% H_2 + 20%He + 500ppm CO_2 + Ar), justificando a maior dissolução de ferrita- δ observada;
- Uma vez que a parede de aço inoxidável (AWS ER316LSi) depositada com a mistura 2 (2% H_2 + 20%He + 500ppm CO_2 + Ar) apresentou teores de ferrita- δ próximos de 5 %, torna-se importante propor e avaliar uma metodologia capaz de verificar a susceptibilidade a trincas de solidificação em paredes depositadas por MADA.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHSAN, M. R.; KIM, Y. R.; ASHIRI, R.; CHO, Y.J.; JEONG, C.; PARK, Y. D. Cold Metal Transfer (CMT) GMAW of Zinc-Coated Steel. **Welding Journal**, v.95, p. 120s – 132s, 2016.

ALDALUR, E.; VEIGA, F.; SUÁREZ, A.; BILBAO, J.; LAMIKIZ, A. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 615–626, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.060>

ALI, Y.; HENCKELL, P.; HILDEBRAND, J.; REIMANN, J.; BERGMANN, J.P.; BARNIKOL-OETTLER, S. Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 269, p.109–116, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Welding, brazing and soldering**. ASM international, vol. 6, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2022. ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. American Welding Society, vol. 1, 8ª Ed., 1987.

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações**. McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, p. 819, 2007.

CHEN, M.H.; CHOU, C.P. Effect of thermal cycles on ferrite content of austenitic stainless steel. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 4, n.1, p. 58-62, 1999. <https://doi.org/10.1179/stw.1999.4.1.58>

CHEN, W.; CHEN, Y.; ZHANG, T.; WEN, T.; YIN, Z.; FENG, X. Effect of ultrasonic vibration and interpass temperature on microstructure and mechanical properties of Cu-8Al-2Ni-2Fe-2Mn

alloy fabricated by wire arc additive manufacturing. **Metals**, v. 10, n. 2, p. 215, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10020215>

COSTA, T. F.; BENEDETTI FILHO, E.; AREVALO, H. D. H.; VILARINHO, L. O. Avaliação de Processos MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 4, p. 356-368, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000400010>

DA SILVA, L. J. Near-Immersion Active Cooling for Wire + Arc Additive Manufacturing: From Concept To Application Near-Immersion Active Cooling for Wire + Arc Additive. p. 140, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2422>

DA SILVA, L. J.; FERRARESI, H. N.; ARAÚJO, D. B.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Effect of Thermal Management Approaches on Geometry and Productivity of Thin-Walled Structures of ER 5356 Built by Wire + Arc Additive Manufacturing. **Coatings**, v. 11, n. 9, p.1141, 2021b. <https://doi.org/10.3390/coatings11091141>

DA SILVA, L. J.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. The potential of IR pyrometry for monitoring interpass temperature in wire + arc additive manufacturing. **Evolutions in Mechanical Engineering**, v.3, n. 1, p. 553, 2019. <http://dx.doi.org/10.31031/eme.2019.03.000553>

DA SILVA, L. J.; SOUZA, D. M.; DE ARAÚJO, D. B.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107: 2513–2523, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>

DA SILVA, L. J.; TEIXEIRA, F.R.; ARAÚJO, D. B.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Work Envelope Expansion and Parametric Optimization in WAAM with Relative Density and Surface Aspect as Quality Constraints: The Case of Al5Mg Thin Walls with Active Cooling. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 5, n.2, p. 40, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020040>

DAHAT, S.; HURTIG, K.; ANDERSSON, J.; SCOTTI, A. A Methodology to Parameterise Wire + Arc Additive Manufacturing: A Case Study for Wall Quality Analysis. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n.1, p. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>

DASS, A.; MORIDI, A. State of the Art in Directed Energy Deposition: from Additive Manufacturing to Materials Design. **Coatings**, v. 9, n. 7, p. 418, 2019. <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>

DAVID, S. A. Ferrite Morphology and Variations in Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds. **Welding Journal**, v. 60, n.4, p. 63s-71s, 1981.

DENG, Y.; ZHANG, J.; JIAO, K. Viscosity measurement and prediction model of molten iron. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 45, p. 773 – 777, 2018. <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1491171>

DEREKAR, K.; LAWRENCE, J.; MELTON, G.; ADDISON, A.; ZHANG, X.; XU, L. Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium alloy components. **MATEC Web Conf - International Conference on Advanced Welding and Smart Fabrication Technologies**, v. 269, p. 5001, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926905001>

DING, J.; COLEGROVE, P.; MEHNEN, J.; GANGULY, S.; SEQUEIRA-ALMEIDA, P. M.; FANG, F.; WILLIAMS, S. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. **Computational Materials Science**, v. 50, p. 3315–3322, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023>

DIRISU, P.; GANGULY, S.; MEHMANPARAST, A.; MARTINA, F.; WILLIAMS, S. Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components. **Materials Science and Engineering A**, v. 765, p.138285, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138285>

DYE, D.; HUNZIKER, O.; REED, R. C. Numerical analysis of the weldability of superalloys. **Acta Materialia**, v. 49, n. 4, p. 683–697, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00361-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00361-X)

GAULT, J.T. (2001). Universal shielding gas for GMAW and FCAW welding and process. Patente N° US6303891B1.

GENG, H.; LI, J.; XIONG, J.; LIN, X. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n.6, p. 472-483, 2016. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1259031>

HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A. E.; MONTEVECCHI, F.; CAMPATELLI, G. An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 52, p. 58-65, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.051>

HEIPLE, C. R.; ROPER, J. R. Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry. **Welding Journal**, p. 97s-102s.1982.

HERTEL, M.; NIESE, J.; ROSE, S.; HÄBLER, M.; FÜSSEL, U.; UHRLANDT, D. Experimental and numerical investigations into the influence of the shielding gas composition on the GMA spray arc process. **Welding and Cutting**, v. 14, n. 4, p. 234-241, 2015.

ISO/ASTM 52900, 2015. Additive manufacturing — General principles — Terminology. <https://www.iso.org/standard/69669.html?browse=tc>

JORGE, V. L.; SCOTTI, F. M.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 62, p. 655-669, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.072>

JORGE, V. L.; SCOTTI, F. M.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 62, p. 655-669, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.072>

JORGE, V.L.; TEIXEIRA, F. R.; SCOTTI, A. Pyrometrical interlayer temperature measurement in WAAM of thin wall: strategies, limitations and functionality. **Metals**, v. 12, n. 5, p. 765, 2022. <https://doi.org/10.3390/met12050765>

KEENE, B. J.; MILLS, K. C.; BROOKS, R.F. Surface properties of liquid metals and their effects on weldability. **Materials Science and Technology**, v.1, p. 559 – 567, 1985. <https://doi.org/10.1179/mst.1985.1.7.559>

KNEZOVIĆ, N.; GARAŠIĆ, I.; JURIC, I. Influence of the interlayer temperature on structure and properties of wire and arc additive manufactured duplex stainless steel product. **Materials**, v.13, n. 24, p. 5795, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13245795>

KOU, S. **Welding metallurgy**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2^a Ed., 2003.

KOU, S.; LE, Y. The effect of quenching on the solidification structure and transformation behavior of stainless steel welds. **Materials Science and Engineering A**, v.13, p. 1141–1152, 1982. <https://doi.org/10.1007/BF02645495>

KOZAMERNIK, N.; BRAČUN, D.; KLOBČAR, D. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.110, p. 1955–1968, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>

LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding**. Oxford: Pergamon Press. 2^a Ed. p. 340, 1996.

LIPPOLD, JOHN C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

LUNDIN, C. D.; CHOU, C. P. D. Fissuring in the “Hazard HAZ” region of austenitic stainless steel welds. **Welding Journal**, v. 64, n. 4, p. 113s-118s, 1985.

MA, C.; LI, C.; YAN, Y.; LIU, Y.; WU, X.; LI, D.; HAN, Y.; JIN, H.; ZHANG, F. Investigation of the in-situ gas cooling of carbon steel during wire and arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 67, p. 461-477, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.022>

MARINELLI, G.; MARTINA, F.; GANGULY, S.; WILLIAMS, S. Effect of shielding gas composition and welding speed on autogenous welds of unalloyed tungsten plates. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 85, p.105043, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105043>

MARTINA, F.; MEHNEN, J.; WILLIAMS, S. W.; COLEGROVE, P.; WANG, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p.1377–86, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>

MONDAIN–MONVAL. **The Physical Properties of Fluids at Elevated Temperatures**, IIW DOC 212-264-73, 1973.

MONTEVECCHI, F.; VENTURINI, G.; GROSSI, N.; SCIPPA, A.; CAMPATELLI, G. Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique. **Additive Manufacturing**, v. 21, p. 479-486, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007>

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

MUKHERJEE, T.; MANVATKAR, V.; DE, A.; DEBROY, T. Mitigation of thermal distortion during additive manufacturing. **Scripta Materialia**, v. 127, p. 79–83, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.09.001>

MÜLLER, J.; HENSEL, J.; DILGER, K. Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures. **Welding in the World**, v.66, p. 395-407, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01204-1>

NEMANI, A. V.; GHAFARI, M.; SALAHI, S.; LUNDE, J.; NASIRI, A. Effect of interpass temperature on the formation of retained austenite in a wire arc additive manufactured ER420 martensitic stainless steel. **Materials Chemistry and Physics**, v. 266, n. 1, p. 124555, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124555>

NORRISH, J. **Advanced Welding processes – Technologies and process control**. Woodhead Publishing Limited. p. 287. 2006.

PEPEL, S. I.; TSAREVSKII, B. V.; PAVLOV, V. V.; FURMAN, E. L. Combined influence of oxygen and sulphur on the surface tension of iron. **Izv. AN. SSR Metally**, v. 4, p. 54, 1975.

POSCH, G.; CHLADIL, K.; CHLADIL, H. Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries. **Welding in the World**, v. 61, n.5, p. 873–882, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0474-5>

POSCH, G.; WEBER, H.; SCHMITT, G. Innovative GMAW solutions for high-alloyed and nickelbase overlays. **OPE**. Kalpakkam, India: [s.n.], 2013.

SCHAEFFLER, A. L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. **Metal Progress**, v.56, n.11, p. 680-680B, 1949.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG - Melhor entendimento, Melhor desempenho**. Ed. Artliber Editora, 2ª Ed., p.284, 2008.

SCOTTI, F. M. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco de Paredes Finas de Aço Inoxidável Super Duplex Com Resfriamento Ativo Por Quase-imersão. p. 138, 2021. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.471>

SCOTTI, F.M.; TEIXEIRA, F.R.; DA SILVA, L. J.; DE ARAÚJO, D. B.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Thermal management in WAAM through the CMT advanced process and an active cooling technique. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 57, p. 23 – 35, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>

SHARMA, V.; SHAHI, A. S. Quenched and tempered steel welded with micro-alloyed based ferritic fillers. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 253, p. 2–16, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.039>

SHEN, C.; PAN, Z.; CUIURI, D.; DING, D.; LI, H. Influences of deposition current and interpass temperature to the Fe₃Al-based iron aluminide fabricated using wire-arc additive manufacturing process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.88, p. 2009–2018, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8935-3>

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V. C.; VILARINHO, L. V.; SCOTTI, A. Influence of the welding parameter setting on the MIG/MAG process stability working with short-circuiting. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, p. 22–32, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100004>

SPENCER, J. D.; DICKENS, P. M.; WYKES, C. M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 212, n. 3, p.175-182, 1998. <https://doi.org/10.1243/0954405981515590>

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 3, p. 218-228, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000300006>.

TEIXEIRA, F. R.; SCOTTI, F. M.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Effect of the CMT advanced process combined with an active cooling technique on macro and microstructural aspects of aluminum WAAM. **Rapid Prototyping Journal**, v. 27, n. 6, p.1206-1219, 2021. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0285>

TEIXEIRA, F. R.; SCOTTI, F. M.; VILARINHO, L. O.; DA MOTA, C. A. M.; SCOTTI, A. Transferability of the working envelope approach for parameter selection and optimization in thin wall WAAM. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, p. 969–989, 2022. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0285>

THOMAS, M.; BAXTER, G. J.; TODD, I. (2016) Normalized model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys. **Acta Materialia**, v. 108, p. 26 – 35, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.025>

TROMMER, G. Pulsgesteuerter Sprühlichtbogen. Der Praktiker 9/2009.

VAIDYA, V.V. Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. **Welding Journal**, v. 81, n. 9, p. 43-48, 2002.

VILARINHO, L. O.; ARAÚJO, D. B. (2019). Curtoweld. Computer program log. Patente Nº BR512019002019-7.

WANG, L.; XUE, J.; WANG, Q. Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel. **Materials Science & Engineering A**, v. 751, p. 183-190, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.078>

WU, B.; DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.; HAN, J.; FEI, Z. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 250, p. 304–312, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>

WU, B.; PAN, Z.; DING, D.; CUIURI, D.; LI, H.; FEI, Z. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 258, p. 97-105, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>

WU, B.; PAN, Z.; DING, D.; CUIURI, D.; LI, H.; XU, J.; NORRISH, J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of Manufacturing Processes** v. 35, p. 127–139, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

XIONG, J.; LI, R.; LEI, Y.; CHEN, H. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 251, p.12–9, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007>

YEHOROV, Y., DA SILVA, L.J., SCOTTI, A. Exploring the use of switchback for mitigating homoepitaxial unidirectional grain growth and porosity in WAAM of aluminium alloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 1581–1592, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03959-w>

ZHANG, B.; WANG, C.; WANG, Z.; ZHANG, L.; GAO, Q. Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 267, p. 167–76, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.011>

APÊNDICE

Análise crítica dos ciclogramas de tensão x corrente

Conforme verificado na seção 4.4, apesar de uma elevada regularidade de transferência metálica ser constatada pelo IV_{cc} e pelos oscilogramas, grandes dispersões entre as curvas de tensão x corrente foram observadas dentro de duas zonas do ciclogramas (1 e 2). A presente seção visa fornecer um melhor entendimento sobre tal dispersão evidenciada.

Em princípio, torna-se necessário entender cada região que compõe um ciclograma. A Figura 1(a) mostra um exemplo de um único ciclo CMT obtido com a linha sinérgica CMT 928 usando a mistura 1 (2%CO₂ + Ar), $VA_{config} = 4,9$ m/min, $VD = 35$ cm/min, $CA = -30$ e $CD = -4$. As diferentes regiões formadas no oscilograma da Figura 1(a) podem ser correlacionadas com as representadas no ciclograma da Figura 1(b) da seguinte forma:

- A região 1 do ciclograma corresponde ao período de curto-circuito, pois a tensão tende a zero e são observados baixos níveis de corrente;
- A região 2 corresponde ao início do período de arco, onde o comprimento do arco começa a aumentar (caracterizado pelo aumento da tensão), mas ainda em um nível baixo de corrente;
- A região 3 constitui a maior parte do período de arco aberto e se estabelece quando a corrente começa a aumentar, mas já em um nível elevado de tensão (comprimento de arco longo);
- A região 4 é aquela que antecede um novo curto-circuito, sendo caracterizada pela redução de tensão e corrente.

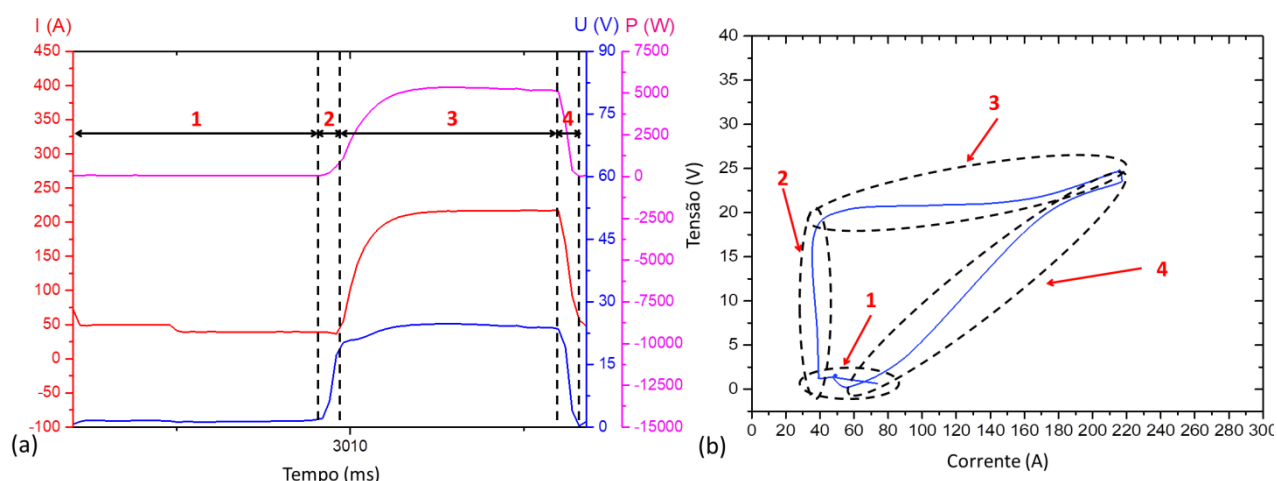


Figura 1 – (a) Oscilogramas de corrente (I), tensão (U) e potência (P) para um ciclo CMT típico e (b) seu ciclograma de tensão x corrente

Uma vez compreendido o que representa cada região do ciclograma, a Figura 2(a) mostra seis ciclos CMT obtidos com a mesma regulação de parâmetros mencionada anteriormente, enquanto a Figura 2(b) mostra os ciclogramas individuais correspondentes a cada um desses ciclos. Como visto, os ciclogramas do 1º, 2º e 4º ciclos têm comportamento semelhante (tipo A), sendo diferentes dos ciclogramas do 3º e 5º ciclos (tipo B) e também do ciclograma do 6º ciclo (tipo C). A diferença entre eles está na região que antecede um novo curto-circuito (região 4), que é caracterizada pela redução de tensão e corrente. Em resumo, como mostrado na Figura 3:

- O ciclograma do tipo A ocorre quando a corrente e a tensão diminuem de forma relativamente uniforme;
- O ciclograma do tipo B apresenta uma queda abrupta da corrente para níveis de alta tensão, seguida de uma queda abrupta da tensão para níveis baixos de corrente;
- O ciclograma do tipo C mostra uma queda abrupta da tensão para níveis de corrente elevados, seguida de uma redução acentuada da corrente para níveis de tensão baixos (comportamento oposto em relação ao tipo B).

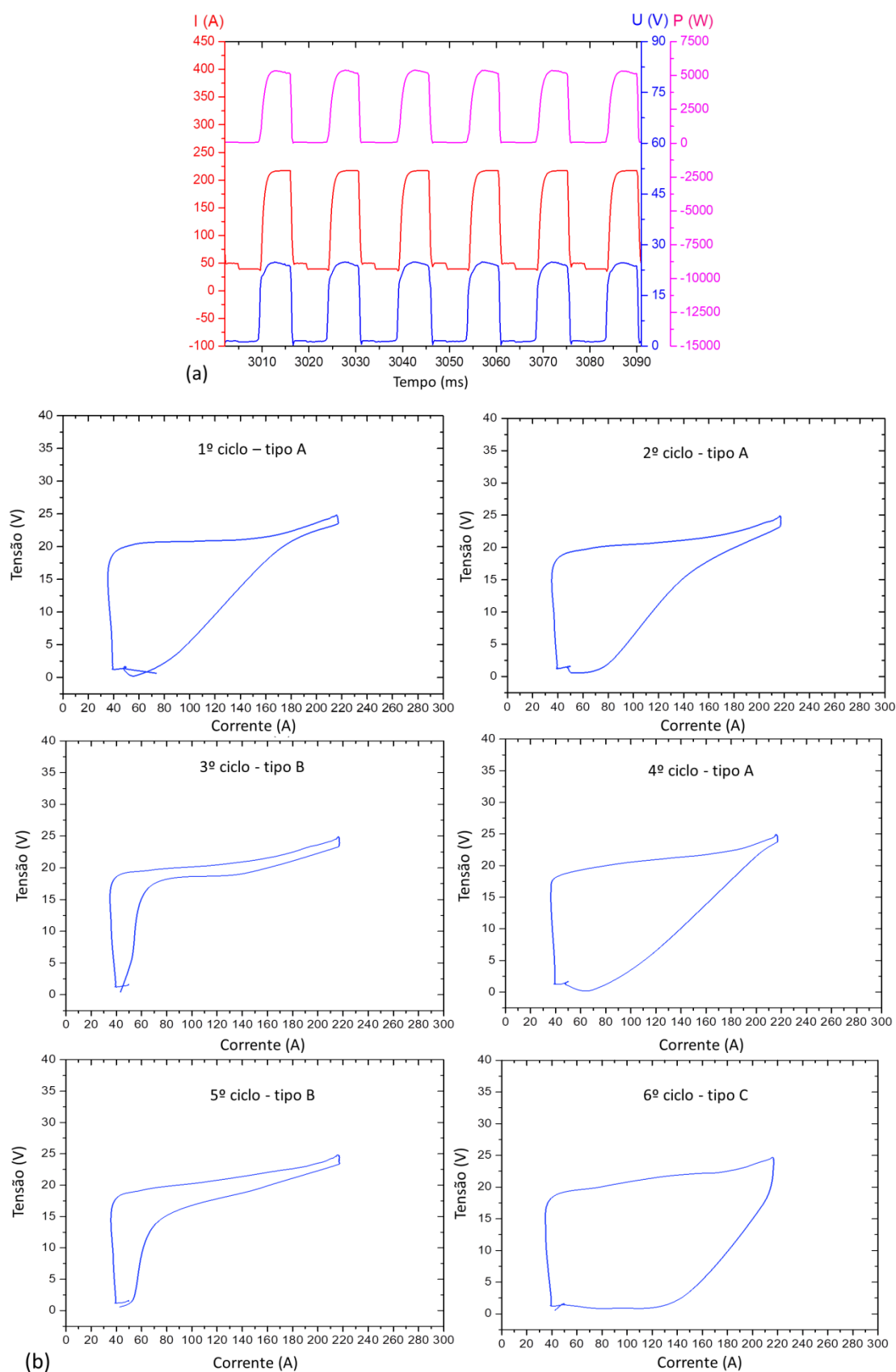


Figura 2 – Oscilogramas de corrente (I), tensão (U) e potência (P) para seis ciclos CMT e (b) seus respectivos ciclogramas de tensão x corrente

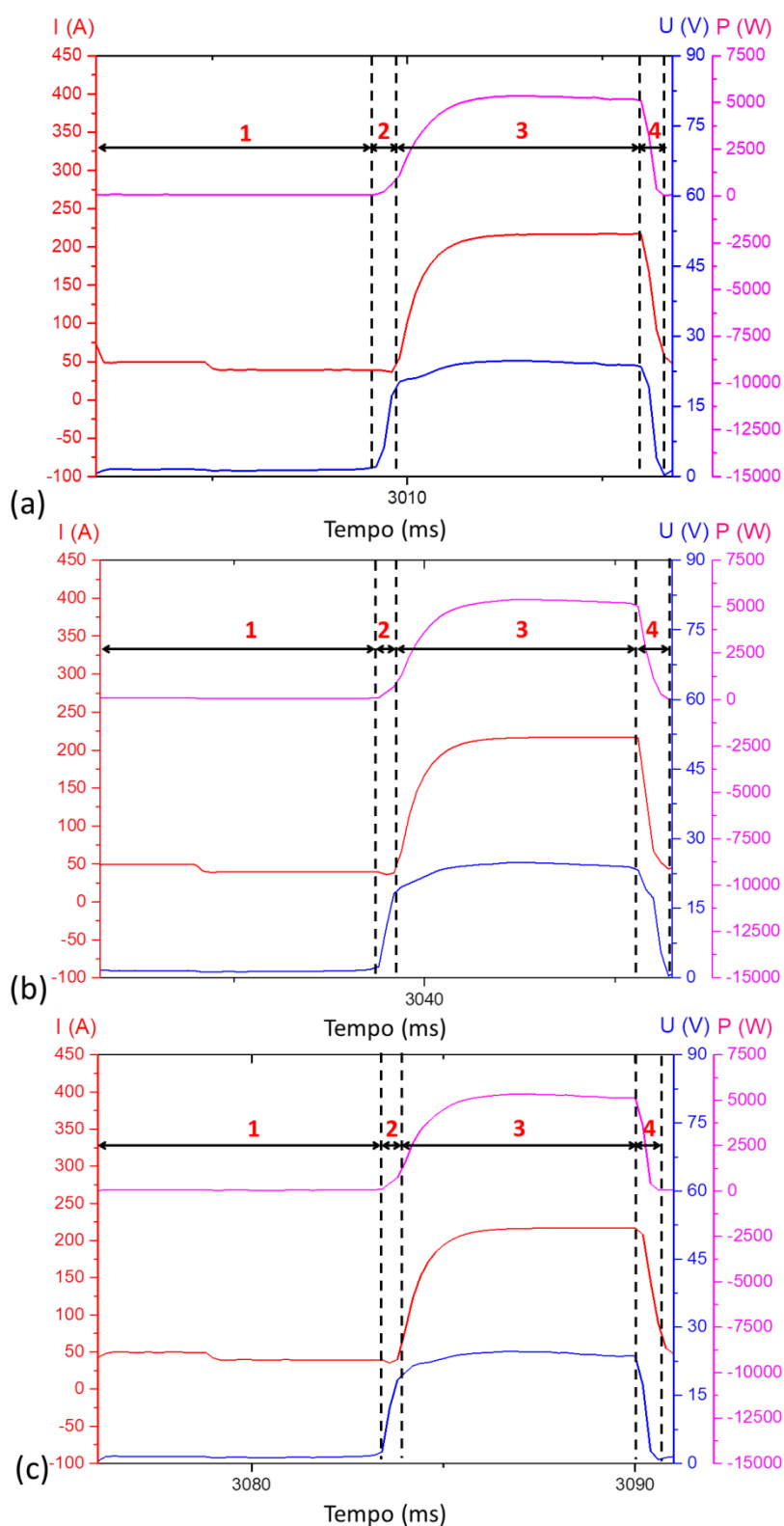


Figura 3 – Exemplos de oscilogramas de corrente (I), tensão (U) e potência (P) que levam à formação de ciclogramas do (a) tipo A, (b) tipo B e (c) tipo C

Com base em todo o raciocínio apresentado, pode-se dizer que:

- A zona de grande dispersão 1 (ver Figuras 4.11 ou 4.13(a)) provém dos picos de tensão estabelecidos no início dos períodos de arco em diferentes ciclos;
- A zona de grande dispersão 2 (ver Figuras 4.11 ou 4.13(a)) ocorreu devido a variações no sincronismo entre os sinais de corrente e tensão em um curto intervalo de tempo (na Figura 3, por exemplo, a média desta faixa foi igual a 1,9 ms) que precede o início de um novo curto-circuito.

Embora pequenas variações no sincronismo dos sinais de corrente e tensão sejam responsáveis por uma elevada dispersão dos ciclogramas, houve manutenção dos tempos de arco aberto e curto-circuito entre cada ciclo, o que resulta em uma alta regularidade de transferência metálica e que é quantificada via IV_{cc} . Diante disso, uma vez que os ciclogramas são fortemente influenciados por pequenas variações de sincronismo dos sinais (mesmo em intervalos de alguns milissegundos), a análise da regularidade da transferência nem sempre pode ser avaliada qualitativamente por meio desta ferramenta, já que existe a possibilidade de uma interpretação errônea.