

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUIS LUIGIOUV KIRVDOFF VARGAS DEL AGUILA

**MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO POR VISÃO COMPUTACIONAL
APLICADA À MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO DE UM AÇO
DUPLEX ER2209**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RIO GRANDE, RS

2026

LUIS LUIGIOUV KIRVDOFF VARGAS DEL AGUILA

**MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO POR VISÃO COMPUTACIONAL
APLICADA À MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO DE UM AÇO
DUPLEX ER2209**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Souza

Rio Grande - RS

2026

D331m	<p>Del Aguila, Luis Luigiouv Kirvdoff Vargas Monitoramento termográfico por visão computacional aplicada à manufatura aditiva por deposição a arco de um aço duplex ER2209 / Luis Luigiouv Kirvdoff Vargas del Aguila. – 2026.</p> <p>84 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2026.</p> <p>Orientador: Dr. Kleber Eduardo Bianchi Coorientador. Dr. Daniel Souza</p> <p>1. Engenharia Mecânica. 2.Manufatura aditiva por deposição a arco. 3. Câmera térmica. 4. Ciclos térmicos. 5. Aços inoxidáveis duplex. I. Bianchi, Kleber Eduardo. II. Souza, Daniel. II. Título.</p>
	CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 4/2026 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dois dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, no auditório localizado no prédio da Engenharia Mecânica, a que se submeteu o discente **Luis Luigiouv Kirvdoff Vargas del Aguila**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Simulação e Controle de Processos de Fabricação, com o seguinte título: **Monitoramento Termográfico por Visão Computacional Aplicada à Manufatura Aditiva por Deposição a Arco de um Aço Duplex ER2209**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Kleber Eduardo Bianchi, Daniel Souza, José Henrique Alano, Thais Andrezza dos Passos e o convidado Demóstenes Ferreira Filho sob a presidência do Professor Kleber Eduardo Bianchi. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Kleber Eduardo Bianchi: Aprovado
2. Daniel Souza: Aprovado
3. José Henrique Alano: Aprovado
4. Thais Andrezza dos Passos: Aprovado
5. Demóstenes Ferreira Filho: Aprovado

Foi concedido um prazo de 07 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. CPF: 440.783.230-49
 **KLEBER EDUARDO BIANCHI**
Data: 02/02/2026 17:57:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>
2. CPF: 038.828.186-38
 **DANIEL SOUZA**
Data: 02/02/2026 19:00:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>
3. CPF: 036.950.749-57
 **JOSÉ HENRIQUE ALANO**
Data: 02/02/2026 21:24:01-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>
4. CPF: 033.780.659-40
 **THAIS ANDREZZA DOS PASSOS**
Data: 02/02/2026 18:20:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>
4. CPF: 056.389.436-92
 **DEMOSTENES FERREIRA FILHO**
Data: 02/02/2026 18:12:34-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>
- Luis Luigiouv Kirvdoff Vargas del Aguila:  **LUIS LUGIOUV KIRVDOFF VARGAS DEL AGUILA**
Data: 02/02/2026 18:02:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



AVALIAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO- ENGENHARIAS III – QUADRIÊNIO 2025-2028

Instituição de ensino: Universidade Federal do Rio Grande - FURG	Programa: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Nome do candidato: Luis Luigiuv Kirvdoff Vargas del Aguila	
Título da dissertação: Monitoramento Termográfico por Visão Computacional Aplicada à Manufatura Aditiva por Deposição a Arco de um Aço Duplex ER2209	
Data da defesa: 02 / 02 / 2026	
<p style="text-align: center;">AVALIAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</p> <p>Pede-se à <u>banca examinadora</u> ou a <u>relator membro da banca</u> (a critério do programa), que avalie:</p> <p>1) Qual é a <u>contribuição da dissertação de mestrado à linha de pesquisa</u>, na área de concentração em que se enquadra?</p> <p>O trabalho descreve o emprego de uma câmera térmica para monitoramento do processo MADA (Manufatura Aditiva por Deposição a Arco) durante a confecção de uma peça. Uma correlação entre os ciclos térmicos e as microestruturas resultantes foi estimada com base em dados de literatura. Os resultados mostraram que a técnica empregada pode auxiliar na estimativa de características microestruturais como tamanho de grão e proporção de fases do material.</p> <p>2) Qual foi o <u>domínio do conhecimento que dá suporte à dissertação</u> demonstrado pelo candidato durante a defesa?</p> <p>O candidato apresentou resultados coerentes e os comparou com dados de outros autores. As referências sobre as quais foi fundamentado o trabalho são consistentes e representam o estado da arte na área de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. O candidato mostrou segurança na apresentação do trabalho, o qual envolveu experimentos complexos e demandou uma abordagem multidisciplinar.</p>	
Nome: Kleber Eduardo Bianchi Instituição: Universidade Federal do Rio Grande – FURG	Assinatura  KLEBER EDUARDO BIANCHI Data: 10/02/2026 09:02:06-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br
Nome: Daniel Souza Instituição: Universidade Federal de Goiás – UFG	Assinatura  DANIEL SOUZA Data: 10/02/2026 12:40:14-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br
Nome: José Henrique Alano Instituição: Universidade Federal do Rio Grande – FURG	Assinatura  JOSE HENRIQUE ALANO Data: 10/02/2026 08:30:12-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br
Nome: Thais Andreza dos Passos Instituição: Universidade Federal do Rio Grande – FURG	 THAIS ANDREZZA DOS PASSOS Data: 10/02/2026 09:14:45-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br
Nome: Demóstenes Ferreira Filho Instituição: Universidade Federal de Goiás – UFG	 DEMOSTENES FERREIRA FILHO Data: 10/02/2026 14:36:46-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br

Quem é sábio e tem entendimento entre vocês? Que o demonstre por seu bom procedimento, mediante obras praticadas com a humildade que provém da sabedoria. (Tiago 3:13)

À minha esposa e sua família, meus pais, irmãos e a Deus por todo o apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por ter me acompanhado em cada etapa do trabalho brindando as pessoas e ferramentas necessárias para a conclusão. Além de me manter com boa saúde física, mental e emocional, que são fundamentais para realizar qualquer atividade;

À minha esposa Sabrina Espinosa Cabrera, por ter me auxiliado durante a realização da pesquisa, além do apoio emocional nos momentos difíceis que passei no percurso;

Ao meu orientador Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi e o meu coorientado Prof. Dr. Daniel Souza, pela orientação, paciência e conhecimento transmitido;

À CAPES, pelo suporte financeiro concedido;

Ao Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem (LaPES) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), que me deu apoio através dos equipamentos usados na pesquisa;

Aos meus pais Javier e Juana, pelo apoio na minha decisão de realizar mestrado e aos auxílios dados;

Ao meu irmão mais velho Jorsilyn Mike Vargas del Aguila, por seu apoio ao ceder seu tempo e conhecimento em programação para auxiliar na pesquisa. Além disso, aos meus irmãos Alaska e Thyago por cada momento que passamos em conjunto ajudando a conseguir diversão;

Aos técnicos Thais Andrezza dos Passos e Cristiano Celente, pela amizade e apoio com os seus conhecimentos técnicos;

Aos demais professores do Laboratório de Engenharia Mecânica da FURG, como a professora Henara pela amizade e conselhos dados;

Aos membros da banca examinadora, por se disporem a avaliar este trabalho;

Aos amigos e colegas pelos momentos de descontração.

RESUMO

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) se destaca entre os diversos métodos de Manufatura Aditiva (MA) por possibilitar a fabricação de peças metálicas personalizadas e de geometria complexa, proporcionando alta taxa de deposição e custos relativamente baixos. Porém há desafios a serem superados, boa parte dos quais diretamente relacionados à temperatura imposta na deposição das sucessivas camadas. Tensões residuais, controle microestrutural e desvios geométricos são alguns exemplos. Nesse contexto, o desenvolvimento de técnicas de medição de ciclos térmicos envolvendo dispositivos automáticos e digitais se trata de uma necessidade premente. Tais técnicas, associadas a dados que correlacionem temperatura e microestrutura, podem fornecer valiosas estimativas de parâmetros como tamanho de grão e proporção de fases, dentre outros. Neste trabalho foi empregada uma câmera térmica para monitoramento do processo MADA durante a confecção de uma parede reta, de aproximadamente 200 mm de comprimento, por 55 mm de altura e ~6 mm de espessura, a qual foi erigida pela deposição de um aço inoxidável duplex (ER2209), originalmente na forma de arame de diâmetro nominal 1 mm. A câmara consistiu em equipamento de baixo custo, à qual foi agregado um dispositivo de proteção às altas temperaturas. Foram obtidos os ciclos térmicos na região central da parede, tomando-se pontos em diferentes alturas (camadas iniciais, intermediárias e finais). Uma correlação entre os ciclos térmicos obtidos e as microestruturas resultantes foi estimada com base em duas fontes: *i*) diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni com 70% de ferro, e *ii*) diagrama de formação de precipitados em função da temperatura, tempo e proporção de elementos de liga. As regiões de medição dos ciclos térmicos também foram submetidas a ensaio de dureza Vickers. Os resultados evidenciaram a correlação entre os dados gráficos de temperatura gerados pela câmera e a microestrutura obtida, na qual foram detectados elevados teores de austenita (~70%). Por outro lado, os valores de dureza na ordem de 386 HV indicaram uma possível precipitação de fases, causada pela exposição do material a temperaturas críticas por períodos significativos.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco; Câmera térmica; Ciclos térmicos; aços inoxidáveis duplex.

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) stands out among the various Additive Manufacturing (AM) methods for enabling the fabrication of customized metal parts with complex geometries, providing high deposition rates and relatively low costs. However, there are challenges to overcome, many of which are directly related to the temperature imposed during the deposition of successive layers. Residual stresses, microstructural control, and geometric deviations are some examples. In this context, the development of thermal cycle measurement techniques involving automatic and digital devices is a pressing need. Such techniques, associated with data that correlate temperature and microstructure, can provide valuable estimates of parameters such as grain size and phase ratio, among others. In this work, a thermal camera was used to monitor the WAAM process during the fabrication of a straight wall, approximately 200 mm long, 55 mm high, and ~6 mm thick, which was erected by the deposition of a duplex stainless steel (ER2209), originally in the form of a 1 mm nominal diameter wire. The camera consisted of low-cost equipment to which a high-temperature protection device was added. Thermal cycles were obtained in the central region of the wall, taking points at different heights (initial, intermediate, and final layers). A correlation between the obtained thermal cycles and the resulting microstructures was estimated based on two sources: *i)* Fe-Cr-Ni pseudo-binary diagram with 70% iron, and *ii)* precipitate formation diagram as a function of temperature, time, and alloying element proportion. The regions where the thermal cycles were measured were also subjected to Vickers hardness testing. The results showed a correlation between the temperature graphs generated by the camera and the obtained microstructure, in which high austenite contents (~70%) were detected. On the other hand, hardness values on the order of 386 HV indicated a possible precipitation of phases, caused by the exposure of the material to critical temperatures for significant periods.

Keywords: Additive Manufacturing by Arc Deposition; Thermal camera; Thermal cycles; duplex stainless steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos processos de MA. Adaptado de (22).	20
Figura 2.2 - Classificação do processo DED (25).	21
Figura 2.3 - Esquematização básica do processo MADA. Adaptado de (7).	22
Figura 2.4 - Diagrama esquemático do desenvolvimento experimental do processo MADA (6).	23
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo do processo GMA adaptado para MA. Adaptado de (21).	24
Figura 2.6 - Região de temperatura elevada do diagrama de fases pseudo binário para as composições químicas dos AID. A região sombreada corresponde à faixa de ligas comercialmente disponíveis com L (líquido), δ (ferrita) e γ (austenita). Adaptado de Lippold e Kotecki (37).	27
Figura 2.7 - Perfis de concentração no diagrama de constituição ternário Fe-Cr-Ni a 70% e 60% de Fe (40).	28
Figura 2.8 - Diagrama esquemático da formação de precipitados em função da temperatura, tempo e a adição de elementos de liga (37).	29
Figura 2.9 - Micrografias da pá construída por MADA. Regiões (a) e (b) são próximas à base, enquanto as regiões (c) ficam no centro e (d) no topo do componente (34).	30
Figura 2.10 - Ciclos térmicos calculados de (a) Ponto 1, (b) Ponto 2 e (c) Ponto 3 na Parede; (d) Ponto 1, (e) Ponto 2 e (f) Ponto 3 no Tubo. Adaptado de (45).	31
Figura 2.11 - Modelo físico simplificado do regime térmico em deposições com resfriamento natural, passivo e ativo (RAQI), onde Q_{cond} = calor por condução, Q_{conv} = calor por convecção, Q_{rad} = calor irradiado. Adaptado de (52).	34
Figura 2.12 - Espécimes para teste de tração simples: (a) em diferentes ângulos e (b) posições em relação ao substrato. Adaptado de (28).	36
Figura 3.1 - Fluxograma metodológico.	38
Figura 3.2 - Câmera térmica (a) e programa de uso (b).	40
Figura 3.3 - Sistema MADA-GMA com (a) robô MOTOMAN HP20D, (b) Fonte de soldagem e (c) Sistema de aquisição de dados.	41
Figura 3.4 - Ilustração da parede fabricada.	44
Figura 3.5 - Localização da parede no substrato.	45
Figura 3.6 - Método de captação de temperatura.	46
Figura 3.7 - Frames no centro da parede entre as camadas 6 a 10 (a) e entre as camadas 46 a 50 (b).	47

Figura 3.8 - Gráfico gerado pelos dados da câmera usando o programa <i>Octave</i> indicando a separação entre dados coerentes e os não coerentes de uma camada qualquer.	48
Figura 3.9 - Gráfico com dados incoerentes cortados.	48
Figura 4.1 - Diferentes alturas medidas para parede fabricada por MADA-GMA.	51
Figura 4.2 - Comprimento da parede fabricada por MADA-GMA.	52
Figura 4.3 - Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni com a localização do metal de adição ER2209 (45).	54
Figura 4.4 - Detecção da camada correspondente a cada gráfico de ciclos térmicos tendo como exemplo a camada 6.	55
Figura 4.5 - Comparação entre ciclos térmicos da camada 7 (a), 27 (b) e 47 (c).	58
Figura 4.6 - Comparação de permanência dos ciclos térmicos dentro da região ferrítica entre os ciclos das camadas 34 (a), 39 (b) e 45 (c).	59
Figura 4.7 - Microestrutura formada pelo processo MADA-GMA.	60
Figura 4.8 - Quantificação de fase de uma das imagens da seção 1 da amostra: (a) Figura 4.7 e (b) é a fase quantificada por <i>ImageJ</i>	61
Figura 4.9 - Quantificação de austenita por seções.	63
Figura 4.10 - Média e desvio padrão das medições de dureza Vickers.	65
Figura 4.11 - Comparação entre as seções 1, 5 e 9 relacionado os ciclos térmicos (a) 7, (b) 27 e (c) 47 com as microestruturas das seções (d) 1, (e) 5 e (f) 9, respectivamente.	68
Figura 4.12 - Diagrama Tempo-Temperatura-Transformação para os AIDs tendo como referência os aços 2507, 2205 e 2304 (70).	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre as fontes de energia utilizadas em peças metálicas. Adaptado de (31).....	23
Tabela 2.2 - Composição química e PREN dos grupos AID. Adaptado de Kahar (38).	26
Tabela 3.1 - Especificação de material de deposição e substrato.....	39
Tabela 3.2 - Composição química do material de deposição e do substrato (43,64).	39
Tabela 3.3 - Parâmetros do processo MADA-GMA empregados na fabricação da parede.	44
Tabela 3.4 - Dimensões da parede.	44
Tabela 3.5 - Medidas do substrato e da localização da parede.	45
Tabela 4.1 - Valores médios do sistema de aquisição de dados.....	50
Tabela 4.2 - Diferentes espessuras medidas na parede.	52
Tabela 4.3 - Camadas que tiveram gráficos de ciclos térmicos gerados.	56
Tabela 4.4 - Valores medidas do teor de austenita em cada seção.....	62
Tabela 4.5 - Média e desvio padrão para cada seção da parede.....	63
Tabela 4.6 - Medições de dureza feitas para as três seções predeterminadas.....	65
Tabela 4.7 - Média e desvio padrão calculados para as seções analisadas.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS

AI – Aços Inoxidáveis
AID – Aços Inoxidáveis Duplex
AISD – Aços Inoxidáveis Super Duplex
BJ – *Binder jetting*
CST – Corrosão Sob Tensão
CMT – *Cold Metal Transfer*
DED – *Direct energy deposition*
EBM – *Electron Beam Melting*
GMA – *Gas Metal Arc*
GMAW – *Gas Metal Arc Welding*
GTA – *Gas Tungsten Arc*
GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*
L – Líquida
LMD – *Laser Metal Deposition*
MA – Manufatura Aditiva
MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
ME – *Material extrusion*
MJ – *Material jetting*
PA – *Plasma Arc*
PAW – *Plasma Arc Welding*
PBF – *Powder bed fusion*
PPTAW – *Powder Plasma Transferred Arc Welding*
PTA – *Plasma Transferred Arc*
RAQI – Resfriamento Ativo por Quase Imersão
SL – *Sheet lamination*
SLM – *Selective Laser Melting*
VP – *Vat-photopolymerization*
WAAM – *Wire arc additive manufacturing*

LISTA DE SÍMBOLOS

σ - Fase sigma
 α' - Fase alfa *prime*
 χ - Fase Chi
 δ - Ferrita
 γ - Austenita
 A – Comprimento do substrato
 C – Largura do substrato
 Cu – Cobre
 Cr – Cromo
 Cr_{eq} – Cromo equivalente
 $DBCP$ – Distância do Bico de Contato até a Peça
 d – Distância até a ponta da parede
 E – Espessura do substrato
 e – Espessura da parede
 Fe – Ferro
 H – Altura da parede
 h - Altura da camada
 I - Corrente
 L – Comprimento da camada
 Mo – Molibdênio
 N – Nitrogênio
 Nb – Nióbio
 Ni – Níquel
 Ni_{eq} – Níquel equivalente
 n – Número de camadas
 PRE_N – *Pitting Resistance Equivalent*
 Q – Vazão do gás
 U – Tensão
 V_a – Velocidade de alimentação
 V_a – Velocidade de soldagem
 W – Tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivo Geral.	18
1.2	Objetivos Específicos.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Classificação dos processos de Manufatura Aditiva (MA).....	19
2.2	Manufatura aditiva por Deposição a Arco (MADA).....	21
2.3	Aços Inoxidáveis Duplex (AID).....	25
2.3.1	Classificação dos aços inoxidáveis duplex.....	25
2.3.2	Características do equilíbrio das fases Ferrita-Austenita.....	26
2.4	MADA de Aços Inoxidáveis Duplex.....	29
2.5	Gerenciamento Térmico em MADA.....	32
2.6	Propriedades mecânicas e microestruturais	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Materiais.....	39
3.1.1	Definição do material de deposição e substrato.	39
3.1.2	Câmara térmica e leitura de temperatura.	40
3.1.3	Sistema de robô para MADA-GMA.....	41
3.1.4	Durômetro e Microscópio de análise microestrutural.....	43
3.2	Metodologias para geração de resultados	43
3.2.1	Parâmetros do processo.....	43
3.2.2	Especificações da fabricação da parede por MADA.....	44
3.2.3	Método de análise de ciclos térmicos	45
3.2.4	Estratégia de análise microestrutural.....	48
3.2.5	Estratégia para análise de Dureza Vickers	49
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1	Resultados do sistema de aquisição de dados	50
4.2	Análise visual da parede fabricada.....	50
4.3	Análise dos ciclos térmicos.	53
4.4	Quantificação de fase da microestrutura da parede.....	60
4.5	Resultados do ensaio de dureza na parede.....	64
4.6	Análise da relação entre os ciclos de temperatura, o teor de austenita e dureza	66
5	CONCLUSÕES.....	70
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
7	REFERÊNCIAS	72
7.1	Referências Nominais	72

7.2	Referências por Estrato.....	81
7.3	Referências por Qualis.....	82
7.4	Referências por Data dos Artigos	83

1 INTRODUÇÃO

A indústria passou por muitas transformações desde o surgimento do que hoje é denominado Indústria 1.0, até os tempos atuais, em que está havendo uma transição para a Indústria 4.0 (1). Esta nova era é marcada pela mudança de produção em grandes séries para a personalização em massa, tornada possível com a digitalização de informações e o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, incluindo a Internet das Coisas, robótica e inteligência artificial (2,3,4). A Manufatura Aditiva (MA) se insere nesse contexto, pois permite a fabricação de produtos personalizados para inúmeros setores e propósitos, flexibilizando as atividades de projeto e fabricação a um nível antigamente inimaginável (1).

A MA pode ser considerada como um apêndice da prototipagem rápida, na qual um componente, bem como todo o ferramental necessário para sua fabricação, é concebido a partir de um arquivo de computador (modelo 3D). Por sua vez, o emprego da soldagem a arco elétrico na manufatura aditiva se deve ao fato de permitir a confecção de peças estruturais metálicas (5). Mais do que isso, as atuais técnicas avançadas e materiais de soldagem, ora disponíveis no mercado, permitem a confecção de peças com características estruturais específicas, cuja produção por métodos convencionais seria inviável. Desta forma seria possível, por exemplo, empregar metais de adição de maior resistência mecânica nas regiões que viriam a ser mais solicitadas em campo. Por fim, dentre os desafios no desenvolvimento de estruturas, a redução de custos de fabricação é meta perene (6). Nesse sentido a tecnologia de MA se destaca, pois permite a fabricação de componentes personalizados em menor número de etapas de fabricação, sem a necessidade de emprego de ferramentas caras e complexas (7).

Os setores aeroespacial, automotivo, de saúde e arquitetura têm explorado os benefícios da tecnologia MA e da prototipagem rápida em seus negócios, desenvolvendo peças de geometria complexa (8). Por outro lado, as indústrias de aeronáutica, energia e biomedicina, consideram essa tecnologia como a revolução para a fabricação de vários componentes (5). Desde então, essa tecnologia vem evoluindo para incluir outras aplicações além da prototipagem rápida, e outras indústrias, como a construção civil (8).

A manufatura aditiva baseada na fusão de metais é uma das técnicas mais usadas na engenharia. Tecnologias como *Selective Laser Melting* (SLM), *Electron*

beam melting (EBM), *Laser metal deposition* (LMD), e Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) são exemplos (9,10,11,12). Pesquisas recentes mostram que, para que a MA seja viável e eficaz, elevadas taxas de deposição de material devem ser empregadas, o que pode ser obtido pelo processo de MADA (13). Por causa disso, indústrias que precisam de peças estruturais de grande porte e procuram economizar na fabricação dos seus produtos, além dos cuidados que precisam ter na manutenção dos mesmos, começaram a se interessar por essa técnica, como é o caso da indústria de construção civil e a indústria ferroviária (14,8).

Entretanto, algumas questões relacionadas à técnica MADA têm motivado estudos contínuos, como é o caso do controle da microestrutura, a qual tende a ser muito complexa (5). Os diversos fatores que influenciam na microestrutura compreendem os próprios parâmetros de soldagem, bem como os tempos de resfriamento, solidificação e reaquecimento ao longo dos passes, entre outros (5,15). O controle do regime de temperaturas durante o processo de fabricação tem sido efetuado por meio de diferentes técnicas de resfriamento (5), sendo o Resfriamento Ativo por Quase Imersão (RAQI) um dos mais famosos. Além disso, têm sido realizados trabalhos focados no controle da temperatura interpasse, ou seja, entre as camadas depositadas (16). O trabalho de Zhai *et al.* (16) ganha destaque por estudar o efeito causado na microestrutura de um aço baixa liga nas temperaturas interpasse de 150°C, 350°C e 600°C. Por fim, o elevado aporte de calor empregado no processo MADA pode gerar problemas como tensões residuais, distorções, desvios geométricos e transformações metalúrgicas indesejáveis (5).

Portanto, o gerenciamento térmico é um fator-chave que engloba uma grande variedade de técnicas para a mitigação desses problemas. Segundo Scotti *et al.* (17), a seleção de processos e parâmetros são algumas das técnicas de gerenciamento térmico. No entanto, para melhor acompanhamento do aporte térmico, faz-se necessário um sistema de monitoramento eficiente dentro do processo MADA. A câmera térmica é um equipamento que mostra potencial nesse aspecto, pois apresenta a possibilidade de acompanhar a temperatura no decorrer da fabricação de pré-formas, destacando-se entre outros equipamentos, como os termopares.

Nesse contexto, este trabalho procura realizar a pesquisa de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) fazendo uso da técnica *Gas Metal Arc* (GMA), que apresenta maior taxa de deposição de material dentre os métodos do grupo MADA (18), focando na investigação da viabilidade do uso de uma câmera térmica

como ferramenta auxiliar ao controle do gradiente de temperatura, tendo como finalidade maior segurança em relação à microestrutura obtida no final do processo.

1.1 Objetivo Geral.

O objetivo geral do trabalho consistiu na investigação do uso de uma câmera térmica como ferramenta auxiliar no processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco fazendo uso da técnica GMA na fabricação de uma parede feita com 50 camadas depositados de forma ininterrupta.

1.2 Objetivos Específicos.

Inicialmente, como objetivos específicos da pesquisa foram realizadas as seguintes atividades:

- Análise visual da parede fabricada por MADA-GMA;
- Análise dos ciclos térmicos do processo de manufatura aditiva através de dados gerados com o uso da câmera térmica;
- Análise da quantificação das fases ferrita e austenita da microestrutura formada;
- Análise de dureza Vickers da peça fabricada;
- Relacionar a influência da temperatura com a quantificação de fases da microestrutura formada e a dureza obtida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo do trabalho é direcionado aos principais conceitos com base nos quais foi desenvolvido. São apresentados trabalhos recentes e a situação em que se encontra a pesquisa em manufatura aditiva por arco elétrico.

2.1 Classificação dos processos de Manufatura Aditiva (MA)

A fabricação de materiais metálicos, do ponto de vista tecnológico, consiste na aplicação de processos físicos e químicos com o objetivo de alterar a geometria, propriedades físicas e/ou aparência de um material para a obtenção de peças ou produtos. O desejável seria realizar uma única operação para chegar ao produto, mas, na maioria dos casos, é necessário mais de uma (19).

A tecnologia da Manufatura Aditiva surgiu como um novo processo de fabricação, capaz de produzir peças com geometria muito próxima à final, ou seja, propiciando drástica redução do número de etapas e de material necessário. DebRoy *et al.*(7), citam como exemplo algumas peças aeronáuticas em que, empregando-se métodos convencionais, mais de 50% da matéria prima é desperdiçada na forma de cavacos de usinagem.

Atualmente muitas pesquisas vêm sendo realizadas na área de manufatura aditiva, a qual envolve uma diversidade de técnicas (20). Shah *et al.* (21) e Singh *et al.* (22), realizaram estudos sobre as origens da MA e apresentaram uma classificação das técnicas, que é mostrada na Figura 2.1. Resumidamente, as técnicas mostradas nesta Figura 2.1, cuja denominação em inglês foi mantida devido à sua corriqueira utilização na área de fabricação, são as seguintes:

- *Binder Jetting* (BJ): processo no qual um agente de ligação líquido é depositado seletivamente;
- *Direct Energy Deposition* (DED): processo em que energia térmica focalizada é usada para fundir materiais à medida que são depositados;
- *Material Extrusion* (ME): o material é alimentado através de um bocal ou orifício;
- *Material Jetting* (MJ): gotículas de material de construção são depositadas seletivamente;
- *Powder Bed Fusion* (PBF): a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó;
- *Sheet Lamination* (SL): folhas de material são unidas para formar um objeto;

- *Vat Photopolymerization* (VP): um fotopolímero líquido numa cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz.

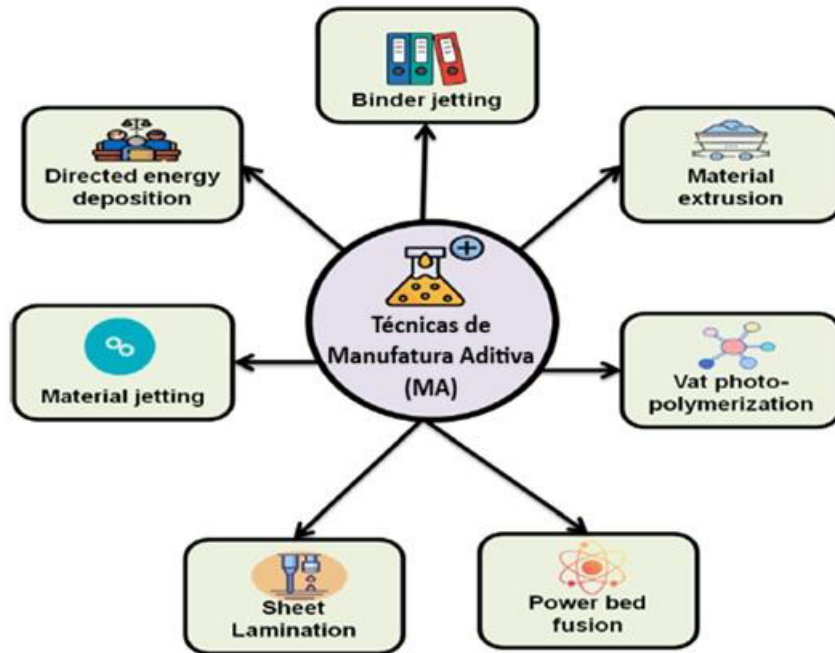


Figura 2.1 – Classificação dos processos de MA. Adaptado de (22).

Todos os processos apresentados são usados para materiais específicos: os processos VP (*Vat-photopolymerization*), ME (*Material extrusion*) e MJ (*Material jetting*) são preponderantemente usados para a produção de componentes a base de polímeros. Por outro lado, BJ (*Binder jetting*) e SL (*Sheet lamination*) podem ser usados para a fabricação de todos os tipos de materiais existentes, como os cerâmicos, metálicos, poliméricos e compósitos. Por fim, os processos PBF (*Powder bed fusion*) e DED (*Direct energy deposition*) foram concebidos com o intuito de produzir peças metálicas fazendo uso de técnicas de impressão 3D (23).

Dentre as técnicas apresentadas, o DED se destaca pelo grande aporte térmico empregado na fabricação das peças. Esse é o grupo no qual se insere a técnica MADA-GMA. A Classificação isolada da técnica DED pode ser vista na Figura 2.2 (24), destacando os processos *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e *Plasma Arc Welding* (PAW) adaptados à MADA

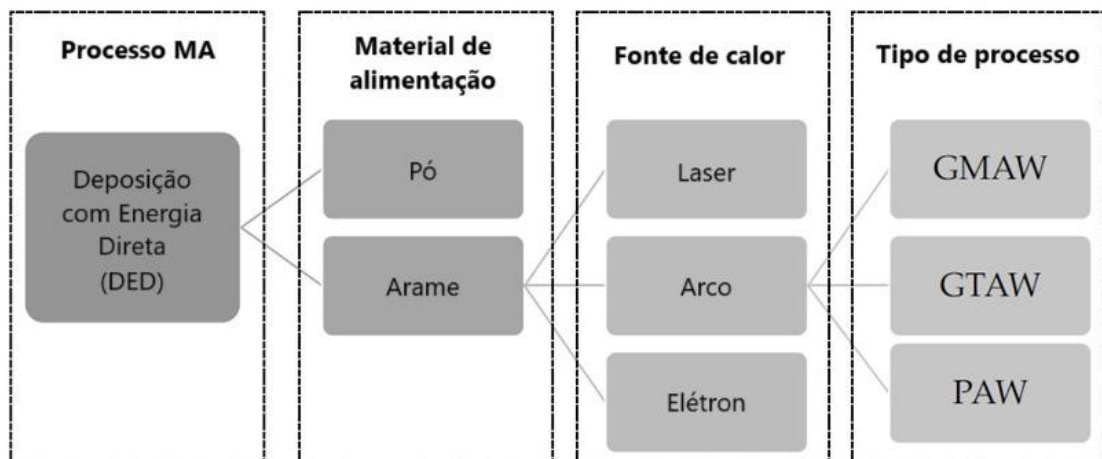


Figura 2.2 - Classificação do processo DED (25).

2.2 Manufatura aditiva por Deposição a Arco (MADA)

O método mais adequado para a fabricação de peças metálicas de grandes dimensões é o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), já que apresenta as maiores taxas de deposição de material, garantindo a possibilidade de produção de peças extremamente grandes, além de garantir uma produção de menor custo (8,26). O termo MADA é uma adaptação do termo estrangeiro WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), todavia é possível discordar desta afirmação, já que esse termo se refere a processos que utilizam metais de adição na forma de arame, sendo que nos processos à arco existe a possibilidade de utilizar pó como metal de adição, fazendo com que a designação MADA seja mais adequada (27).

O processo de MADA consiste no uso de técnicas de soldagem a base de arco elétrico com uso de arame, como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), adaptadas ao princípio de produção de peças feitas pela deposição de camada sobre camada com auxílio de uma modelagem CAD, seguido de um fatiamento 3D e determinação do caminho a ser seguido (28). De acordo com Scotti (27), quando se fala de MADA, espera-se que o termo welding esteja ausente, pois trata-se de processos de MA e não de soldagem.

A Figura 2.3 mostra o princípio de funcionamento do processo MADA, o qual deve ser realizado por uma máquina controlada por computador ou braço robotizado. Sistemas mais complexos podem incluir eixos de movimentação adicionais e software de controle da fonte de energia, para otimização do aporte de calor (29).

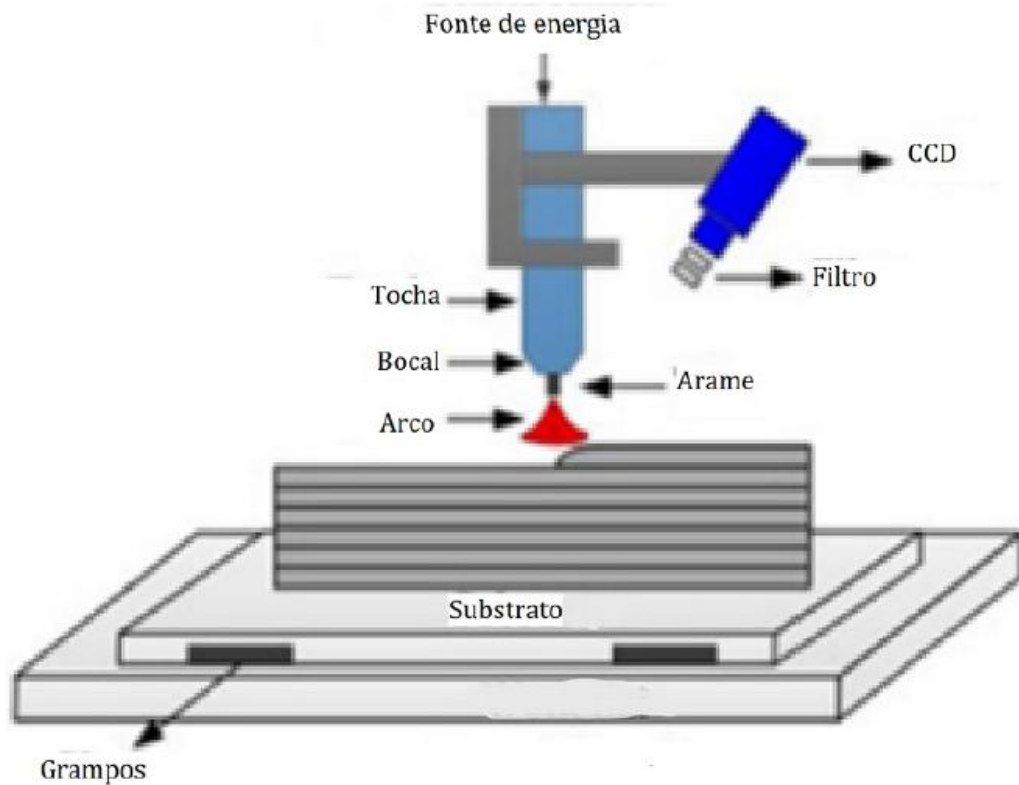


Figura 2.3 - Esquematização básica do processo MADA. Adaptado de (7).

Como exemplo de aplicação do processo MADA, a Figura 2.4 mostra um diagrama baseado no recurso GMA, proposto por Ding *et al.* (30). Nele podem ser vistos alguns elementos para a adaptação do processo GMAW para MA. O computador (1) apresenta função de programar as trajetórias e os coletar resultados experimentais obtidos. O controlador do robô (2) tem por função acionar os eixos do robô. A fonte de alimentação (3) tem a função de realizar o controle da deposição do material. O robô industrial (4) onde é colocada a tocha (5) e um exemplo de deposição é mostrado no ponto 7 da Figura 5.

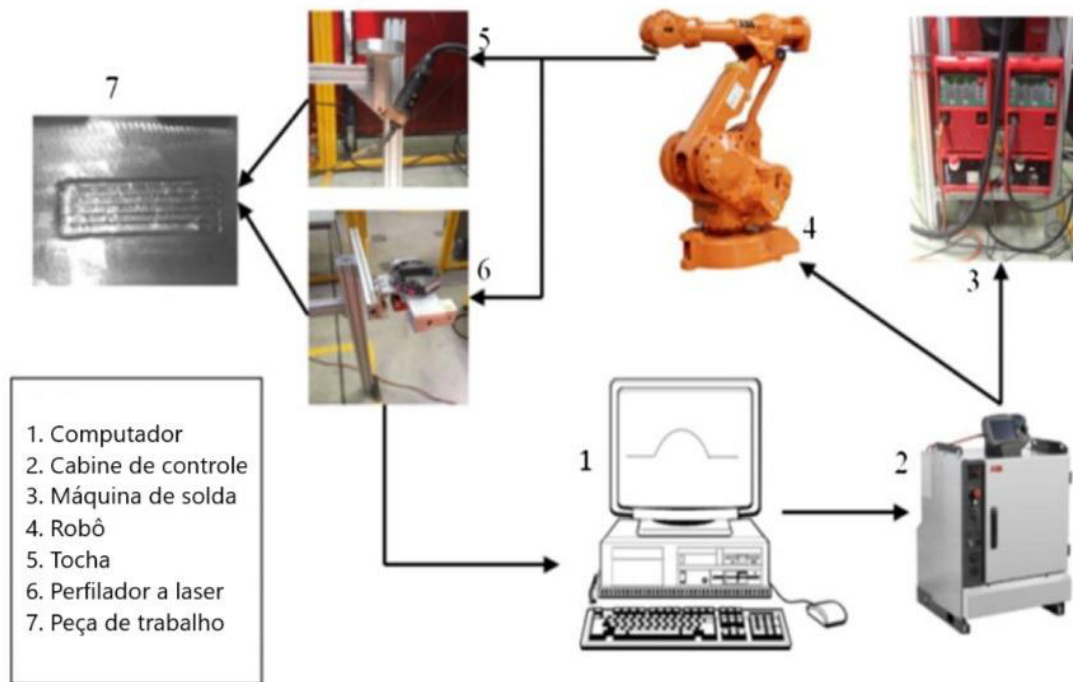


Figura 2.4 - Diagrama esquemático do desenvolvimento experimental do processo MADA (6).

Singh, Sharma e Rathod (31) fizeram uma comparação de todas as fontes de energia utilizadas pelas técnicas mais populares de MA, e relataram que a técnica MADA é a que oferece a maior taxa de deposição e fabricação econômica dos metais de adição. A comparação pode ser vista na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Comparação entre as fontes de energia utilizadas em peças metálicas. Adaptado de (31).

Características	Laser	Feixe de elétron	Arco de soldagem
Fonte de energia	Fóton	Elétron	Íon metálico
Fonte de calor	Onda eletromagnética	Energia cinética	Arco elétrico
Densidade de potência	10^6 - 10^7 W/cm ²	10^7 - 10^8 W/cm ²	10^2 - 10^6 W/cm ²
Eficiência	Fraca (2-5%)	Bom (15-20%)	Excelente (>80%)
Vácuo	Não requerido	Obrigatório	Não requerido
Taxa de deposição	2 g/min	10 g/min	50-130 g/min

Apesar das evidentes vantagens em relação aos outros métodos de MA, os processos de MADA costumam exigir operações posteriores de acabamento, como

usinagem e tratamentos térmicos, os quais demandam tempo e recursos adicionais (32).

Dentre todos os processos possíveis de MADA, o GMA proporciona os maiores valores de taxa de deposição, da ordem de 15 a 160 g/min, enquanto os processos GTA e PA apresentam taxas máximas de 30 g/min e 1 g/min. Isso representa uma capacidade de transferência de material muito superior àquela proporcionada pelos métodos anteriormente descritos (25).

No processo GMA o arco elétrico é formado entre um eletrodo consumível e o substrato (33,22). A proteção da poça de fusão é efetuada por meio de um gás inerte (MIG) ou um gás ativo (MAG) (21). Ou seja, no processo MIG é usado um gás não reativo com a poça de fusão, como hélio ou argônio. Esse arranjo é muito utilizado na soldagem ou deposição de metais não ferrosos, ao passo que o MAG é usado em metais ferrosos (21,22). A Figura 2.5 mostra um esquema do processo GMA.

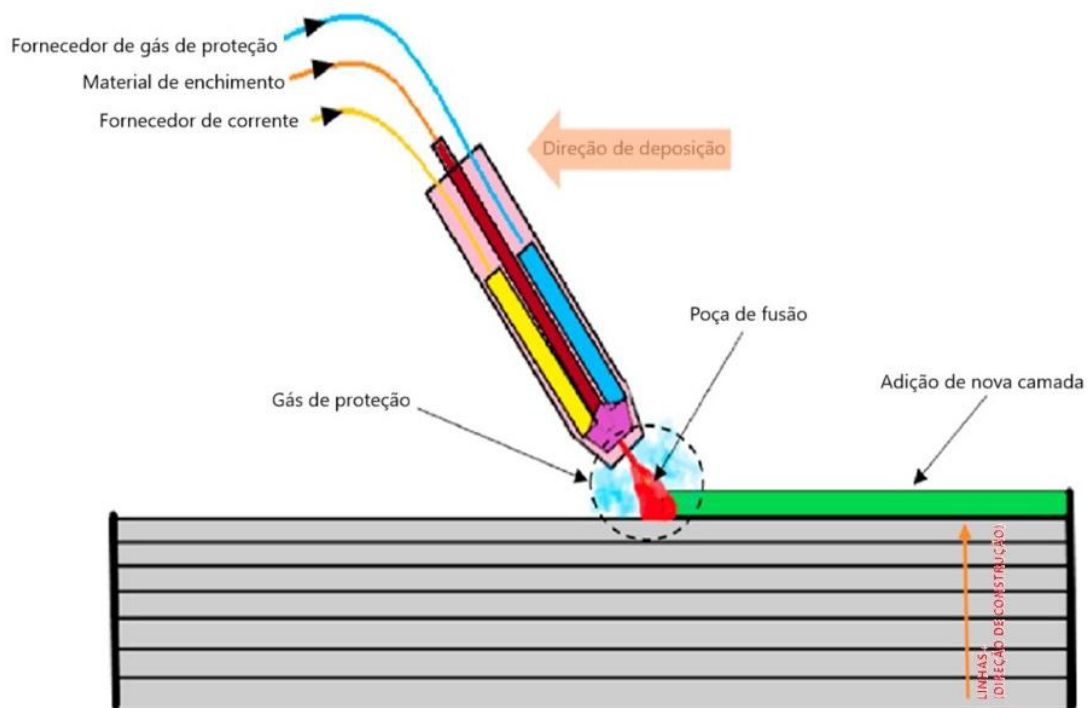


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo do processo GMA adaptado para MA. Adaptado de (21).

Com o passar dos anos, muitas pesquisas foram desenvolvidas fazendo uso do método GMA, chegando a adaptações em que se diminui o aporte térmico através de retração mecânica no exato momento do curto-circuito (CMT), também aplicáveis

aos métodos GTA e PA (33,21,22,28,25). Os trabalhos de Posch *et al.* (34) e Scotti *et al.* (17) são grandes exemplos de adaptação da técnica CMT em MADA-GMA.

Devido à alta taxa de deposição, ao baixo custo de produção e à facilidade de obtenção do equipamento do processo MADA-GMA, o método foi empregado neste trabalho, porém com adaptações para o monitoramento do gradiente de temperatura por meio de uma câmera térmica.

2.3 Aços Inoxidáveis Duplex (AID)

Os aços inoxidáveis se caracterizam pela grande resistência à oxidação e à corrosão, o que é obtido pelo acréscimo de elevado teor de cromo na composição, na ordem de 10,6% ou mais. Os aços inoxidáveis são normalmente classificados em cinco grandes grupos: martensíticos, ferríticos, austeníticos, ferrítico-austenítico (duplex) e endurecidos por precipitação (35). Dentre os aços mencionados anteriormente, os duplex recebem destaque por possuírem uma microestrutura bifásica, que consiste na presença de ferrita e austenita (36). Uma razão de 1:1 é considerada a ideal para essas fases, mas há pequenas variações em ligas comerciais (36,35). Os aços duplex apresentam características de uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos: elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência à corrosão muito boa em diversos meios e excelente resistência à corrosão sob tensão e à fadiga (35).

2.3.1 Classificação dos aços inoxidáveis duplex.

Os AID, de forma geral, são classificados com base na resistência à corrosão, a qual, por sua vez, se deve à composição química. Para quantificar empiricamente a resistência à corrosão, um parâmetro comumente avaliado nos aços inoxidáveis é o *Pitting Resistance Equivalent* (PRE_N), calculado pela Equação 2.1, na qual Cr, Mo, W e N representam respectivamente os teores de cromo, molibdênio, tungstênio e nitrogênio (37).

$$PRE_N = Cr + 3,3(Mo + 0,5W) + 16N \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Na Tabela 2.2 são elencados os diversos grupos dos aços duplex (38), de acordo com a faixa de composição química dos elementos relevantes e os valores resultantes de PRE_N .

Tabela 2.2 - Composição química e PREN dos grupos AID. Adaptado de Kahar (38).

Tipo	Cr%	Ni%	Mo%	N%	PRE_N
<i>Lean</i> duplex	20-24	1-5	0,1-0,3	0,1-0,22	24-25
<i>Standard</i> duplex	21-23	4,5-6	2,5-3,5	0,1-0,22	33-35
<i>Super</i> duplex	24-29	4,5-8	2,7-4,5	0,1-0,35	>40
<i>Hyper</i> duplex	27	6,5	5	0,4	49

Segundo Kahar (38) esses grupos foram desenvolvidos da seguinte forma:

- *Lean* duplex – Desenvolvidos inicialmente como uma alternativa aos aços austeníticos AISI 316, mas com o dobro de tensão de escoamento e maior resistência à corrosão sob tensão (CST);
- *Standard* duplex – Também conhecido simplesmente pelo nome duplex, é o mais proeminente em termos comerciais e os seus níveis elevados de nitrogênio garantem boa soldabilidade;
- *Super* duplex – Foram desenvolvidos para ambientes muito agressivos e são alternativas aos super austeníticos e ligas de níquel;
- *Hyper* duplex – Foram desenvolvidos como complementares ao 2507 com maior resistência mecânica, focando em ambientes demasiadamente agressivos.

2.3.2 Características do equilíbrio das fases Ferrita-Austenita

Como anteriormente mencionado, os AID estão baseados num sistema de liga Fe-Cr-Ni-N, de forma que os seus teores são ajustados para obter uma microestrutura composta de aproximadamente 50% de ferrita e 50% de austenita (37). Os elementos podem ser divididos em formadores de ferrita e formadores de austenita, sendo que os constituintes do primeiro grupo estão presentes em maior proporção, resultando numa solidificação virtual com 100% de ferrita. A transformação da austenita se dá no estado sólido, com o decréscimo da temperatura. A Figura 2.6 mostra o diagrama de fases pseudo-binário – cromo/níquel. Para os AID, os valores de Cr_{eq}/Ni_{eq} estão dentro da faixa de 2,25 a 3,5. Para o cálculo de Cr_{eq}/Ni_{eq} são usadas as Equações 2.2 e 2.3 (39), nas quais Nb, Cu e Ni representam os teores de nióbio, cobre e níquel, respectivamente. Por outro lado, a Figura 2.7 mostra o mesmo diagrama pseudo-

binário para dois teores de Fe, destacando a diferença existente na coexistência entre as zonas de ferrita e austenita com a fase sigma. Além disso, na Figura 2.7a, a cor escura representa a influência de acrescentar nitrogênio à mistura.

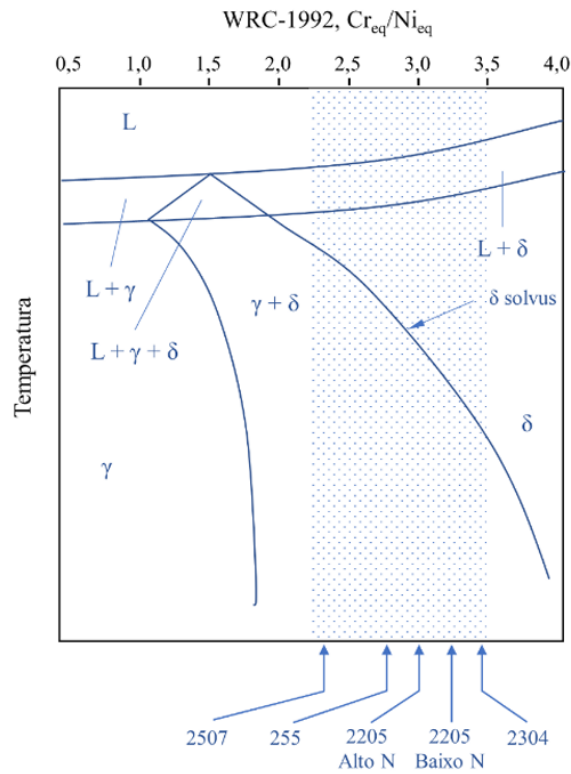


Figura 2.6 - Região de temperatura elevada do diagrama de fases pseudo binário para as composições químicas dos AID. A região sombreada corresponde à faixa de ligas comercialmente disponíveis com L (líquido), δ (ferrita) e γ (austenita). Adaptado de Lippold e Kotecki (37).

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7Nb \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0,25Cu \quad \text{Eq. (2.3)}$$

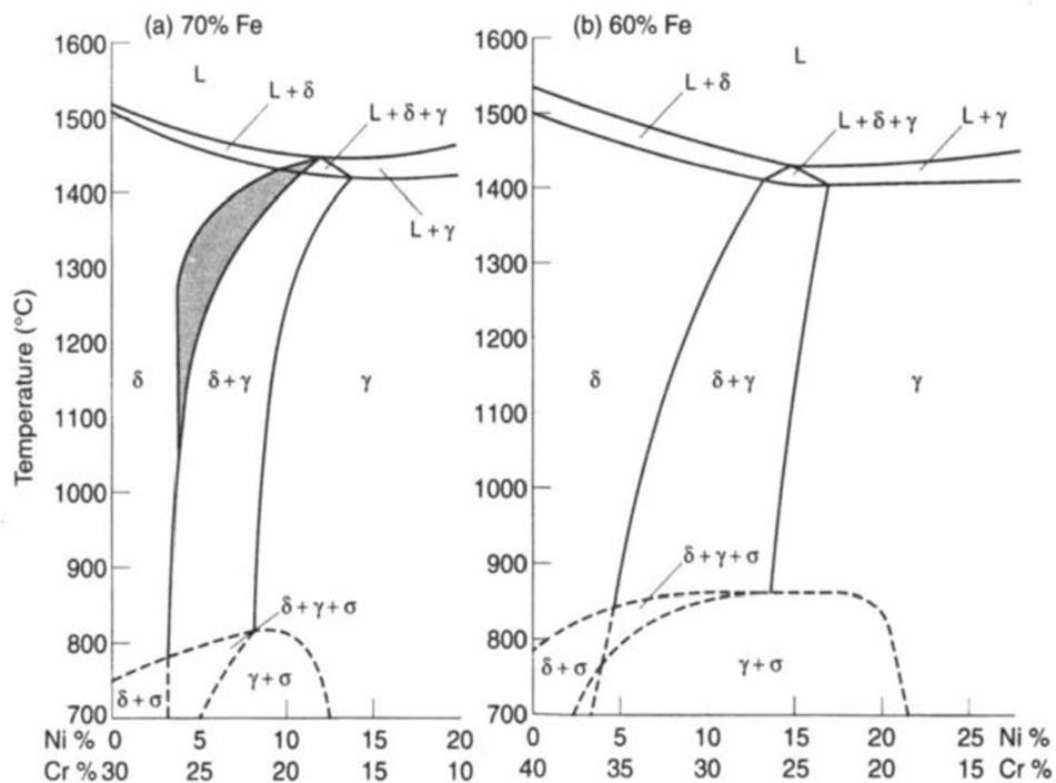


Figura 2.7 - Perfis de concentração no diagrama de constituição ternário Fe-Cr-Ni a 70% e 60% de Fe (40).

De acordo com o diagrama da Figura 2.7, o níquel é importante como acelerador de austenita (γ) e a sua estabilização, além de contribuir com o aumento de resistência à corrosão por pites. Também é possível ver a transformação de fase líquida (L) em ferrita (δ) e o início da nucleação e crescimento da austenita (γ) em temperaturas abaixo da linha *solvus* da ferrita. Para cada composição química, controlar a temperatura de processo e a taxa de resfriamento permite garantir a proporção adequada das fases durante a produção dos AID. Em temperaturas inferiores ao da linha *solvus* há nucleação e crescimento de austenita que vai depender do tempo que o material ficará dentro da zona de coexistência de fases ferrita-austenita. Por outro lado, acima da linha *solvus*, a ferrita apresenta crescimento no tamanho de grão com o aumento de permanência dentro dessa zona. Durante o resfriamento a precipitação da austenita ocorre inicialmente nos contornos de grão da ferrita, seguido por formação de placas de *Widmanstätten* e finalizam com disposição intergranular.

Além da coexistência das fases ferrita e austenita, os AIDs apresentam a possibilidade de precipitar fases deletérias, que dependem do teor de elementos de

liga, a temperatura que se encontra o material e o tempo que permanece em determinadas temperaturas (37). A Figura 2.8 mostra um diagrama esquemático da formação de precipitados em função do tempo e da temperatura, além da influência de alguns elementos de liga.

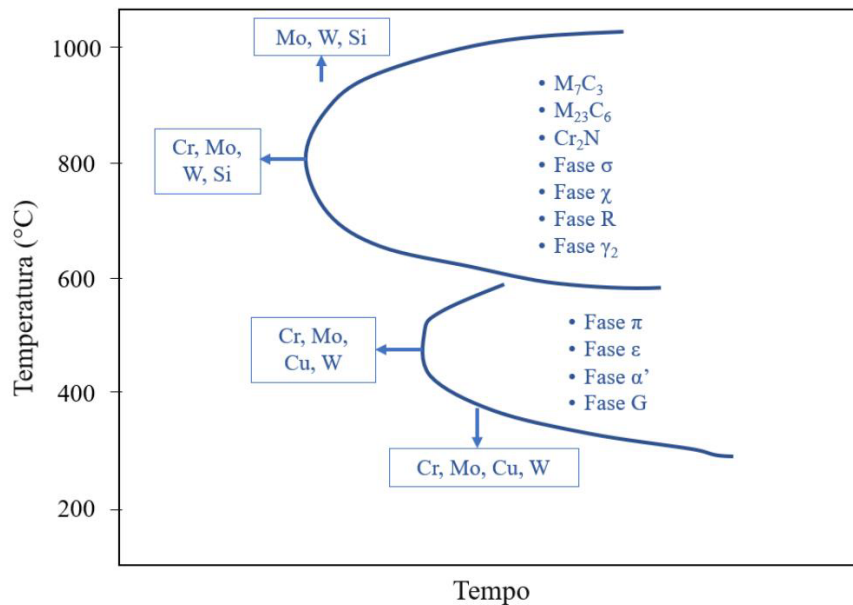


Figura 2.8 - Diagrama esquemático da formação de precipitados em função da temperatura, tempo e a adição de elementos de liga (37).

De acordo com a Figura 2.8 a precipitação de fases pode ocorrer em temperaturas abaixo de 1000°C. Resumidamente, principalmente a adição de Cr, Mo e W aceleram a precipitação das fases deletérias sigma (σ) e chi (χ) quando a peça se encontra em temperaturas que variam entre 600°C e 1000°C, enquanto outras fases como a alfa *prime* (α') podem precipitar em temperaturas que variam entre 300°C e 600°C (37,41). A precipitação de Cr_2N também é notada entre as temperaturas de 700°C a 900°C, especialmente quando ocorre resfriamento rápido a partir de temperaturas elevadas, além de diversas outras fases mostradas no diagrama (42).

2.4 MADA de Aços Inoxidáveis Duplex

As pesquisas e estudos referentes à fabricação de componentes à base de AID usando MA é relativamente recente na literatura. Atualmente, as pesquisas com AID

têm focado muito nos ciclos térmicos e no controle de temperatura durante a deposição de camadas na fabricação de amostras em formato de parede (43).

Posch *et al.* (34) usaram a técnica CMT (*Cold Metal Transfer*) com o aço 2209 como metal adicionado, para melhorar a precisão dimensional de peças feitas por MADA, conseguindo obter uma redução significativa no aporte de calor. Isso torna possível a fabricação de peças mais finas e com acabamento superficial melhor. Foram depositadas 136 camadas, respeitando uma temperatura de interpasse de 150°C. Os autores observaram uma tendência à redução do teor de ferrita, resultando em valores próximos ao limite inferior de 30% das ligas AID (44). Além disso, nesse mesmo trabalho, avaliaram a fabricação de pás de rotor em AID, usando o processo GMA-CMT. A Figura 2.9 mostra a microestrutura obtida pelos autores. Foi observada a mudança no teor da fase ferrítica e da fase austenítica, além do formato em que elas se apresentam. As cores azuis e escuras representam a ferrita, enquanto a cor clara representa a austenita. Nota-se predominância da austenita nas camadas perto da base, enquanto nas camadas superiores o teor de ferrita sofreu incremento.

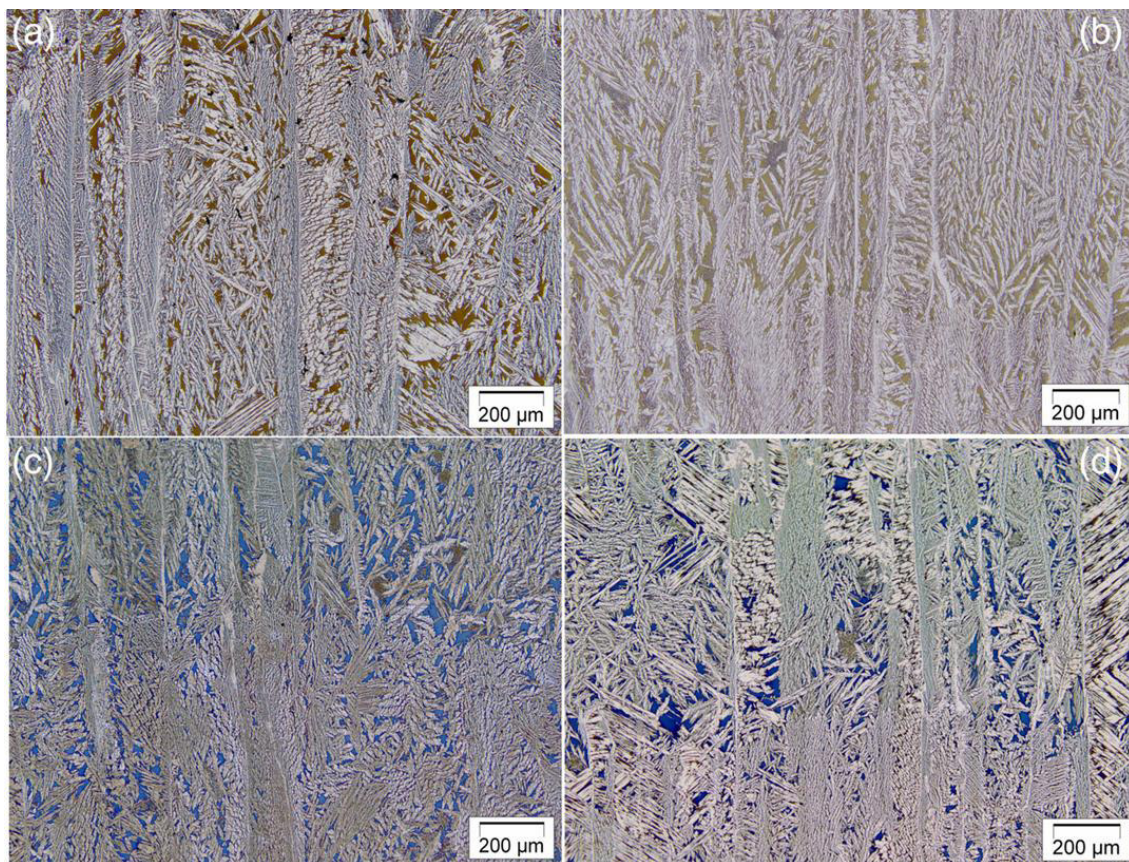


Figura 2.9 - Micrografias da pá construída por MADA. Regiões (a) e (b) são próximas à base, enquanto as regiões (c) ficam no centro e (d) no topo do componente (34).

Hejripour *et al.* (45) fabricaram paredes, usando o aço 2209, com o intuito de realizar uma análise térmica do processo MADA. Os autores também realizaram a simulação numérica em 3D de uma parede com 15 camadas e um tubo com 15 camadas. As peças reais foram fabricadas com 50 camadas. Os resultados do ciclo térmico levantado na simulação foram usados para avaliar a evolução microestrutural sobre o diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni com 70% de Fe. Observou-se que os ciclos térmicos e taxas de resfriamento tiveram impacto significativo no equilíbrio das fases ferrita e austenita. Vale destacar que, no que concerne ao teor de ferrita, os resultados obtidos foram similares aos de Posch *et al.* (34), ou seja, em torno de 30%. A Figura 2.10 mostra os ciclos térmicos obtidos por Hejripour nas simulações numéricas da parede e do tubo, destacando as linhas referentes às temperaturas *liquidus* e *solvus*.

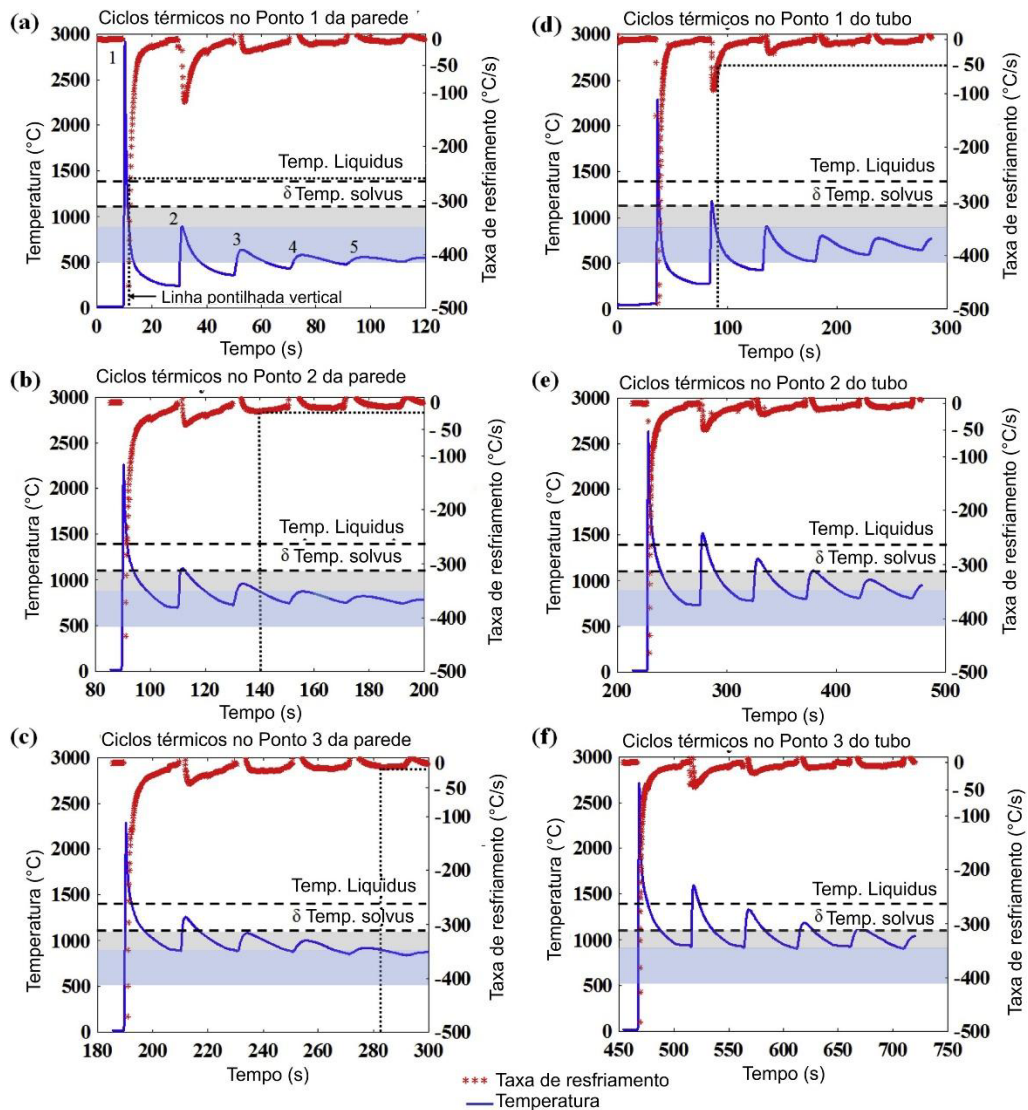


Figura 2.10 - Ciclos térmicos calculados de (a) Ponto 1, (b) Ponto 2 e (c) Ponto 3 na Parede; (d) Ponto 1, (e) Ponto 2 e (f) Ponto 3 no Tubo. Adaptado de (45).

Witting *et al.* (46) constataram que o aumento da energia do arco provoca diminuição dos teores de ferrita, pois os tempos de resfriamento são mais longos e os picos de temperatura mais elevados. Além disso os autores notaram maiores teores de ferrita nas regiões do topo das paredes. Essa característica pode ser explicada pelo fato de que, nessa região, o material é exposto a menos ciclos térmicos, ou seja, à faixa de temperatura onde ocorre austenitização.

De acordo com Wanwan, *et al.* (47), o histórico térmico no processo MADA desempenha papel importante no controle da microestrutura, o que torna viável o seu controle por meio do controle dos parâmetros. A completa compreensão dos comportamentos de solidificação e as transformações de fase em ciclos térmicos MADA complexos, a correlação entre a composição do material, os parâmetros do tratamento térmico e a microestrutura final são conhecimentos necessários para obter microestruturas almejadas.

Aravind e Jerome (48) realizaram uma pesquisa voltada à análise de propriedades das propriedades metalúrgicas, mecânicas, de corrosão e tribológicas de peças fabricadas via MADA com AID ER2209 buscando manter as propriedades essenciais do material de deposição e verificar o desempenho em aplicações automotivas e marítimas. Nesse trabalho conseguiram mostrar que o processo MADA consegue manter uma microestrutura bifásica característica do ER2209 que contribui para com as propriedades mecânicas de um aço equivalente forjado.

Karunanithi *et al.* (43) procuraram avaliar como a microestrutura, as propriedades mecânicas e o comportamento eletroquímico do ER2209 fabricado via MADA-GMA se relacionam entre si. Nesse trabalho foi fabricada uma parede com 100 camadas e 210 mm de comprimento até atingir uma altura de 225 mm. A microestrutura mostrou teor de austenita que ultrapassou 70% e característica principal de dendritos equiaxiais finos ao longo da direção de construção, sem presença de fases deletérias.

2.5 Gerenciamento Térmico em MADA

Conforme mencionado anteriormente, os ciclos térmicos do processo de deposição são responsáveis, de forma direta, pela qualidade final do componente em termos de geometria, propriedades mecânicas e integridade. Yang *et al.* (49) levantaram ciclos térmicos do processo MADA-GMA por meio de filmagens

termográficas. Segundo os autores, durante o processo de fabricação de uma parede, quanto maior a altura atingida no processo, tanto maior é o acúmulo de calor. Consequentemente a dissipação de calor com o substrato (condução) e com o ar ambiente (convecção) não é suficiente para resfriar a peça. É importante destacar que este fenômeno está diretamente relacionado à geometria da pré-forma, de modo que, quanto menor a espessura, a condução de calor é reduzida (17). Por outro lado, sabe-se que, dependendo do tipo de material, taxas de resfriamento muito elevadas podem resultar em microestruturas indesejáveis. Por conseguinte, o gerenciamento térmico dos processos MADA, ou seja, o planejamento e execução das ações que procuram controlar parâmetros térmicos ao longo da construção das pré-formas, é um fator-chave para obter peças íntegras e/ou obter produtividade.

Várias pesquisas sugeriram alternativas para obtenção de um gerenciamento térmico eficaz. Li *et al.* (50) propuseram o uso de um sistema de resfriamento com princípio termoelétrico, que consiste em um sistema de aletas posicionado nas adjacências da pré-forma em deposição. De acordo com esses autores, a produtividade é aumentada já que há uma redução do tempo de espera na deposição entre camadas. Além disso, em deposições de uma liga de alumínio, eles apontaram uma redução no tamanho de grão. Entretanto, uma barreira física imposta por esse método é a limitação para a construção de geometrias mais complexas.

Wu *et al.* (51) utilizaram um sistema de ejeção de CO₂ comprimido para reduzir as temperaturas de interpasse na deposição de paredes Ti6Al4V. Apesar de não terem observado grandes variações na evolução microestrutural e na dureza, os autores comentam que essa técnica é benéfica em termos de redução da oxidação e do tempo de espera, além de melhorar a exatidão geométrica.

A técnica de Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI), apresentada por Da Silva *et al.* (52), consiste na deposição de material dentro de um tanque onde o nível de fluido é continuamente controlado de modo a garantir a dissipação de calor da pré-forma, mas sem submergir completamente a peça. Os autores relatam que essa técnica apresenta potencial para minimizar ou eliminar problemas decorrentes da deposição via MADA. O ajuste dos ciclos térmicos permitiria um melhor controle de características geométricas e microestruturais das pré-formas. Além disso, a técnica permitiria a manutenção ou aumento da produtividade já que reduz o tempo de espera para atingir a temperatura interpasse ou da possibilidade de se aumentar as taxas de deposição sem incorrer no comprometimento das condições térmicas.

Apesar desses pontos positivos, os autores destacam algumas restrições para o uso da técnica, como:

- A dificuldade operacional associada à utilização de um tanque de água em sistemas com múltiplos eixos que incluem a movimentação da base de sustentação;
- A recomendação de uso preferencial em componentes que tenham pelo menos um plano de simetria por causa da limitação à posição plana;
- Atentar-se para o risco de contaminação da poça de fusão pelo hidrogênio evaporado quando se utiliza água como fluido refrigerante (opção preferencial).

A Figura 2.11 ilustra esquematicamente o regime térmico com a aplicação de RAQI em comparação com outras duas abordagens. A primeira consiste num resfriamento natural sem adição de técnicas de resfriamento, enquanto a segunda trata do resfriamento do substrato com nível de fluido fixo, conhecido como resfriamento passivo.

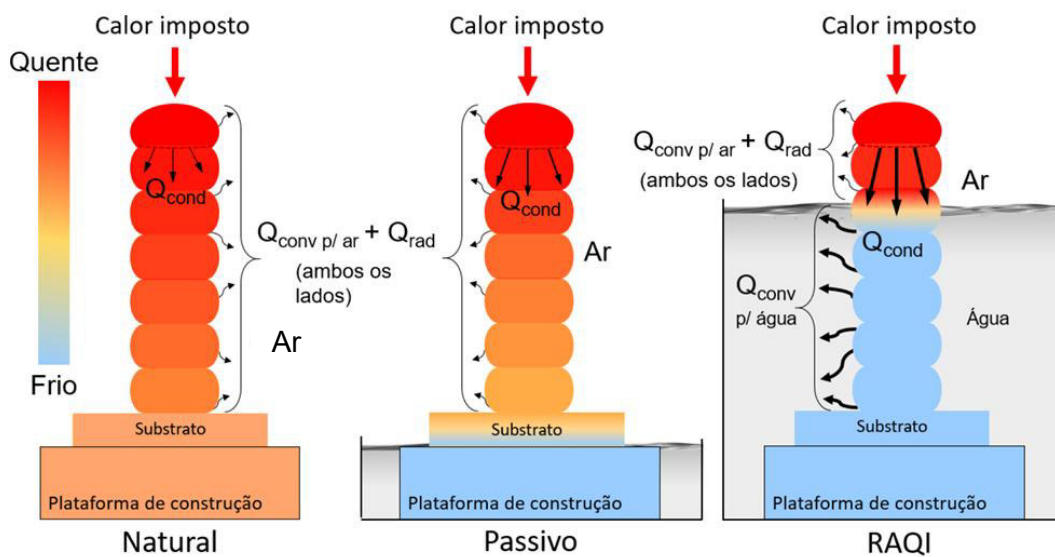


Figura 2.11 - Modelo físico simplificado do regime térmico em deposições com resfriamento natural, passivo e ativo (RAQI), onde Q_{cond} = calor por condução, Q_{conv} = calor por convecção, Q_{rad} = calor irradiado. Adaptado de (52).

Os trabalhos citados na seção 2.4 mostram que muitas pesquisas obtêm teores de austenita/ferrita fora dos padrões de um AID, com teor acima de 70% de austenita. O gerenciamento térmico é destaque por ajudar a manter esse equilíbrio durante o processo. No trabalho de Jorge *et al.* (53), se fez a avaliação do uso da técnica RAQI na fabricação via MADA-GMA, com adaptação CMT, de uma parede feita de AISD

(Aços Inoxidáveis Super Duplex) através do estudo da microestrutura obtida, além de outras características, como geometria e produtividade. Os autores mostraram que a técnica RAQI consegue produzir peças com teores de ferrita próximos dos 50%, reforçando que o gerenciamento térmico adequado no processo MADA tem como consequência a produção de peças sem alterar as propriedades originais do material.

2.6 Propriedades mecânicas e microestruturais

Na deposição de uma camada no processo de MADA, o metal de adição passa por um regime de calor, de certo modo, semelhante àquele de uma deposição por soldagem. Contudo, na MADA uma nova camada é depositada sobre o anterior, o qual ainda se encontra em temperatura relativamente elevada, mas já apresenta uma camada oxidada pelo contato com a atmosfera. Além disso, após depositada, uma camada sofre sucessivos aportes de calor, decorrentes dos inúmeros passes posteriores; o que não ocorre numa junta soldada convencional, mesmo que multipasses. Portanto as camadas depositadas na MA se mantêm em alta temperatura por mais tempo em relação ao que ocorre numa junta soldada tradicional. Consequentemente, mesmo que os parâmetros de soldagem e os materiais sejam os mesmos, a microestrutura de uma parede fabricada por MADA será distinta em relação àquela do metal de solda de uma junta soldada. Em decorrência disso, o estudo da microestrutura e seus reflexos nas propriedades mecânicas de uma peça produzida por MADA é muito importante (54,55).

As propriedades mecânicas das peças fabricadas são testadas retirando corpos de prova de acordo com padrões fornecidos pelo meio científico, os quais são retirados a distâncias diferentes do substrato, em direções e ângulos diferentes, como mostrado na Figura 2.12 (56).

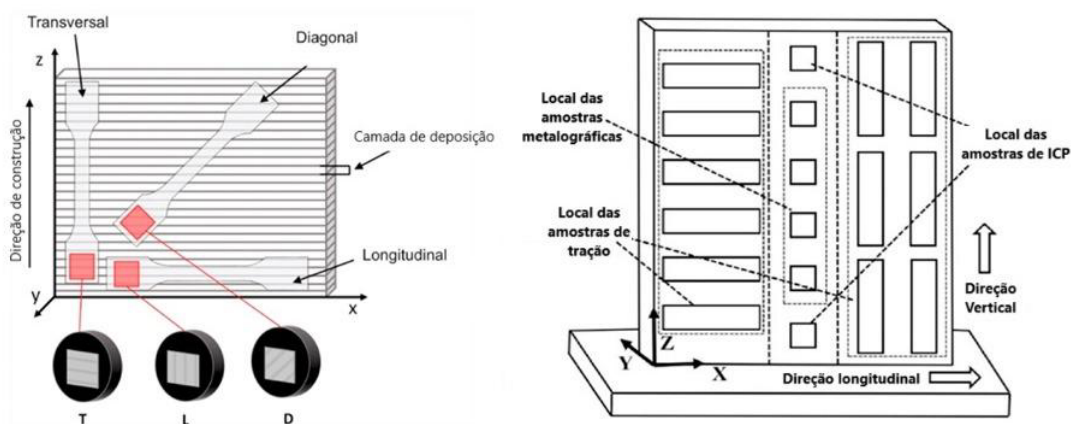


Figura 2.12 - Espécimes para teste de tração simples: (a) em diferentes ângulos e (b) posições em relação ao substrato. Adaptado de (28).

Como já mencionado, as propriedades mecânicas são muito afetadas pela microestrutura e a distribuição dos grãos numa peça fabricada por meio de MADA (57). Além disso, há pesquisas que explicam como o ciclo térmico complexo, presente na fabricação das peças, faz com que se obtenham grãos grossos colunares na microestrutura (58).

Muitas pesquisas mostram como a microestrutura das peças fabricadas variam dependendo de como cada uma delas é feita, entrando no âmbito de escolha de materiais de deposição e processo de soldagem adaptado para a manufatura aditiva (28). Como exemplo disso se tem uma pesquisa feita por Liu *et al.* (59) em que foi revelado que a soldagem GTAW de peças de Al resulta numa maior dureza e resistência em relação às soldas de GMAW, já que há fortalecimento por precipitação e menor desenvolvimento de porosidade, deixando claro que a fabricação de peças a base de Al usando o processo GTAW adaptado para a MA é mais confiável, mecanicamente, do que a fabricação usando GMAW.

No trabalho de Karunanithi *et al.* (43) também se observou a variação dos valores de microdureza, influenciada pela proporção de fases, com diferenças de cerca de 19,6 HV0,3 entre direções. A variação nos resultados obtidos estava diretamente relacionada com a orientação da microestrutura analisada, sendo necessária uma análise em diversas direções.

Aravind e Jerome (48) procuraram determinar as propriedades mecânicas do ER2209 fabricado via MADA com o intuito de analisar a possibilidade aplicação das peças no setor automotivo e marítimo. Para isso foram tomadas direções distintas

sem perda significativa de desempenho. Os resultados mostraram que não havia comprometimento nas características mecânicas do ER2209.

Entretanto, técnicas adicionais podem melhorar as características mecânicas das peças produzidas. Um exemplo disso é a transferência de metal frio para o processo MADA baseado em Al, que melhora o controle de porosidade, controle de disposição de metal e diminui a entrada de calor, tendo como consequência uma estrutura de grãos finos que minimiza a retenção de H₂ e, portanto, diminui a formação de porosidade (60,61).

A microestrutura e transformação de fase do processo MADA depende dos materiais usados, alta temperatura desenvolvida, taxa de resfriamento e taxa de deposição de material (62). Os defeitos que são produzidos durante o processo também afetam as propriedades mecânicas e, por esse motivo, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas concentrando os estudos em formas de reduzir defeitos como porosidade, trincas superficiais, deformações e inclusões de gás através da introdução de técnicas de pós-processamento (61,63).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista que a pesquisa será feita de forma experimental, é preciso que sejam especificados os materiais e metodologias usadas. Sendo assim, este capítulo é focado em apresentar os materiais que serão usados para o estudo em questão, assim como também explicará as estratégias de análise adotadas. As figuras e tabelas que não apresentam fonte indicam que foram feitas pelo próprio autor. A Figura 3.1 abaixo mostra o fluxograma metodológico das principais atividades da pesquisa.

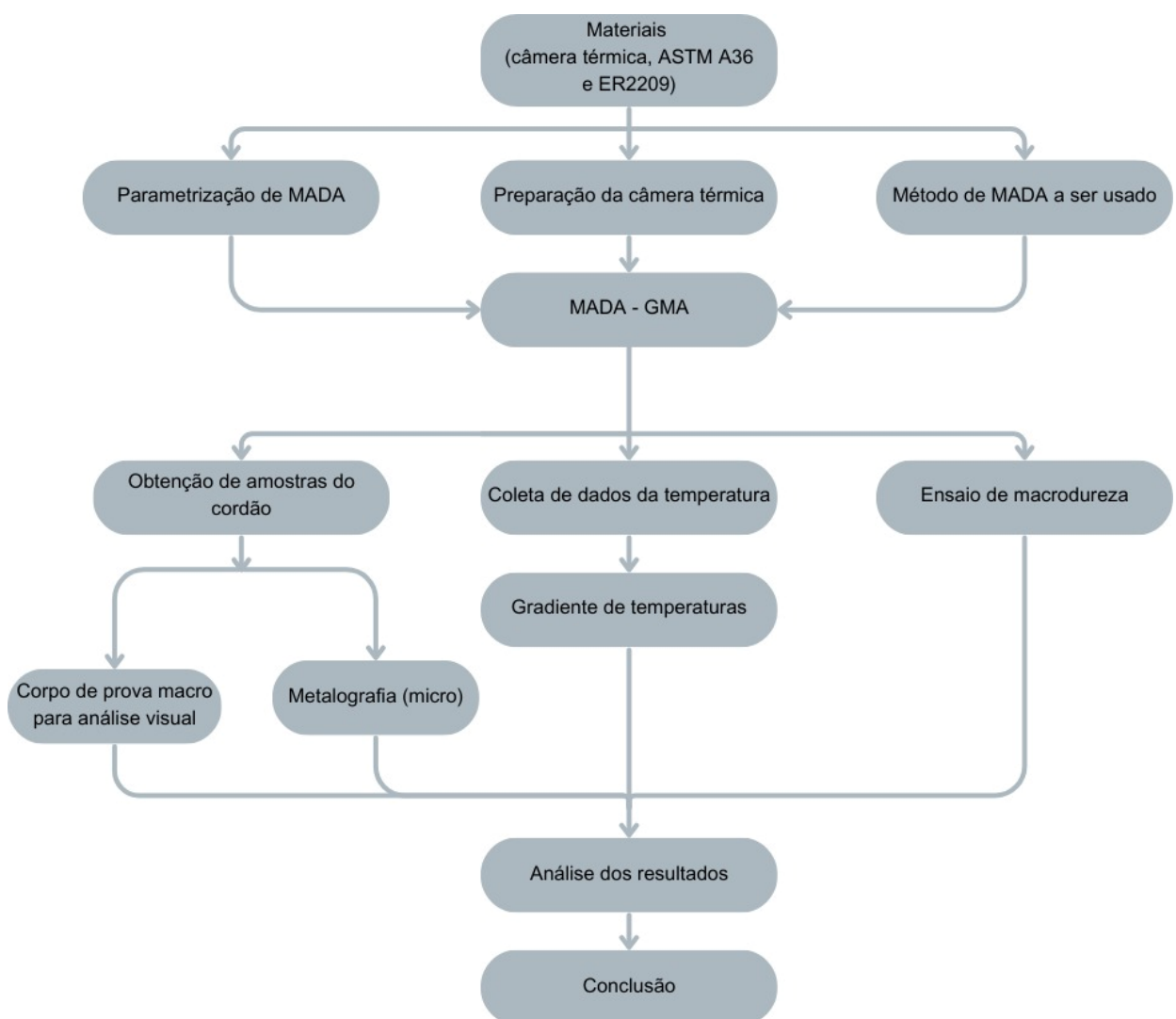


Figura 3.1 - Fluxograma metodológico.

3.1 Materiais

Esta seção é separada para mostrar e descrever os equipamentos e softwares utilizados na pesquisa.

3.1.1 Definição do material de deposição e substrato.

Como material de deposição optou-se pelo uso do arame ER2209 – que é um AID – com 1 mm de diâmetro, já que se espera que sua capacidade de mudança de estrutura seja claramente visível devido às grandes mudanças de temperatura durante o processo de fabricação da parede. Além disso, os aços duplex vêm adquirindo grande relevância no setor industrial e de fabricação de estruturas.

Por outro lado, para garantir a manutenção do valor da DBCP durante todo o processo, é necessário um substrato que não sofra grandes deformações decorrentes das tensões residuais impostas pelo calor do processo.

Seguindo as recomendações de Scotti (27), foi escolhido um aço A36 com espessura (E) de 19 mm, comprimento (C) de 270 mm e largura (A) de 270 mm. Essa espessura foi definida de modo a propiciar boa dissipação de calor da parede sendo fabricada, bem como diminuir a deformação do substrato provocada pelas tensões residuais. A Tabela 3.1 mostra os dados dos materiais que serão usados na pesquisa.

Tabela 3.1 - Especificação de material de deposição e substrato.

Material	Especificação	Dimensões
Deposição	ER2209	Ø1 mm
Substrato	ASTM A36	270x270x19 mm

Além das especificações de tamanho dos materiais, é preciso ter conhecimento da composição química de cada um deles. A Tabela 3.2 mostra a composição química do eletrodo e do substrato.

Tabela 3.2 - Composição química do material de deposição e do substrato (43,64).

Material	Al	Cu	Cr	Mn	Mo	Nb	Ni	Si	C	N	P	S	Fe
ER2209	0,01	0,05	22,9	1,54	3,1	-	9	0,53	0,025	0,16	0,02	0,005	Bal.
ASTM A36	-	0,2	-	1,03	-	-	-	0,4	0,26	-	0,04	0,05	Bal.

3.1.2 Câmera térmica e leitura de temperatura.

Como explicado na seção 1.1, o trabalho fará uso de uma câmera térmica capaz de realizar a leitura do gradiente de temperatura durante o processo de fabricação de uma parede por meio de MADA. A Figura 3.2 mostra a câmera térmica usada para a pesquisa e o programa pelo qual é possível manipulá-la.

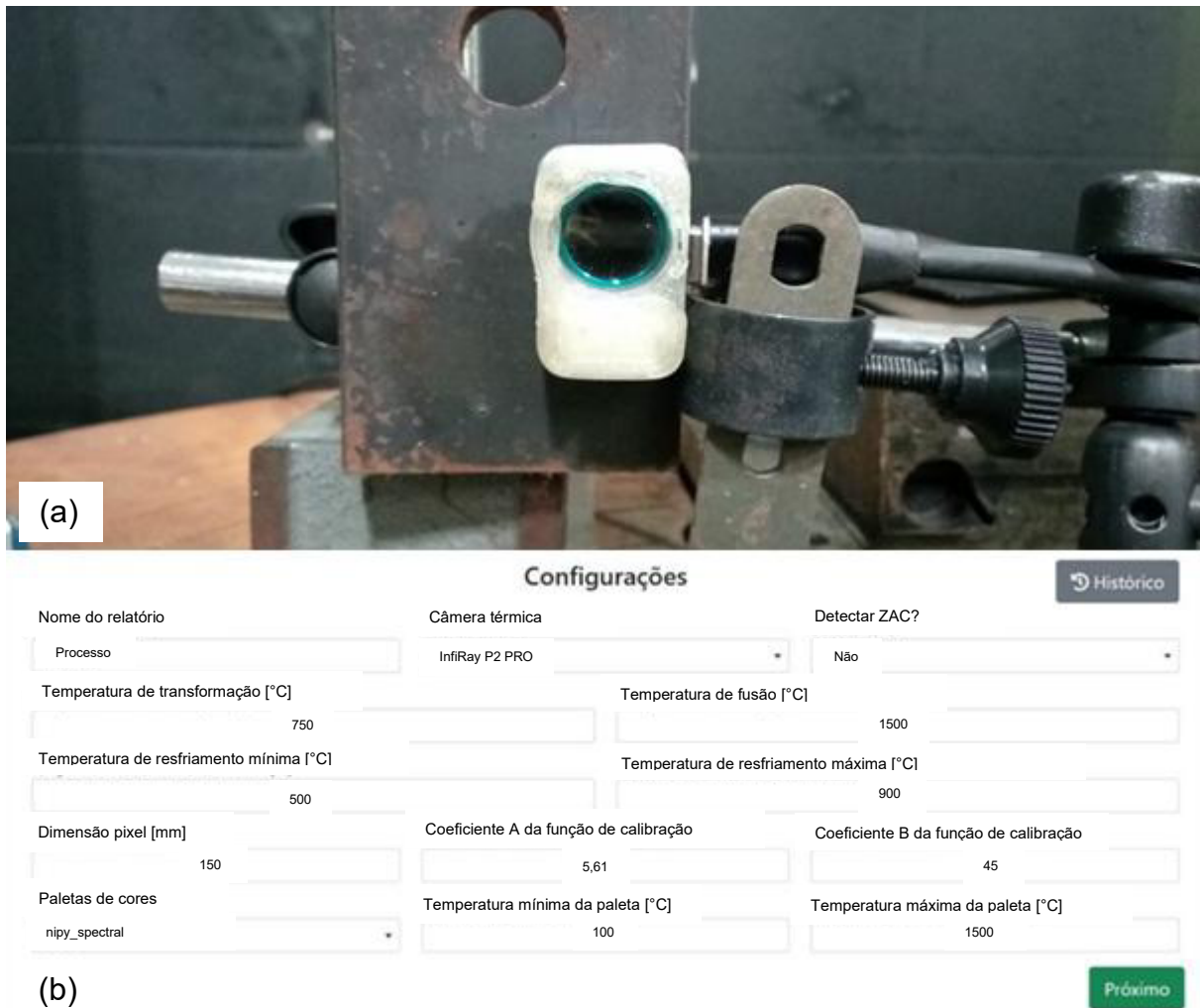


Figura 3.2 - Câmera térmica (a) e programa de uso (b).

A câmera térmica foi disponibilizada pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Soldagem (LaPES) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Os dados de temperatura são salvos em formato de relatório, gerado num arquivo do *software* Excel. A marca da câmera é InfiRay com modelo P2 Pro com baixo consumo de energia.

A câmera apresenta resolução de 256x192 com tamanho de pixels de 12 μm , taxa de frame de 25 Hz (captura 25 imagens por segundo) e foi projetada para captar temperaturas entre -20°C e 600°C . Entretanto, como na pesquisa esperava-se atingir temperaturas acima do limite captado pela câmera, foi adicionado um filtro, que permitiu captar temperaturas de até 1500°C . O filtro conta com OD (transmissividade) igual a 10% e diâmetro de 25 mm. Para poder atingir esse limite de temperatura e fazer uso do filtro, a câmera conta com um programa, criado em pesquisa anterior na FURG. Nessa pesquisa foi feita a calibração da leitura de temperatura, transformando as leituras captadas pela câmera em temperaturas que correspondem aos valores reais do processo MADA-GMA. O programa criado conta com uma plataforma virtual onde são colocados coeficientes que permitem essa mudança de leitura. A Figura 3.2b mostra a aparência da plataforma, destacando a paleta de cores usada, na qual as cores azuladas representam altas temperaturas, cores mais próximas do vermelho são as baixas temperaturas e branca é quando excedeu o limite máximo de temperatura. Outras informações da plataforma são o tamanho dos pixels, além das temperaturas máxima, mínima, de transformação e de fusão.

3.1.3 Sistema de robô para MADA-GMA

O sistema usado no trabalho foi descrito na Figura 2.4 da seção 2.2. Os equipamentos se encontram no Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem (LaPES) na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Na Figura 3.3 é possível ver todos os equipamentos usados para formar o sistema de fabricação MADA-GMA.

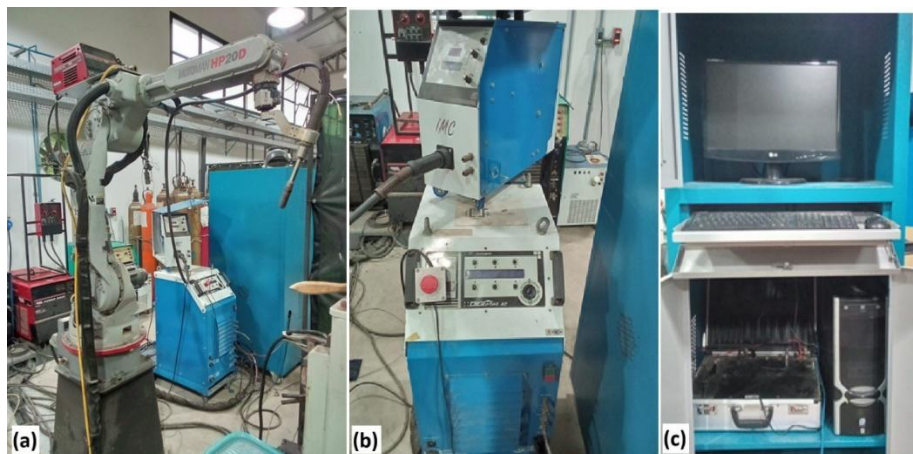


Figura 3.3 - Sistema MADA-GMA com (a) robô MOTOMAN HP20D, (b) Fonte de soldagem e (c) Sistema de aquisição de dados.

Na Figura 3.3a, mostra-se o braço robótico da marca Yaskawa, conhecido pelo nome MOTOMAN HP20D, com 6 eixos de movimento. Além de aplicações de manufatura aditiva, o robô tem a capacidade de realizar outras atividades como soldagem, corte e montagem de peças de pequeno e médio porte. Um controle faz parte do conjunto, fornecendo a possibilidade de definir parâmetros como velocidade de movimento e as suas respectivas direções. A fonte de soldagem utilizada para a adaptação do processo MADA para o processo MADA-GMA pode ser vista na Figura 3.3b. A fonte utilizada é da linha DigiPLUS A7, que conta com modelos de saída dupla DCDU, ACDU e ACDCDU. Além disso, é uma fonte de soldagem multiprocessos a arco inteligente com um processador ARM de 32 bits. Pelo fato de ter a capacidade de ser utilizada para diversos tipos de processos de soldagem, é preciso configurá-la para o processo GMAW, que faz parte da adaptação do método MADA-GMA. Vale destacar que a fonte irá operar na forma convencional do MIG/MAG.

Para ter uma melhor confiabilidade da configuração dos parâmetros, o sistema de aquisição de dados, mostrado na Figura 3.3c, foi instalado para a leitura de tensão e corrente durante a fabricação da peça. A aquisição dos dados foi realizada ligando um cabo entre o computador e o robô.

Com a leitura dos dados, foi feito o acompanhamento do comportamento dos parâmetros citados anteriormente. Além disso, após finalizada a leitura, é preciso um tratamento dos dados adquiridos durante o processo, bem como calcular os valores de média aritmética de cada um deles. A média obtida se trata do valor que realmente corresponde aos parâmetros utilizados.

Além desses materiais, o sistema contou com o uso de 8% CO₂ e 92% Ar como gás de proteção durante o processo de fabricação da parede. O uso desse gás não é recomendado para ser usado em AIDs, pois o teor de CO₂ super os 3% recomendados, oxidando o cromo do material depositado e diminuindo as resistências à oxidação e à corrosão, além de prejudicar a tenacidade e aumentar a dureza (65). Entretanto o custo para a aplicação desse gás é muito inferior para o processo GMAW quando comparado com misturas de gases. Como o objetivo do trabalho não está em medir a resistência à corrosão, o uso de 100% de CO₂ não prejudicaria os resultados, com exceção da dureza.

Todo os materiais descritos nesta parte do trabalho fazem parte do sistema MADA adaptado para o método GMA e, portanto, não deve ser confundido com o processo GMAW.

3.1.4 Durômetro e Microscópio de análise microestrutural

O microscópio usado para extrair as imagens é um microscópio óptico da marca *Olympus*, modelo GX51F e série 0F68306. Além disso, o equipamento contém a Câmera *Hayear* 5130 que faz uso do programa *Hayear* num computador para gerar as imagens visualizadas no microscópio. As microestruturas servirão como base para relacionar o gradiente de temperaturas obtido pela câmera térmica e a microestrutura formada.

Para o ensaio de dureza foi utilizado um durômetro universal da marca Zwick de modelo ZHU187.5/ZHV30 que tem a capacidade de medir valores de durezas Brinell, Vickers e Rockwell. Cada teste segue as normas DIN EM ISO 6506, DIN EM ISO 6507 e DIN EN ISO 6508, respectivamente. Além disso, é possível usar diferentes cargas em cada teste.

3.2 Metodologias para geração de resultados

Esta seção é dedicada aos métodos utilizados para obter os resultados da pesquisa.

3.2.1 Parâmetros do processo.

Para esta pesquisa a Tensão (U) e a Velocidade de Alimentação do arame (V_a) adotados foram de 19 V e 5,8 m/min, respectivamente. Além disso adotou-se a DBCP de 15 mm. Além disso, a Vazão de Gás (Q) adotada para o processo é de 30 L/min, mantendo-se constante. Como já mencionado, a Velocidade de Soldagem (V_s) seria configurada usando o controle do robô. Dessa forma, para a pesquisa foi adotado o valor de 60 cm/min. A Tabela 3.3 mostra os parâmetros do processo definidos para os experimentos.

Para obter cada um dos parâmetros, procurou-se por um valor médio considerando trabalhos que tenham o processo MADA como método de fabricação (43,45). A tensão e a DBCP foram retirados de referências, enquanto para a V_a , Q e V_s foram feitos testes experimentais, mantendo-se fixo um deles e mudando os outros dois, tendo como critério de aceitabilidade a geometria de uma parede com 12 camadas depositadas.

Tabela 3.3 - Parâmetros do processo MADA-GMA empregados na fabricação da parede.

Parâmetros de processo	Valor
Tensão (U)	19 V
$DBCP$	15 mm
Velocidade de alimentação (V_a)	5,8 m/min
Vazão do gás (Q)	30 L/min
Velocidade de soldagem (V_s)	60 cm/min

3.2.2 Especificações da fabricação da parede por MADA.

O formato da peça fabricada é mostrado na Figura 3.4, imagem na qual estão expostas as dimensões principais e a estratégia de deposição. Vale destacar que o número de camadas depositadas (n) é igual a 50.

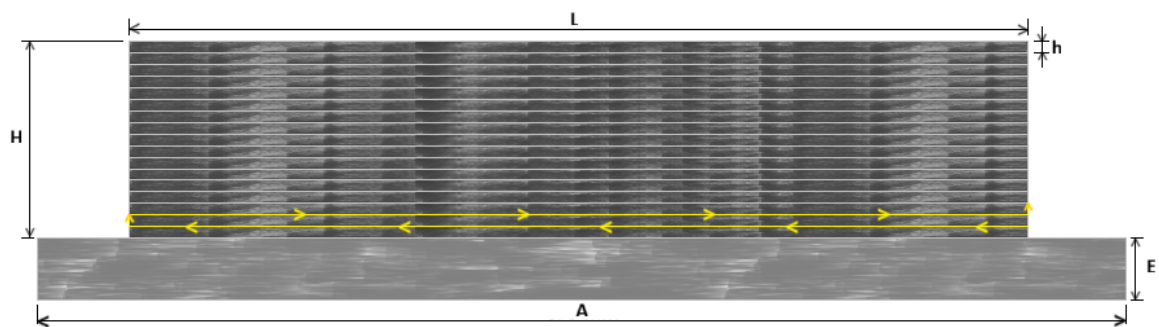


Figura 3.4 - Ilustração da parede fabricada.

A Tabela 3.4 mostra as dimensões adotadas para a fabricação.

Tabela 3.4 - Dimensões da parede.

Parâmetros de fabricação da parede	Dimensões
Comprimento da camada (L)	200 mm
Número de camadas (n)	50
Altura da camada (h)	1,1 mm
Altura da parede (H)	55 mm
Espessura da parede (e)	6 mm

A parede foi posicionada exatamente no centro da placa de base, para que fosse obtida a melhor dissipação de calor por condução possível. A Figura 3.5 mostra

em detalhes a localização da parede, ao passo que a Tabela 3.5 mostra as medidas geométricas do substrato e da localização da parede.

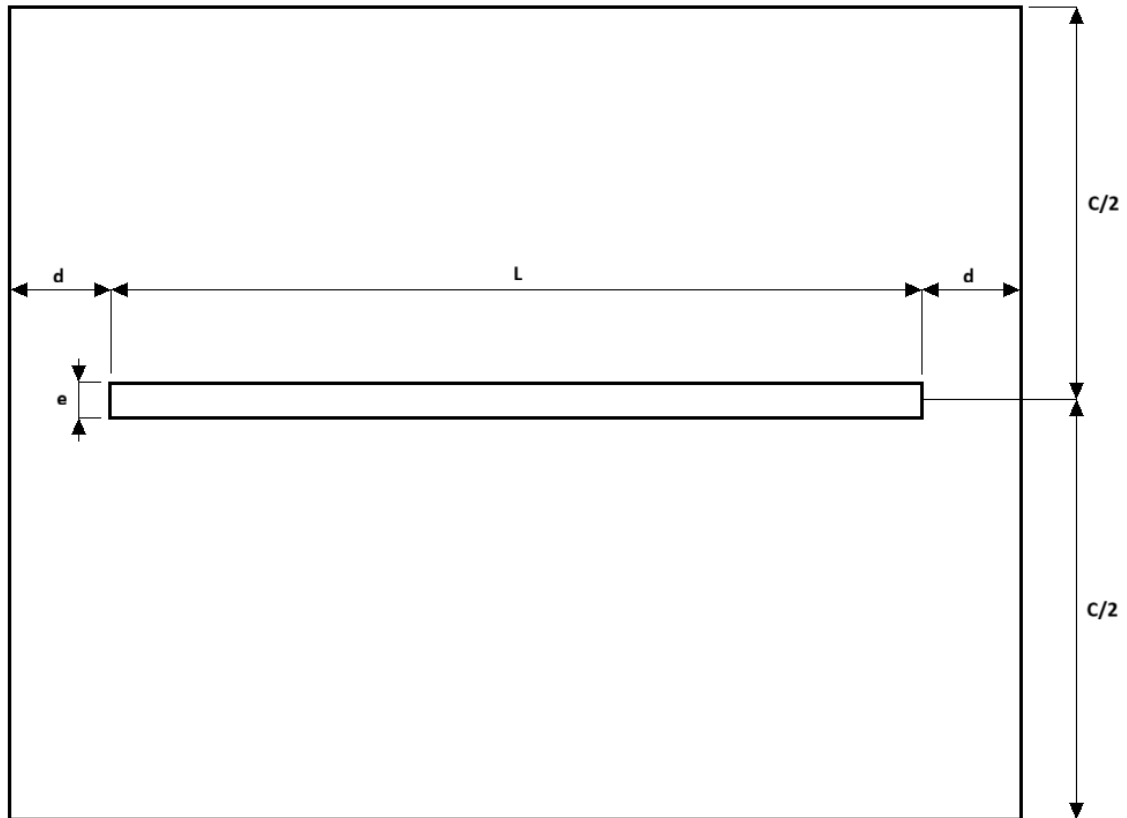


Figura 3.5 - Localização da parede no substrato.

Tabela 3.5 - Medidas do substrato e da localização da parede.

Medidas de localização da parede	Dimensões
Comprimento do substrato (A)	270 mm
Largura do substrato (C)	270 mm
Distância até a ponta da parede (d)	35 mm

3.2.3 Método de análise de ciclos térmicos

A leitura de temperatura da câmera se baseia nas áreas que estão dentro de cada pixel, realizando um cálculo de valores médios de todos os dados de temperaturas que aparecem em cada pixel.

Como a resolução da câmera é muito pequena, há a possibilidade de que dois ou mais camadas estejam localizados dentro de um mesmo pixel, resultando num

mesmo ciclo térmico para ambas as camadas. Por esse motivo, optou-se por subdividir a parede em 9 seções (desconsiderando as 5 primeiras camadas). Portanto cada seção apresentou 5 camadas na direção vertical. Além disso, procurou-se extrair um ciclo térmico representativo para cada seção. A Figura 3.6 mostra o método de análise utilizado. Com os ciclos térmicos obtidos, procura-se compará-los uns com os outros e retirar conclusões com os diferentes comportamentos observados.

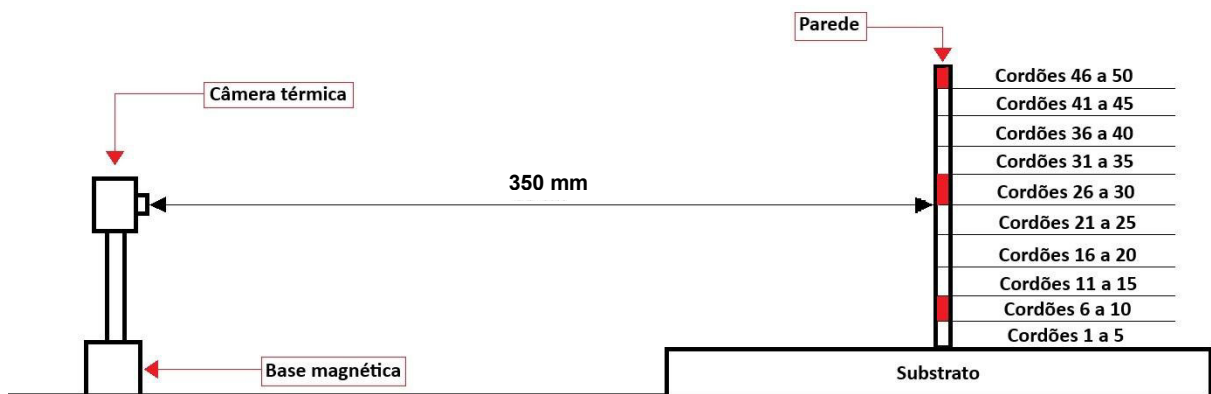


Figura 3.6 - Método de captação de temperatura.

A câmera foi posicionada a 350 mm do centro da placa-base, de modo que a lente ficasse o mais paralela possível em relação à parede durante a fabricação.

O programa da câmera gera dados pontuais nos quadros (*frames*) gerados durante a gravação e os valores médios de temperatura são calculados dentro da área do pixel. Por esse motivo, para garantir a captação de dados, foram selecionados pontos numa linha localizada aproximadamente na região central da parede tendo como referência o frame que mostra o ponto na camada desejada. Na Figura 3.7a é mostrada a camadas 6, enquanto na Figura 3.7b mostra-se a camada 50. Em ambas as figuras pode ser visto o arame na poça de fusão, sendo este o ponto marcado para a extração de dados.

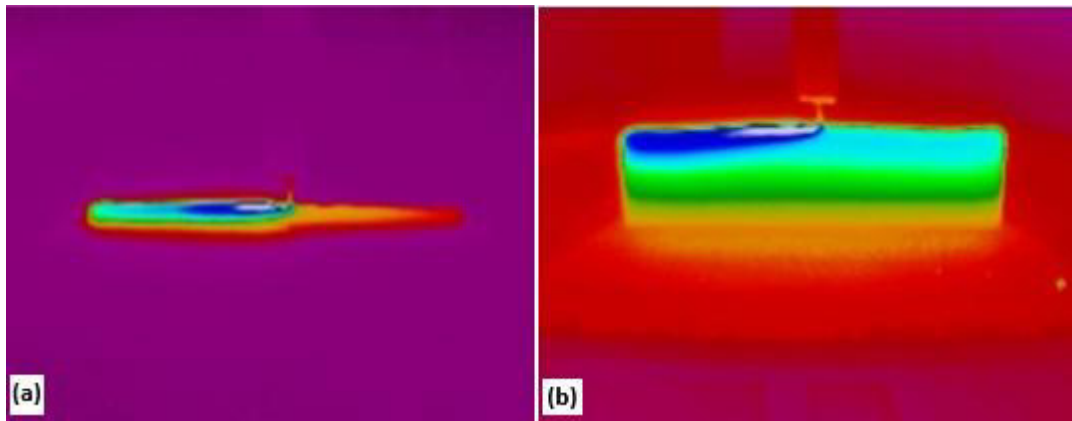


Figura 3.7 - Frames no centro da parede entre as camadas 6 a 10 (a) e entre as camadas 46 a 50 (b).

Os dados coletados são convertidos pela própria câmera em formato de arquivo numérico do *software* Excel. Esses dados são usados para plotar gráficos por meio do programa *Octave*.

É importante salientar que a câmera capta ondas de calor e, portanto, valores de temperatura são coletados antes mesmo da camada ter sido depositado. Neste caso, a câmera capta a temperatura do ar, aquecido pela passagem do arco na deposição de camadas anteriores. Consequentemente os dados tiveram que ser tratados, para que os gráficos mostrassem apenas a parte significativa do ciclo térmico. A Figura 3.8 mostra um exemplo de gráfico gerado, sobre o qual foi disposta uma linha vertical que separa os dados de camadas que existem (à direita) daqueles que não existem [à esquerda]. Neste gráfico a abscissa representa o tempo de deposição, ou seja, o período decorrido desde a abertura do arco elétrico. Portanto foi necessário referenciar a escala de tempo à camada de interesse, de modo que a origem do eixo das abscissas correspondesse ao instante de ocorrência da deposição, no ponto de medição. Desta forma o ciclo térmico representa o calor captado pela câmera, a partir do instante em que ocorre a deposição no ponto selecionado. Tal ciclo térmico compreende também o aporte de calor promovido pelos passes posteriores. A Figura 3.9 mostra o mesmo gráfico da Figura 3.8 após o tratamento dos dados.

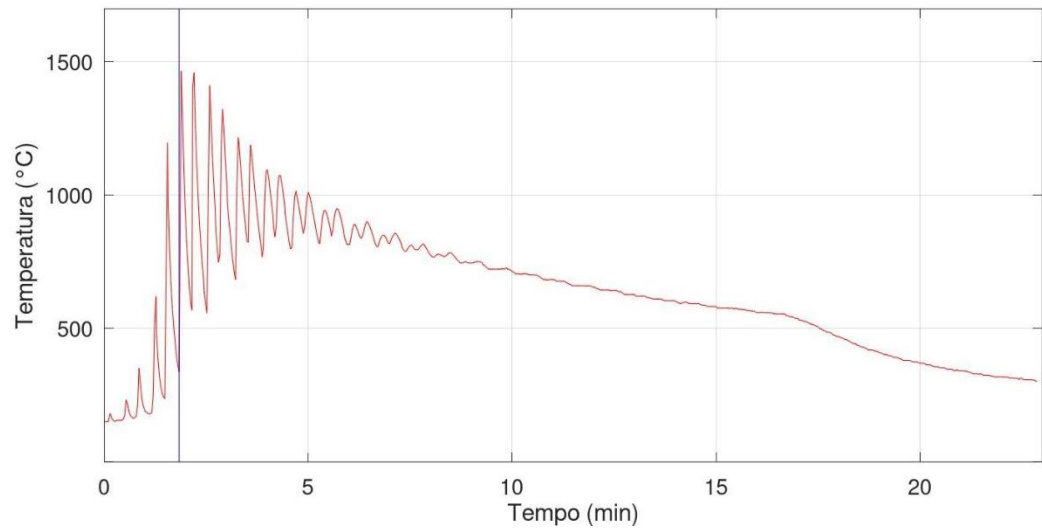


Figura 3.8 - Gráfico gerado pelos dados da câmera usando o programa *Octave* indicando a separação entre dados coerentes e os não coerentes de uma camada qualquer.

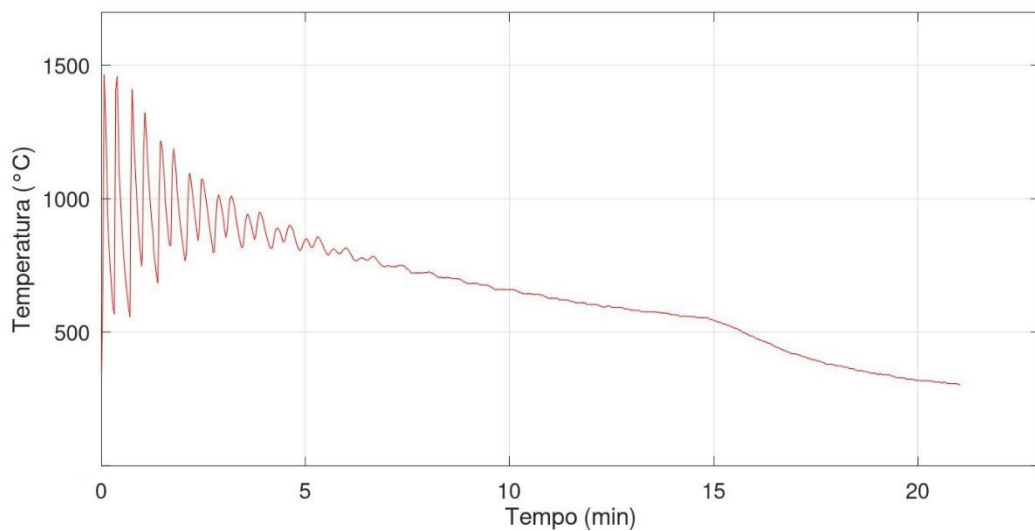


Figura 3.9 - Gráfico com dados incoerentes cortados.

3.2.4 Estratégia de análise microestrutural

Para a análise microestrutural a parede foi cortada transversalmente ao meio, obtendo um corpo de prova que revela todas as camadas de interesse. Foram analisadas as microestruturas formadas nas mesmas seções analisadas pela câmera térmica, segundo o seccionamento em nove regiões já mencionado. Consequentemente, para estimar a localização de cada camada, foi realizada a medição da altura da parede (H) e este valor foi dividido pelo número de camadas (n),

para obter o valor médio de altura de camada. Com isso, é possível estimar a que altura se encontra cada camada.

A análise microestrutural é baseada na quantificação da austenita encontrada num AID, usado uma técnica conhecida como Análise Metalográfica Quantitativa por Processamento de Imagens, que tem como princípio a separação das fases com base na intensidade de cinza encontrada numa imagem que foi transformada em binária (preto e branco). O programa *ImageJ* apresenta uma configuração automática para definição do limiar de teor de cinza usado para quantificar as fases e foi usada neste trabalho. Consequentemente, procurou-se medir 10 pontos em cada seção de análise e depois quantificá-las usando o programa *ImageJ*. Com os teores quantificados, foram calculadas média e desvio padrão para cada seção. A quantificação das fases foi elaborada a partir de imagens com aproximação de 100x.

A preparação da amostra compreendeu os processos de lixamento, polimento e ataque químico. O lixamento envolveu o escalonamento de lixas de granulometria 80 até 2000. O polimento foi realizado em duas etapas, com alumina de 1 μm e de 0,5 μm . O agente químico usado para revelar a microestrutura foi adaptado do trabalho de He et. al. (63), conhecido por Beraha e tem a seguinte composição: 15 ml de HCl + 85 ml de água destilada + 1 g de Metabissulfito de Potássio. O ataque foi realizado por imersão por um tempo aproximado de 10 s. Foram obtidas imagens da microestrutura com aumentos de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

3.2.5 Estratégia para análise de Dureza Vickers

Para o ensaio de dureza Vickers foram escolhidas três regiões de amostragem. Tomando por base a imagem da Figura 3.6, essas regiões foram a 1 (camadas 6 a 10), 5 (camadas 26 a 30) e 9 (camadas 46 a 50) que estão destacadas com vermelho. O ensaio foi feito seguindo critérios da norma ASTM E92-23 (66) usando uma carga de 100 kgf com tempo de aplicação de 10 s. Além disso, em cada região de amostragem, foram efetuadas 5 medições, para posterior cálculo de média e desvio padrão.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta informações a respeito do sistema de aquisição de dados, bem como dos regimes de calor captados pela câmera térmica. Posteriormente são apresentadas as imagens micrográficas e os dados de dureza. As imagens não referenciadas constam como da autoria do autor.

4.1 Resultados do sistema de aquisição de dados

Para melhor monitoramento do processo, o sistema de aquisição de dados acompanhou o mesmo desde a abertura do arco até o fechamento. Posteriormente, os valores obtidos passaram por um cálculo de média aritmética. Os valores médios de corrente e tensão são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores médios do sistema de aquisição de dados.

Variáveis	Valores
Tensão (U)	17,8 V
Corrente (I)	119,2 A

De acordo com o especificado na seção 3.2.1, a tensão ajustada na fonte foi de 19 V, mas o sistema de aquisição mediu um valor médio de aproximadamente 17,8 V. Este erro aproximado de 1,2 V está dentro da faixa usualmente observada nos processos a arco elétrico (67), pois nem sempre o valor parametrizado coincide com o real. A corrente, por sua vez, não foi um parâmetro previamente estabelecido no processo, pois o sistema de controle da fonte atua sobre a tensão. Contudo a corrente elétrica é diretamente relacionada ao aporte de calor. A corrente média de 119,25 A tem valor elevado, porém dentro do que é esperado no processo de soldagem empregado.

4.2 Análise visual da parede fabricada.

A definição criteriosa dos parâmetros de soldagem, descritos na seção 3.2, conduziu à expectativa de obtenção de uma geometria de parede adequada. Contudo foram observadas algumas diferenças da geometria final em relação à inicialmente

estimada. A Figura 4.1 mostra a parede fabricada, no topo da qual é observada clara ondulação. Uma escala foi posicionada nos pontos máximos e mínimos desta ondulação, para mostrar sua ordem de grandeza. As bordas e o centro apresentaram altura de ~58 mm, enquanto nas seções localizadas entre elas o valor ficou entre 55 mm e 58 mm.

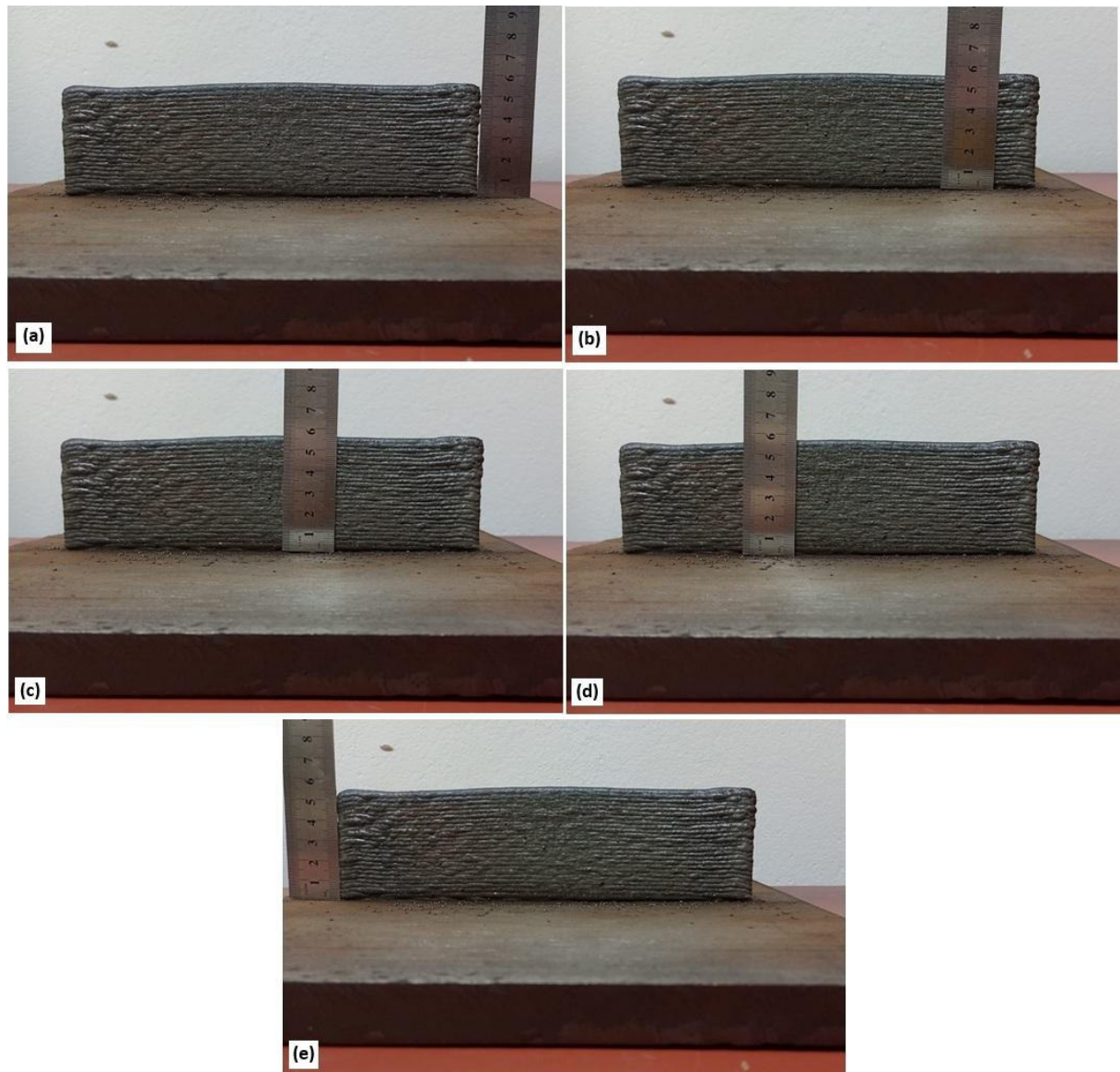


Figura 4.1 - Diferentes alturas medidas para parede fabricada por MADA-GMA.

Além da diferença na altura, também foi observada variação na espessura da parede, ao longo de seu comprimento. A Tabela 4.2 mostra os valores medidos nas regiões A, B, C, D e E vistas na Figura 4.2. Observou-se dimensões maiores que 6 mm nas extremidades, com afunilamento em direção ao centro.

Tabela 4.2 - Diferentes espessuras medidas na parede.

Seção	Espessura (mm)
A	9,4
B	6,5
C	6,3
D	6,4
E	8,8

Por fim, a Figura 4.2 mostra que também houve variação no comprimento da parede, a qual resultou aproximadamente 5 mm maior que os 200 mm esperado.

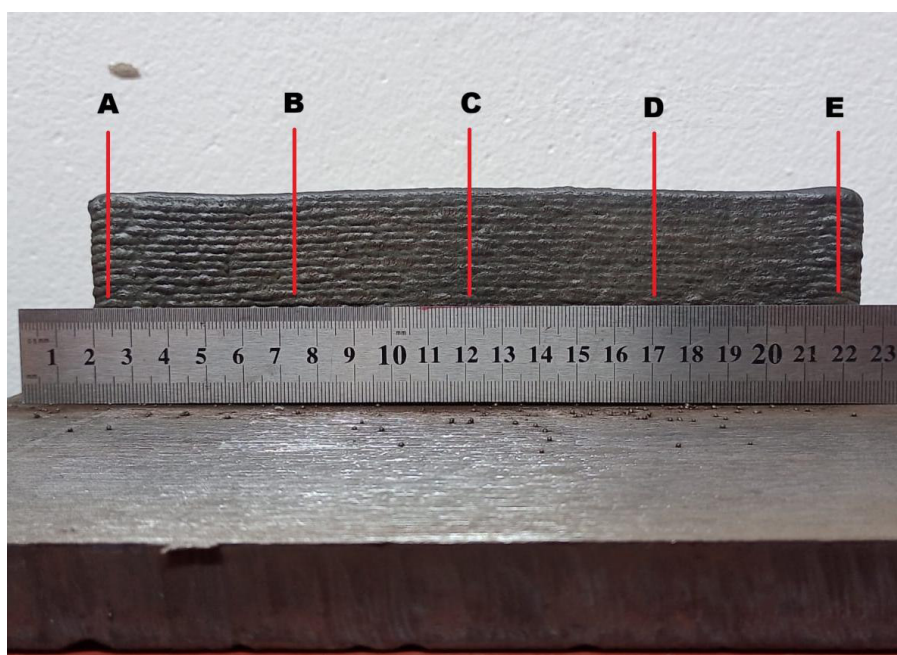


Figura 4.2 - Comprimento da parede fabricada por MADA-GMA.

A justificativa para a flutuação nos valores dimensionais das extremidades está relacionada ao processo de deposição, que acaba sendo influenciado pela desaceleração da tocha quando a mesma chega aos extremos da parede e uma posterior aceleração para o seu retorno na deposição da camada seguinte, enquanto a velocidade de alimentação do arame não apresenta alteração durante todo o processo de deposição. Entretanto, os valores de altura superiores a 55 mm na seção central da parede precisariam de um estudo mais aprofundado para ser explicado que talvez tenha relação direta com os ciclos térmicos. Em outras palavras, a MADA não

garante exatidão dimensional, sendo necessário prever certo sobremetal às peças. Para obter a exatidão geométrica almejada, etapas posteriores de usinagem e de acabamento devem ser empregadas.

Por outro lado, como evidenciado nas Figuras 4.1 e 4.2, o acabamento superficial da parede não é tão grosseiro a ponto de exigir grande retirada de material em processos posteriores.

4.3 Análise dos ciclos térmicos.

Para a análise dos ciclos térmicos é necessário conhecer a temperatura de transformação de fase do material depositado. Para isso foram empregados o diagrama pseudo-binário e as equações de Cr_{eq}/Ni_{eq} da seção 2.3.2, na faixa relacionada ao material de deposição ER2209. A Figura 4.3 mostra as linhas de localização desse material sobre o diagrama. Observa-se que a temperatura de transformação da ferrita para a austenita ocorre a 1120°C, ao passo que a combinação desses microconstituintes se estende no intervalo aproximado de 400 a 1120°C. Tais resultados estão de acordo com o trabalho de Hejripour *et al.* (45).

A temperatura de 1120°C indica o momento em que a fase austenita do material deixa de existir, havendo apenas crescimento do tamanho de grão da ferrita. Entretanto, dentro da zona austenita-ferrita, com o decaimento da temperatura há a nucleação e crescimento de austenita. Esse comportamento está diretamente relacionado ao tipo de microestrutura formada no final do processo. Além disso, assim como foi mencionado na seção 2.3.2, controlar a taxa de resfriamento e a temperatura de processo é fundamental para a formação da microestrutura desejada. Por esse motivo, entender os ciclos térmicos de cada camada é uma informação de grande relevância.

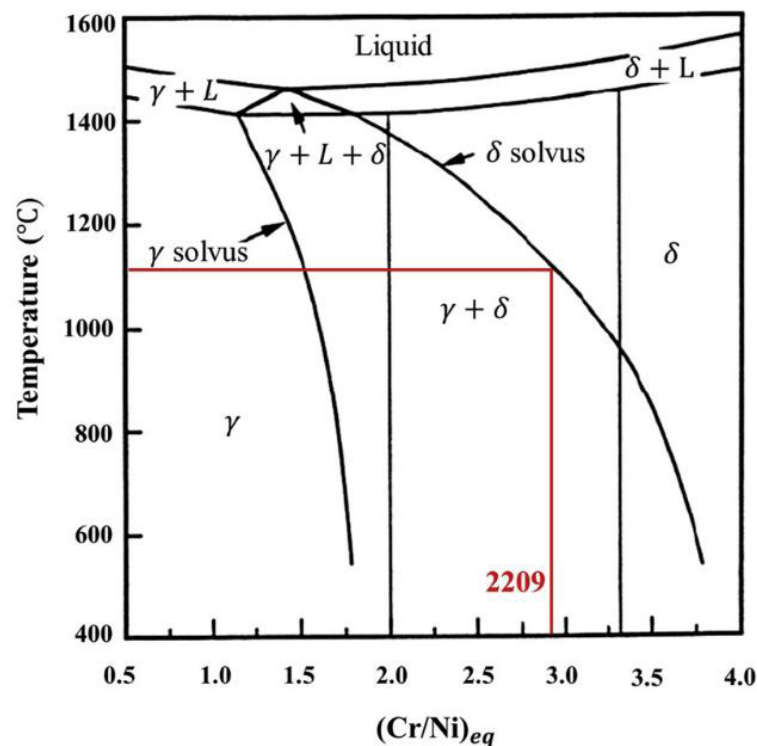


Figura 4.3 - Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni com a localização do metal de adição ER2209 (45).

De acordo com a metodologia explicada na seção 3.2.3, foram retirados vários gráficos de ciclos térmicos de cada uma das 9 seções da parede. Devido à variabilidade geométrica propiciada pela MADA, e à pequena altura apresentada pelas camadas, num primeiro momento não foi possível associar inequivocamente cada camada ao respectivo ciclo térmico captado pela câmera. Entretanto, após a plotagem dos ciclos térmicos, estes revelaram picos, associados ao aquecimento anterior à deposição, ao instante da deposição e, posteriormente, ao reaquecimento ocasionado pelos passes posteriores. Para detectar o ciclo térmico de uma determinada camada depositada, tomou-se como critério que o maior pico de temperatura representava o instante em que a tocha passava no ponto marcado daquela camada, sendo que o decréscimo da temperatura dos picos com o tempo representariam o momento em que a tocha passava pela camada superior àquela selecionada, enquanto que o aumento da temperatura dos picos com o tempo até atingir o pico maior representariam as temperaturas geradas pela deposição de camadas anteriores àquela selecionada, gerando valores de temperatura de uma camada inexistente.

A Figura 4.4 mostra um exemplo de ciclo térmico sofrido pela camada 6. Entre os picos 1 e 5 nota-se o aumento de temperatura, o ponto 6 é o pico com maior

temperatura e após ele os valores de picos começam a diminuir. Também se observa que, aproximadamente em torno da 20ª camada depositada, o regime de resfriamento da sexta camada não se alterou significativamente. Ou seja, há uma faixa de material aquecido, de altura aproximada de 14 camadas (~15,5 mm), que acompanha o processo de deposição. A região abaixo dessa faixa entra num regime de resfriamento bastante lento.

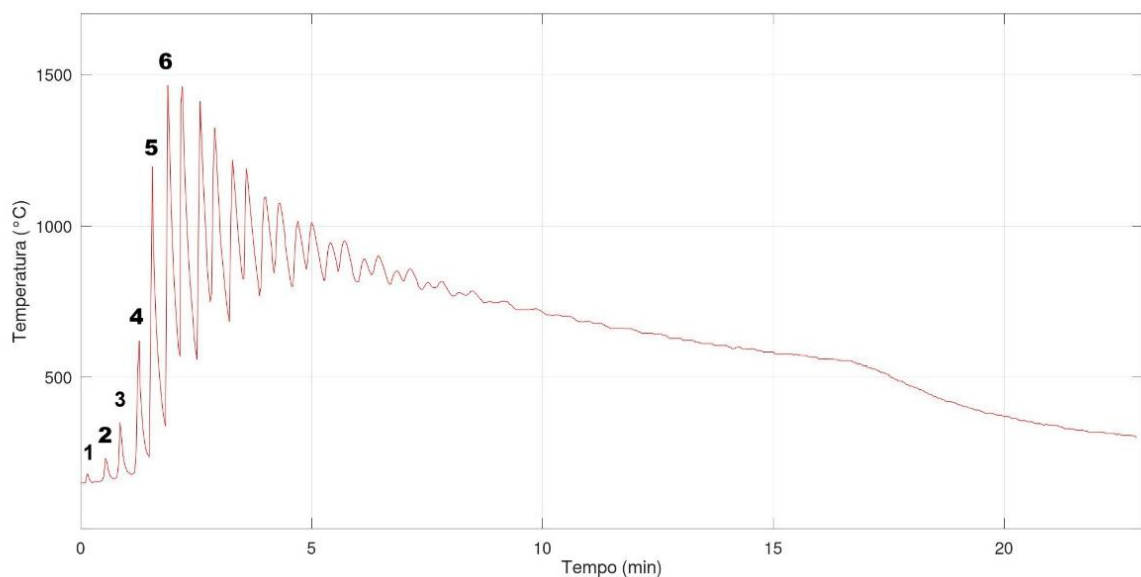


Figura 4.4 - Detecção da camada correspondente a cada gráfico de ciclos térmicos tendo como exemplo a camada 6.

Das 45 camadas consideradas para a análise, foi possível resgatar os dados de 24 deles, com pelo menos um gráfico de cada seção. A Tabela 4.3 mostra quais foram as camadas que tiveram seus gráficos de ciclos gerados.

A contagem dos ciclos é feita a partir da extremidade do gráfico que melhor define cada oscilação de temperatura. No caso da Figura 4.4, nota-se com maior clareza os picos do lado esquerdo do gráfico, enquanto os picos do lado direito são imperceptíveis, impossibilitando a sua contagem a partir daquela extremidade. No caso das últimas seções, a contagem foi feita da direita para a esquerda, pois há uma distinção melhor de picos obtendo uma imagem inversa àquela da Figura 4.4, com picos imperceptíveis do lado esquerdo. Além disso, a plotagem de uma linha vertical, como mostrado na Figura 3.8, contribuiu para o referenciamento do ciclo térmico de interesse.

Tabela 4.3 - Camadas que tiveram gráficos de ciclos térmicos gerados.

Seções	Camadas com gráficos
Seção 1 (6 a 10)	6 e 7
Seção 2 (11 a 15)	12, 14 e 15
Seção 3 (16 a 20)	17, 18, 19 e 20
Seção 4 (21 a 25)	22 e 25
Seção 5 (26 a 30)	27 e 29
Seção 6 (31 a 35)	32, 34 e 35
Seção 7 (36 a 40)	36 e 39
Seção 8 (41 a 45)	41, 44 e 45
Seção 9 (46 a 50)	47, 49 e 50

O processo de deposição completo, desde a abertura até a interrupção do arco elétrico, levou aproximadamente 16min:40s. O instante em que o arco é interrompido corresponde ao último ponto de inflexão, bastante sutil, observado no gráfico da Figura. 4.4. nesse tempo específico ($t \approx 16\text{m}:40\text{s}$). Nesse diagrama, bem como nos demais que serão mostrados em sequência, os dados de temperatura abaixo de 300oC foram descartados, porque abaixo desse valor não há alterações relevantes na microestrutura.

A Figura 4.5 mostra os ciclos de temperaturas representativos das camadas 7, 27 e 47, que correspondem às seções 1, 5 e 9, respectivamente. A primeira seção, próxima à placa-base, apresenta um pico de temperatura levemente inferior ao observado nas outras duas seções. Além disso, o período de permanência em temperatura superior à de transformação de fase (1120°C, indicada por uma linha horizontal azul nos diagramas) é inferior àquele das demais seções, principalmente a intermediária. Tal regime de calor mais curto e brando na seção 1 se deve à influência da placa-base, que atua como uma espécie de trocador de calor.

Por outro lado, os picos de temperatura se tornam maiores quanto mais camadas são depositadas, pois a placa-base, que inicialmente estava à temperatura ambiente e contribuía efetivamente para a retirada de calor, se aquece a um ponto em que não mais contribui significativamente nesse sentido. Portanto a troca de calor passa a ocorrer preponderantemente por convecção com o ar.

Por fim, sobre os diagramas da Fig. 4.5. também foi plotada uma linha horizontal na temperatura de 400°C, que corresponde ao limite inferior da região ferrita-austenita do diagrama pseudo-binário (Fig. 4.3). Observa-se, portanto, que o material de todas as seções se mantém durante um longo período dentro dessa faixa de coexistência de fases. Além disso, como já observado, o material das camadas intermediárias é submetido várias vezes à temperatura de transformação completa em ferrita.

Num resumo, entre as seções 1 e 5 há um aumento gradual, camada após camada, do tempo de permanência dentro da região ferrítica. Nas seções posteriores esse tempo de permanência diminui, devido à proximidade com o final do processo. Portanto, o maior tempo de permanência na região ferrítica foi observado nas seções 5 e 6, que correspondem às camadas 27 da Figura 4.5b e 34 da Figura 4.6a.

Também vale destacar que as camadas próximas ao final do processo apresentam temperaturas altas, dentro da região ferrítica, característica evidenciada na Figura 4.6. Tomando o ciclo térmico da camada 34 (Figura. 4.6a) o maior tempo de permanência dentro da região ferrítica é de aproximadamente 3 min:30 s.

Na Figura XX o trabalho de Hejripour *et al.* (45), é possível ver o comportamento dos ciclos térmicos de uma parede de 15 camadas através de simulação numérica. Comparando os resultados de Hejripour com os obtidos neste trabalho, nota-se a semelhança no comportamento da temperatura de pico com o decorrer do tempo, apresentando aumento de tal forma que a temperatura *solvus* é ultrapassada. Além disso, as temperaturas se mantêm cada vez por mais tempo dentro da zona de coexistência ferrita-austenita.

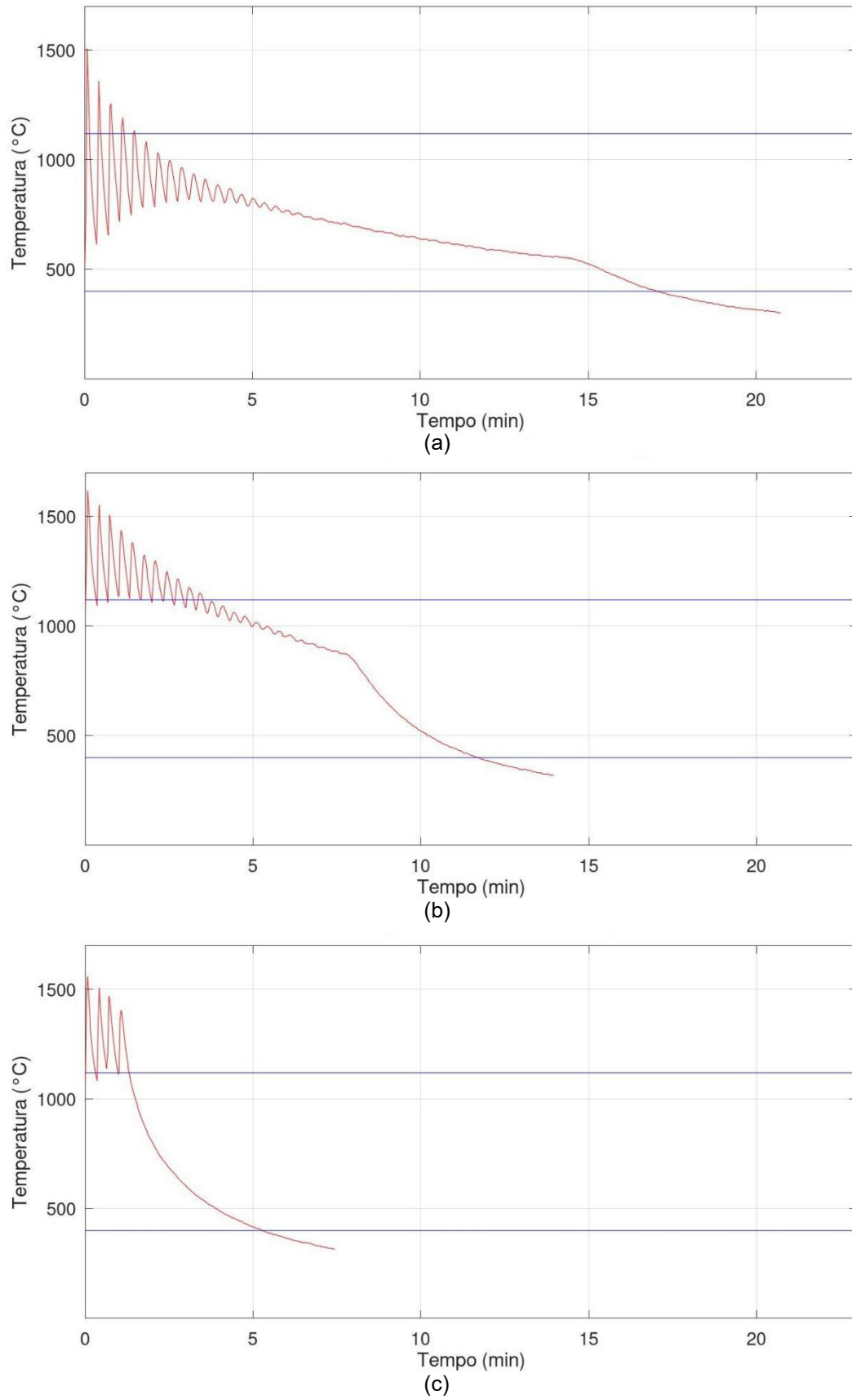
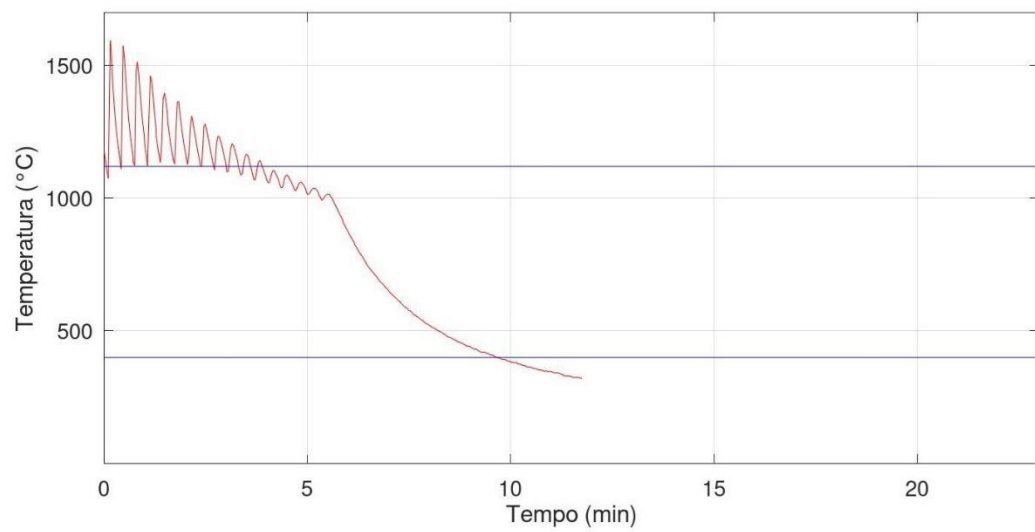
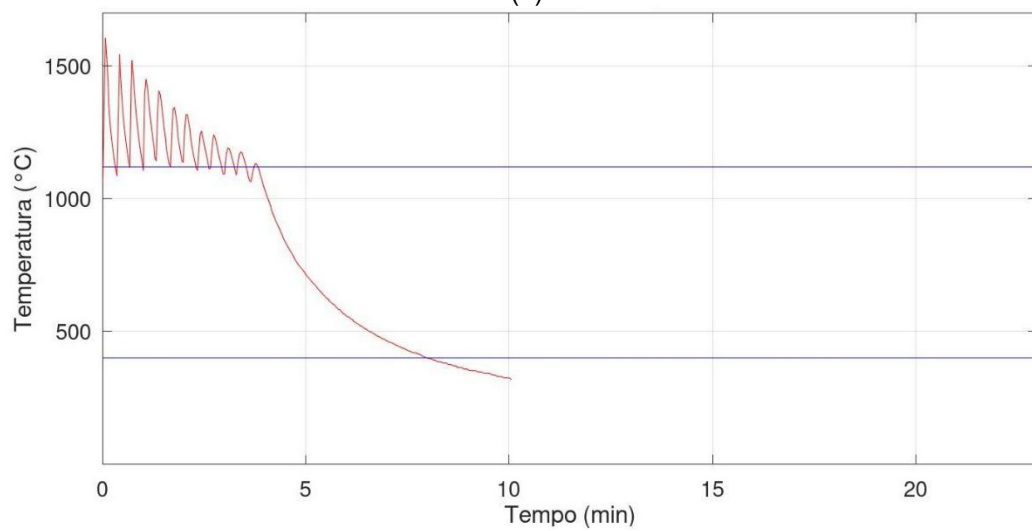


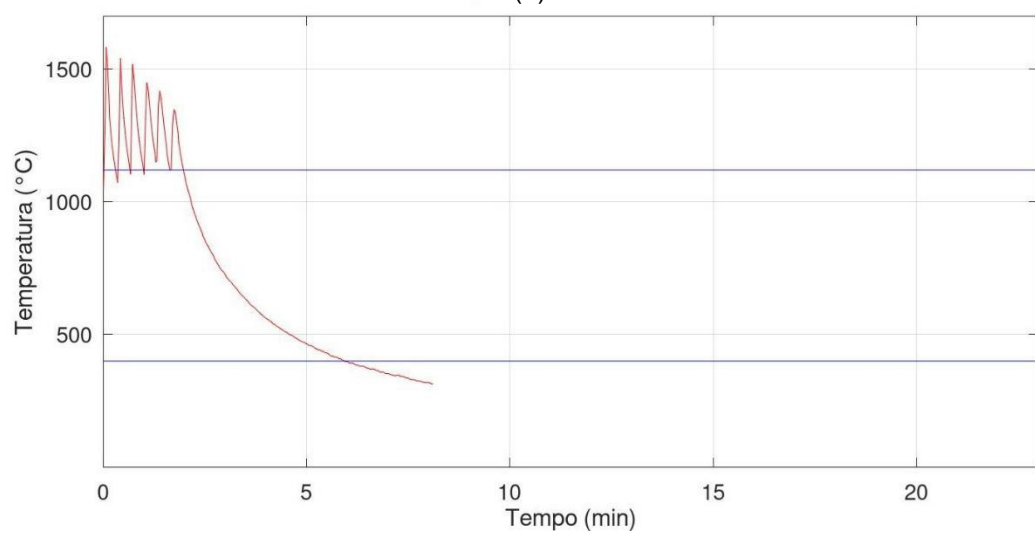
Figura 4.5 - Comparação entre ciclos térmicos da camada 7 (a), 27 (b) e 47 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 - Comparação de permanência dos ciclos térmicos dentro da região ferrítica entre os ciclos das camadas 34 (a), 39 (b) e 45 (c).

4.4 Quantificação de fase da microestrutura da parede.

Por causa do grande número de ciclos térmicos aos quais a peça foi exposta e da temperatura em que a parede foi mantida durante sua construção, considerou-se a possibilidade do processo gerar mudanças significativas na microestrutura de uma peça construída usando AID. Por esse motivo, uma análise microestrutural da parede foi realizada, tendo como foco a quantificação das fases formadas.

A Figura 4.7 mostra um exemplo da microestrutura encontrada na seção 1 que pode ser comparada com a microestrutura da Figura 2.9 obtida por Posch *et al.* (34), referente às imagens perto da base. Vale lembrar que, como explicado na seção 3.2.4, as imagens de microscopia óptica são consideradas representativas para cada seção do corpo de prova e por esse motivo são tratadas em referência à seção de análise e não a uma determinada camada.

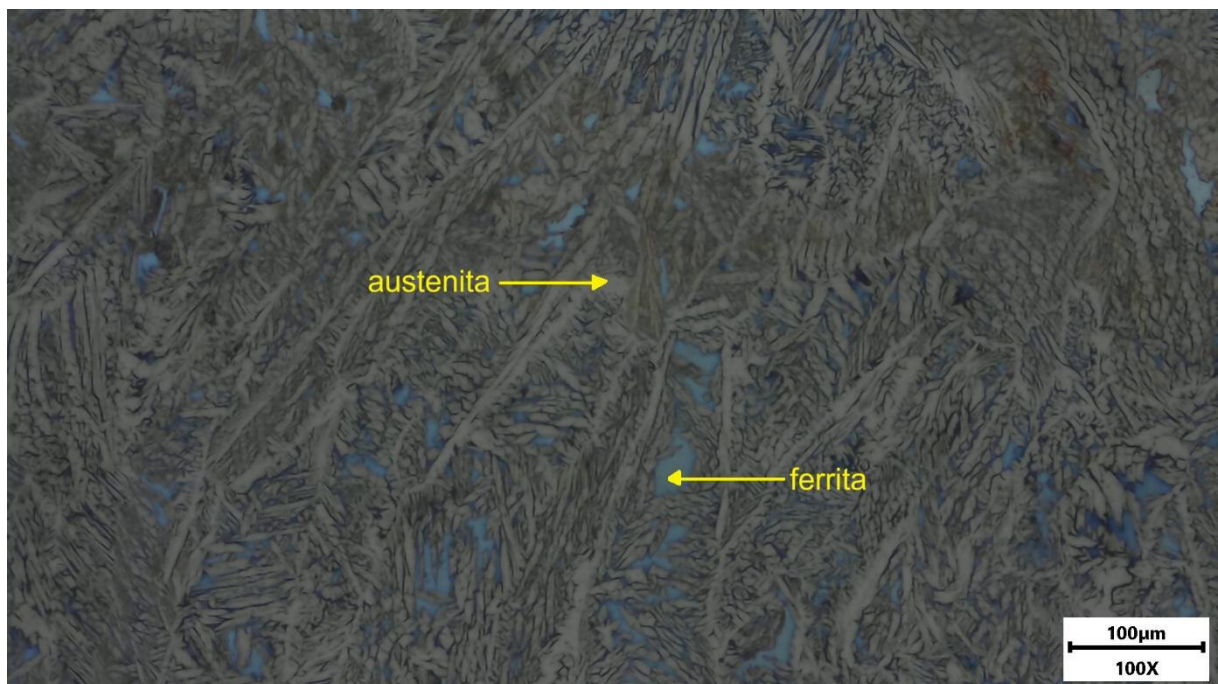


Figura 4.7 - Microestrutura formada pelo processo MADA-GMA.

As cores escuras e azuladas na imagem representam a ferrita, enquanto as cores mais claras identificam a austenita. Segundo Posch *et al.* (34), a microestrutura típica de AIDs em soldagem se caracteriza pela presença da austenita numa matriz ferrítica. Entretanto, tal característica não é vista na Fig. 4.7, deixando claro que, para o processo realizado na pesquisa, o material teve impacto em sua microestrutura.

Para quantificar as fases da microestrutura foi seguido o procedimento descrito na seção 3.2.4, fazendo uso do programa *ImageJ*. A Figura 4.8 mostra a mesma imagem da Fig. 4.7, a qual foi tratada para obter sua forma quantificada em branco e preto. A austenita apresenta cor branca e a ferrita é preta. Para obter a proporção das fases, o programa quantifica a austenita, ao passo que a proporção de ferrita é obtida por subtração.

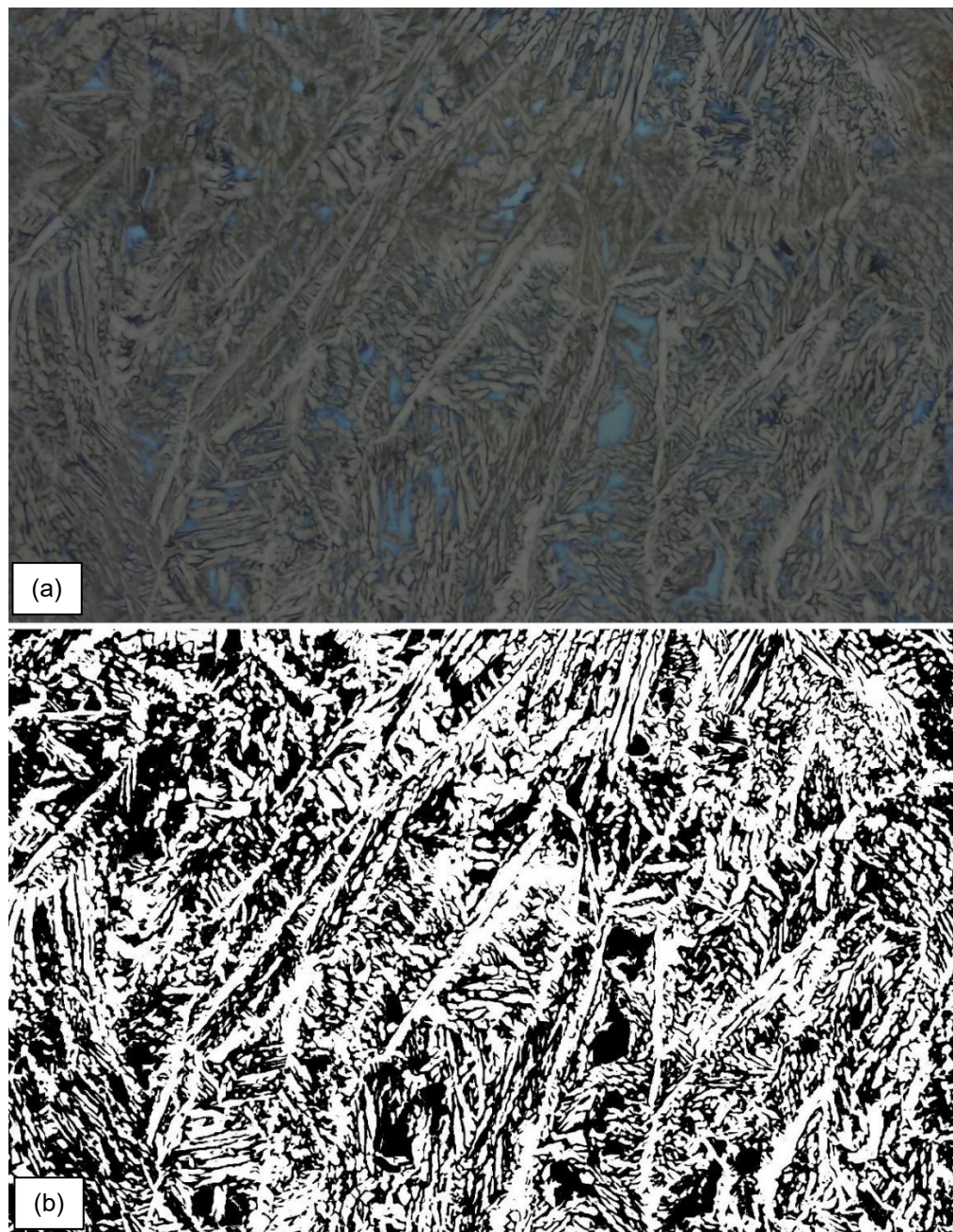


Figura 4.8 - Quantificação de fase de uma das imagens da seção 1 da amostra: (a) Figura 4.7 e (b) é a fase quantificada por *ImageJ*.

A Figura 4.8 mostrou um resultado de ~54,3% de austenita e ~45,7% de ferrita, o que é um resultado condizente com o que se espera de um AID. Entretanto, por se tratar de uma figura com aproximação de 100x e uma escala em nanômetros, não é correto considerar que esse valor seja representativo para toda uma seção que engloba 5 camadas com alturas aproximadas de 1,1 mm. Por esse motivo, foi feita a medição das fases de 10 áreas escolhidas de forma aleatória para cada seção e, posteriormente, foram calculadas a média e o desvio padrão para cada seção. A Tabela 4.4 mostra as 10 medidas feitas para cada seção. Nota-se considerável dispersão dos dados coletados.

Tabela 4.4 - Valores medidas do teor de austenita em cada seção.

Seções	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Teor de Austenita	61,4	58,1	69,8	71,3	72,1	71,6	67,7	68,9	65,3
	54,3	67,3	70,0	69,6	67,9	72,8	72,7	71,3	62,7
	62,9	67,0	67,2	70,5	73,6	69,8	67,9	67,1	67,0
	57,7	63,9	73,6	67,3	68,8	73,1	68,4	71,1	69,3
	59,3	64,2	70,9	67,9	70,7	65,3	73,3	71,0	67,4
	59,7	69,2	68,6	68,0	74,7	66,6	71,9	66,3	65,9
	60,2	69,9	69,2	68,6	71,9	72,1	74,3	72,0	59,3
	55,7	67,0	71,9	71,7	71,0	69,3	72,4	68,9	58,8
	58,4	68,7	69,3	69,1	71,5	69,4	70,6	72,8	65,7
	66,3	67,1	67,3	68,5	72,8	67,4	73,5	68,4	65,2

Adicionalmente, a Tabela 4.4 mostra alguns valores de austenita muito além do desejado, considerando como 30% o limite mínimo de ferrita para AID na soldagem (44). Em outras palavras, quando o teor de austenita supera os 70% não é mais correto considerar que a microestrutura do aço é de um AID, pois fica muito longe do que seria um duplex com 50% austenita e 50% ferrita.

O valor da média e desvio padrão, para cada seção, é mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Média e desvio padrão para cada seção da parede.

Seção	Média	Desvio Padrão
1	59,5884	3,2862
2	66,2455	3,2629
3	69,762	1,8684
4	69,2523	1,4354
5	71,5	1,9673
6	69,7334	2,5569
7	71,2755	2,3383
8	69,7627	2,0484
9	64,6494	3,2428

A Figura 4.9 mostra um gráfico com os valores das médias em conjunto com o desvio padrão de cada seção.

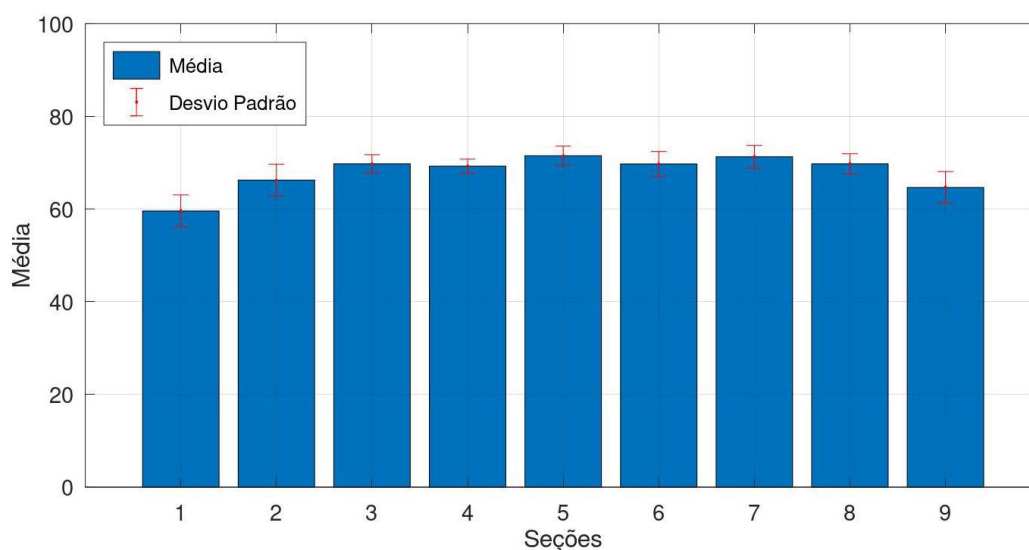


Figura 4.9 - Quantificação de austenita por seções.

Os dados revelados pela Tab. 4.4 e pela Fig. 4.9 indicam que, na maioria das seções, os teores de austenita são muito elevados, chegando muito perto do limite de aceitabilidade para classificação do material como aço duplex. Em algumas seções, tal limite foi ultrapassado.

As seções 1 e 9 são as que apresentam menores teores de austenita, mesmo assim relativamente distantes da proporção ideal 1:1. Na seção 1, que apresenta o menor teor de austenita, quando se considera o seu desvio padrão, o teor pode chegar

a valores bem próximos da seção 9. Porém, quando é feita a mesma análise para a seção 9, os seus teores são bem próximos da seção 8, que já apresenta uma média bem próxima do limite.

Entre as seções 1 e 3 existe um crescimento no teor de austenita que, nas próximas seções estabiliza em valores próximos de 70%. Posteriormente, na última seção, nota-se uma pequena queda no valor médio, mas considerando o seu desvio padrão, o valor de austenita supera um pouco o menor valor da seção 8.

Na Tabela 4.5 e na Figura 4.9, desconsiderando as seções 1 e 9, os valores médios de austenita estão muito próximos de 70%. Caso sejam considerados os valores de desvio padrão, o teor de austenita pode se aproximar de 74%, como nas seções 5 e 7.

Os resultados de quantificação de austenita são parecidos àqueles obtidos por Karunanithi *et al.*(43) que relata teores de austenita que ultrapassam o 70%. Por outro lado, o comportamento da ferrita enquanto à posição da camada em relação ao substrato é a mesma, concentrando maiores teores próximo da base e no topo da parede. Para Karunanithi, o topo da parede apresenta teor de ferrita que varia entre 22% e 27%, enquanto nesta pesquisa o valor médio de 35,4% da ferrita na seção do topo apresenta uma variação entre 32,2% e 38,6%, mostrando proximidade entre os resultados. Vale lembrar que o teor de ferrita citado por Karunanithi corresponde unicamente à camada 100 enquanto o teor de ferrita desta pesquisa corresponde à média de 5 camadas depositadas.

Entretanto, no caso do trabalho de Aravind e Jerome (48), o processo MADA foi capaz de manter as características bifásicas do ER2209, mostrando que o uso de parâmetros ou técnicas diferentes influenciam na microestrutura obtida dando destaque à real possibilidade de usar um AID em MADA e obter as propriedades originais para o qual foi projetado.

4.5 Resultados do ensaio de dureza na parede

De acordo com o especificado na seção 3.2.5, foram coletados 5 valores de dureza dentro de cada seção predeterminada. A Tabela 4.6 mostra os valores medidos nas seções predeterminadas, ao passo que a Tabela 4.7 apresenta média e desvio padrão. Na Figura 4.10 os valores de média e desvio padrão são mostrados por meio de um gráfico de barras.

Tabela 4.6 - Medições de dureza feitas para as três seções predeterminadas.

Seção								
1			5			9		
D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	Dureza (HV)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	Dureza (HV)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	Dureza (HV)
0,6959	0,7037	378,6	0,6978	0,7136	372,3	0,7268	0,6959	368,3
0,6927	0,6958	384,6	0,6951	0,6904	386,3	0,6922	0,6986	383,4
0,7014	0,7042	375,4	0,7065	0,692	379,2	0,6781	0,6709	407,5
0,6959	0,71	375,2	0,6878	0,6942	388,3	0,7159	0,6951	372,7
0,7125	0,7090	367	0,6727	0,6878	400,3	0,6875	0,6764	398,6

Tabela 4.7 - Média e desvio padrão calculados para as seções analisadas.

Seção	Dureza média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	376,16	5,7025
5	385,28	9,3937
9	386,1	14,9526

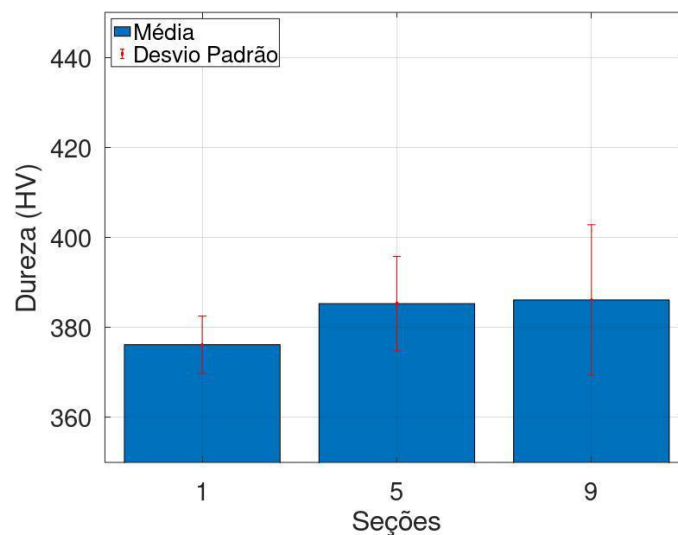


Figura 4.10 - Média e desvio padrão das medições de dureza Vickers.

Os dados obtidos revelam que a dureza da seção 1 é inferior àquela observada nas seções 5 e 9. Entretanto, os valores de desvio padrão da Tabela 4.7 mostram que

existe uma grande dispersão de dados, a qual aumenta na direção das camadas finais.

É interessante notar que as seções 5 e 9 apresentam semelhança no valor médio, o que indica existir um momento a partir do qual a dureza deixa de aumentar, mantendo-se então relativamente estável. Por outro lado, o aumento de dureza entre as seções 1 e 5 indica que durante o processo há ações que prejudicam o material depositado. Segundo Van *et al.* (68), os valores de dureza Vickers para um ensaio com carga de 10 kgf durante 10 s variam entre 240 HV e 320 HV para AIDs usados como metal de solda. A diferença de resultados mostrados na Tabela 4.7 e na Figura 4.10 pode ter relação com a microestrutura formada, levando em consideração possível precipitação de fase, vista na seção 2.3.2, que não pode ser detectada na seção 4.4 usando as técnicas citadas na seção 3.2.4.

4.6 Análise da relação entre os ciclos de temperatura, o teor de austenita e dureza

Após ver os resultados obtidos na coleta de dados dos ciclos de temperatura e da quantificação das fases presentes na microestrutura da parede, foi efetuada a análise da relação existente entre eles, com a finalidade de explicar o motivo da formação daquela microestrutura.

Para relacionar ambos dados, no caso dos ciclos de temperatura, optou-se por fazer uso de um ciclo por seção e compará-lo com uma imagem da microestrutura que está localizada na seção correspondente ao do ciclo térmico. Vale destacar que as imagens de microestrutura não coincidem com uma camada específica, diferente do que acontece com os gráficos de temperatura. A Figura 4.11 mostra a composição de dados referentes às seções 1, 5 e 9 relacionando cada ciclo térmico com a sua respectiva microestrutura. As imagens buscam relacionar os resultados das seções 4.3 e 4.4, mostrando a correlação entre microestrutura e ciclo térmico imposto ao material.

Assim como anteriormente descrito na seção 4.3, a Figura 4.11a revela que as seções e camadas próximas à placa-base permanecem por menor tempo acima da temperatura de transformação para ferrita (linha *solvus*). Os picos de ultrapassagem da temperatura de 1120°C podem ser considerados como uma sucessão de tratamentos térmicos. Segundo Hejripour *et al.* (45), devido à proximidade das

camadas inferiores com o metal de base, a taxa de resfriamento é maior, favorecendo o teor de ferrita na microestrutura, vista na Figura 4.11b.

Na seção correspondente às Fig. 4.11c e 4.11d há uma configuração de microestrutura duplex, mas fora dos padrões do teor de austenita de um AID. Os picos de temperatura na Figura 4.11c começam a diminuir de forma mais lenta, comparados aos da seção da Figura 4.11a, representando uma taxa de resfriamento menor que favorece o aumento no teor de austenita, visto na Figura 4.11d. Esses resultados estão de acordo com os resultados de Hejripour *et al.* (45) e Karunanithi *et al.* (43), que mostram maiores teores de austenita nas regiões centrais de uma parede de AID fabricada via MADA-GMA.

Na Figura 4.11e, as temperaturas ainda se encontram acima de 1120°C [linha *solvus*] até o final do processo que é seguido por uma taxa de resfriamento rápida quando comparada às Figuras 4.11a e 4.11c. O rápido resfriamento favorece a formação de ferrita, vista na Figura 4.11f. Segundo Hejripour *et al.* (45) e Karunanithi *et al.* (43), a alta taxa de resfriamento deve-se a ausência de acúmulo de calor nas últimas camadas, pois o processo se aproxima do fim. Além disso, as temperaturas de vale nessa seção se encontram acima de 1000°C devido à refusão que ocorre no processo MADA-GMA e explica teores de austenita elevados em camadas encontradas na última seção, com exceção da última camada que não sofre refusão (43). Por esse motivo, a última camada tem a possibilidade de apresentar teores de ferrita e austenita características de um AID.

Além dos resultados de quantificação de fases e o comportamento dos ciclos térmicos, os resultados de dureza da Tabela 4.7 e da Figura 4.10 revelaram um comportamento contrário ao esperado, levando em consideração que a maior quantidade de fase presente na peça é de austenita. De acordo com Callister (69) a fase austenita apresenta estrutura cristalina do tipo Cúbica de Face Centrada (CFC), enquanto a ferrita apresenta uma estrutura do tipo Cúbica de Corpo Centrado (CCC) e, devido à presença de mais planos de escorregamento, a estrutura cristalina CFC tende a ser mais fácil de deformar, tendo como consequência uma menor dureza. Entretanto, nos resultados de dureza apresentados, as seções que apresentam teor de austenita perto de 70% mostram durezas superiores àquelas regiões com teor de austenita próximo de 60%. Numa tentativa de explicar o motivo desses resultados, a Figura 4.12 mostra o diagrama TTT aplicável a alguns AIDs.

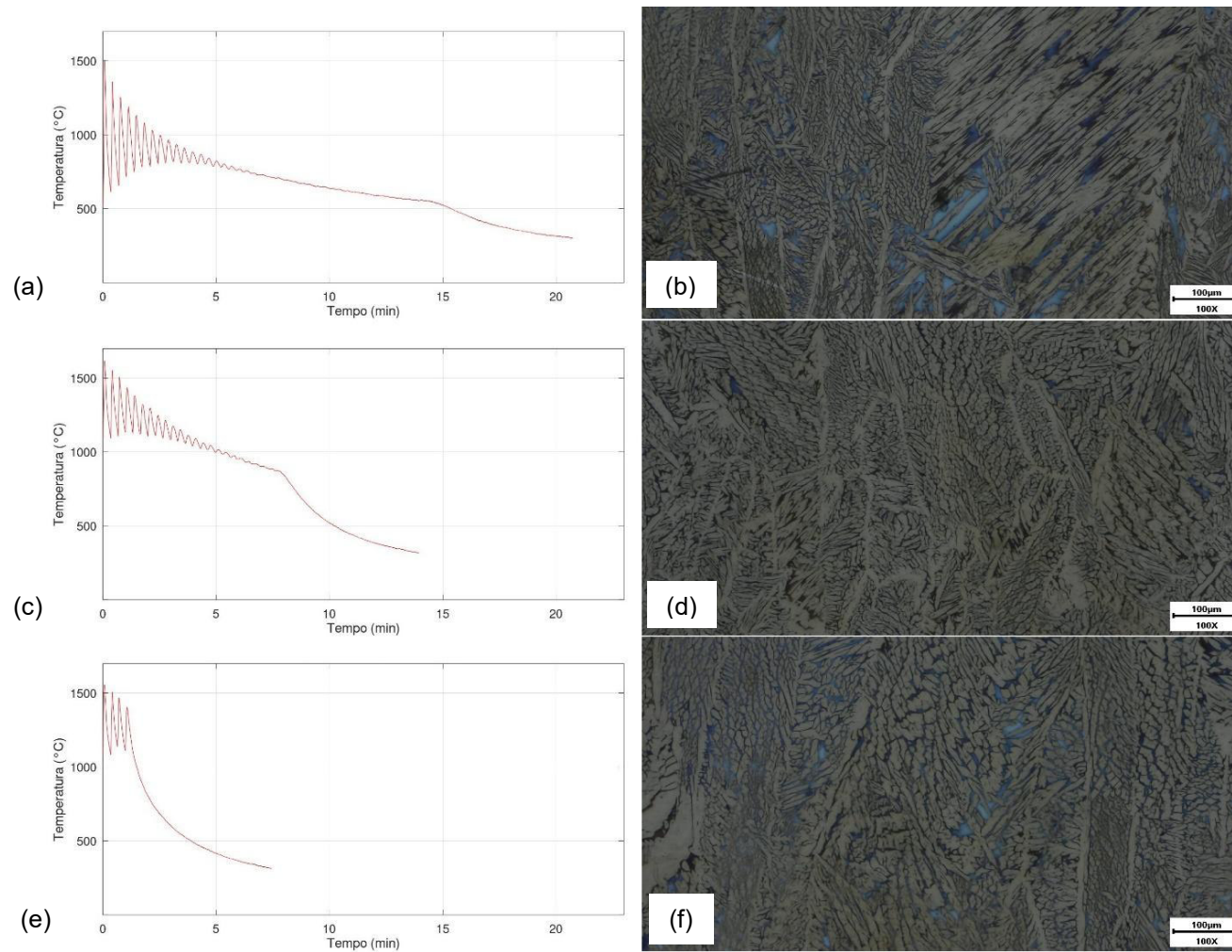


Figura 4.11 - Comparação entre as seções 1, 5 e 9 relacionado os ciclos térmicos (a) 7, (b) 27 e (c) 47 com as microestruturas das seções (d) 1, (e) 5 e (f) 9, respectivamente.

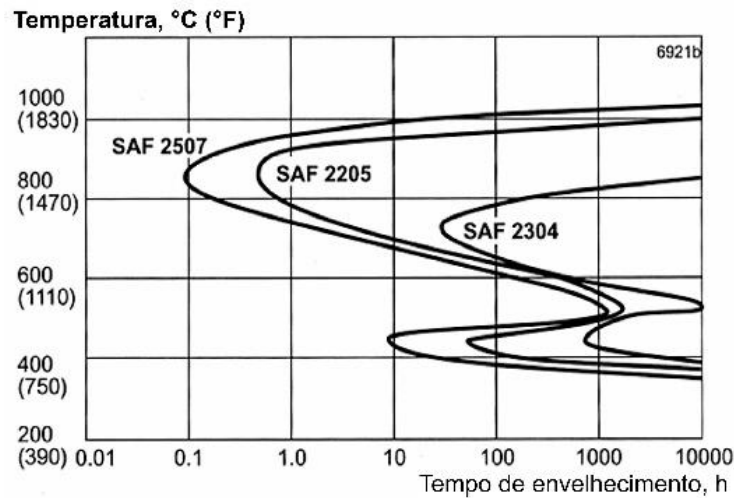


Figura 4.12 - Diagrama Tempo-Temperatura-Transformação para os AIDs tendo como referência os aços 2507, 2205 e 2304 (70).

De acordo com esse diagrama, no caso de um AID comum como o 2205 há certas faixas de temperatura em que pode ocorrer precipitação de algumas fases que prejudicam as propriedades do material. O diagrama TTT apresenta dois cotovelos que mostram a possibilidade de precipitação de fases em duas faixas de temperaturas diferentes, uma entre 500°C e 1000°C e outra entre 400°C e 500°C.

No trabalho de Karunanithi *et al.* (43) e Zhang *et al.* (71), há indícios de que, devido às sucessivas deposições de camadas, o tempo de exposição às temperaturas que favorecem a precipitação de fases deletérias acaba não sendo suficiente para que as mesmas precipitem. Entretanto, de acordo com o Figura 4.11, quanto mais camadas são depositadas, as camadas anteriores começam a resfriar lentamente existindo a possibilidade de atingir uma temperatura com pouca oscilação, dando chance de precipitar diversas fases. Vale destacar que o trabalho de Karunanithi *et al.* (43) faz uso de temperatura interpasse de 150°C, enquanto Zhang *et al.* (71) não definem se seguem o mesmo procedimento deste trabalho com a deposição contínua.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a investigação experimental da possibilidade do uso de uma câmera térmica no monitoramento do processo MADA-GMA na fabricação de uma parede contendo 50 camadas de Aço Inoxidável Duplex (AID) com deposição ininterrupta. Os resultados referentes à quantificação de austenita, análise de ciclos térmicos e ensaios de dureza foram fundamentais para qualificar o uso da câmera como útil ou não para o monitoramento do processo.

A análise visual da peça revelou que, durante o processo de fabricação, a aceleração e desaceleração da tocha ocasionou flutuação nas dimensões finais da peça pois a velocidade de alimentação mantinha-se fixa durante todo o processo.

Quanto aos ciclos térmicos, observou-se que quanto mais camadas são depositadas, o substrato torna-se ineficiente para a retirada de calor tendo como consequência uma menor taxa de resfriamento durante a fabricação.

A quantificação da austenita (59,6%) mostrou que nas primeiras camadas há uma aproximação à microestrutura comum de um AID, mas subindo a parede o teor da austenita aumenta até um ponto que o material não apresenta mais teores próximos da definição de um AID, chegando a valores superiores a 70%.

Relacionando os ciclos térmicos com as microestruturas formadas é possível concluir que o alto teor de austenita nas seções centrais da parede se deve à baixa taxa de resfriamento que influencia diretamente na difusão que colabora com a nucleação e crescimento de grão austenítico. No caso da última seção, mostra-se que o decaimento do teor de austenita pode ter relação com a diminuição dos ciclos térmicos impostos nas últimas camadas, que resulta num resfriamento mais rápido que no centro da parede, facilitando a nucleação e crescimento de grãos ferríticos, pois o tempo de permanência na área de coexistência ferrita-austenita seria bem menor se comparado com o centro da parede.

O alto teor de austenita na microestrutura, superando o limite de 70% para ser considerado um AID, mostra que para usar um AID no processo MADA-GMA é preciso o uso de técnicas que controlem a taxa de resfriamento em cada camada, ou pós-processamentos para equilibrar as fases. Consequentemente, a câmera térmica se mostrou útil para o monitoramento do processo MADA, pois ajudou a entender a formação da microestrutura da peça de forma mais eficiente, relacionando ciclos térmicos com cada seção analisada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados de dureza, quantificação de austenita e ciclos térmicos mostram que existe a possibilidade de precipitação de outras fases, como a sigma e chi, sendo consideradas prejudiciais para os AIDs. Por esse motivo, é fundamental que pesquisas futuras sejam realizadas, tendo como objetivo uma análise mais detalhada da microestrutura formada a distâncias diferentes do substrato, procurando por fases precipitadas que podem surgir durante a fabricação da parede, além de usar técnicas de quantificação de fases com menor incerteza, pois a técnica binária apresentada no trabalho depende diretamente dos limites de tonalidade de escuro e branco definidos no programa *ImageJ*.

Além disso, o gás de proteção usado é o CO₂, que não é recomendado para o uso em AIDs, sendo necessária uma pesquisa direcionada para a fabricação de uma parede com gás de proteção recomendado, fazendo mudanças nos parâmetros usados com a finalidade de relacioná-los com a microestrutura e as propriedades mecânicas da peça.

Alturas maiores que 55 mm foram detectadas no centro parede, que não podem ser explicadas por aceleração e desaceleração da tocha. Um estudo direcionado à investigação mais detalhada dessa característica seria de grande utilidade, além de procurar parâmetros de acabamento superficial da peça. A energia de soldagem imposta no processo seria um parâmetro importante nesse contexto.

7 REFERÊNCIAS

7.1 Referências Nominais

- [1] KHORASANI, M. et al. A review of Industry 4.0 and additive manufacturing synergy. **Rapid Prototyping Journal**, v. 28, n. 8, p. 1462–1475, 2 ago. 2022. Percentil scopus: 87%. DOI: 10.1108/RPJ-08-2021-0194

- [2] LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 1 jan. 2015. Percentil scopus: 65%. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001

- [3] SURESH, A.; UDENDHRAN, R.; YAMINI, G. Internet of things and additive manufacturing: Toward intelligent production systems in industry 4.0. **Internet of Things for Industry 4.0: Design, Challenges and Solutions**, p. 73–89, 2020. Percentil scopus: 37%. DOI: 10.1007/978-3-030-32530-5_5

- [4] WANKHEDE, V. A.; VINODH, S. Application of total interpretive structural modeling for analyzing factors of additive manufacturing and industry 4.0 integration. **Rapid Prototyping Journal**, v. 27, n. 8, p. 1591–1608, 2021. Percentil scopus: 87%. DOI: 10.1108/rpj-02-2021-0028

- [5] ALBERTI, E. A.; DA SILVA, L. J.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity. **Welding International**, v. 30, n. 6, p. 413–422, 2 jun. 2016. Percentil scopus: 70%. DOI: 10.1080/09507116.2015.1096513

- [6] DOS SANTOS, M. R. N. **Caracterização de pré-formas de aços 2,25Cr1Mo fabricadas via manufatura aditiva por deposição a arco com e sem resfriamento ativo por quase-imersão**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 22 fev. 2022.

- [7] DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in materials science**, 2018. Percentil scopus: 99%. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

- [8] CAMACHO, D.; CLAYTON, P.; O'BRIEN, W. Applications of additive manufacturing in the construction industry—a prospective review. **Proceedings of the international symposium on automation and Robotics Construction**, 2017. Percentil scopus: 41%. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0033>

- [9] ZHAI, W. et al. Selective laser melting of dispersed TiC particles strengthened 316L stainless steel. **Composites Part B: Engineering**, 2020. Percentil scopus: 99%. DOI: [10.1016/j.compositesb.2020.108291](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108291)

- [10] ZHAI, W. et al. Hybrid manufacturing of γ -TiAl and Ti-6Al-4V bimetal component with enhanced strength using electron beam melting. **Composites Part B: Engineering**, 2021. Percentil scopus: 99%. DOI: [10.1016/j.compositesb.2020.108587](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108587)

- [11] WENG, F. et al. Excellent combination of strength and ductility of CoCrNi medium entropy alloy fabricated by laser aided additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, 2020. Percentil scopus: 97%. DOI: [10.1016/j.addma.2020.101202](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101202)

- [12] SHEN, C. et al. Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process. **Additive Manufacturing**, 2015. Percentil scopus: 97%. DOI: [10.1016/j.addma.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.001)

- [13] TREUTLER, K.; WESLING, V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): a review. **Applied Sciences**, 2021. Percentil scopus: 79%. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188619>

- [14] GIAROLLO, D.; MAZZAFERRO, C. Efeito do metal de adição na resistência ao desgaste por deslizamento de um aço estrutural soldado por GMAW. **Matéria**, 2019. Percentil scopus: 19%. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0780>

- [15] WU, B. et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of manufacturing**, 2018. Percentil scopus: 91%. DOI: [10.1016/j.jmapro.2018.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001)

- [16] ZHAI, W.; WU, N.; ZHOU, W. Effect of interpass temperature on wire arc additive manufacturing using high-strength metal-cored wire. **Metals**, 2022. Percentil scopus: 76%. DOI: 10.3390/met12020212

- [17] SCOTTI, F. M. et al. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 57, p. 23–35, 2020. Percentil scopus: 89%.DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.007

- [18] LE, V. T. A preliminary study on gas metal arc welding-based additive manufacturing of metal parts. **Science and Technology Development Journal**, v. 23, n. 1, 16 fev. 2020. Percentil scopus: 92%. DOI: 10.32508/stdj.v23i1.1714

- [19] GROOVER, M. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 2010.

- [20] BEAMAN, J. J. et al. Additive Manufacturing Review: Early Past to Current Practice. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 142, n. 11, 1 nov. 2020. Percentil scopus: 82%. DOI: 10.1115/1.4048193

- [21] SHAH, A. et al. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 7, n. 3, 1 jun. 2023. Percentil scopus: 73%. DOI: 10.3390/jmmp7030097

- [22] SINGH, R. K. et al. Assessing the pros and cons of wire-arc additive manufacturing for material production. **Multidisciplinary Reviews**, v. 6, 2023. Percentil scopus: 3%. DOI: 10.31893/multirev.2023ss055

- [23] GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. 2021.

- [24] DEREKAR, K. S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. **Materials Science and Technology (United Kingdom)**, v. 34, n. 8, p. 895–916, 24 maio 2018. Percentil scopus: 49%. DOI: 10.1080/02670836.2018.1455012

- [25] RODRIGUEZ-GONZÁLES, P.; RUIZ-NAVAS, E. M.; GORDO, E. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for Aluminum-Lithium Alloys: A Review. **Materials**, v. 16, n. 4, 1 fev. 2023. Percentil scopus: 73%. DOI: 10.3390/ma16041375

- [26] FILHO, E. B. **Desempenho mecânico de ligas de aço-carbono fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 27 fev. 2024.

- [27] SCOTTI, F. M. **Manufatura Aditiva por Deposição a Arco de Paredes Finais de Aço Inoxidável Super Duplex com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ago. 2021.

- [28] KUMAR, N. et al. Wire Arc Additive Manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing. **Materials Chemistry and Physics**, v. 285, 1 jun. 2022. Percentil scopus: 88%. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126144

- [29] SINGH, S. R.; KHANNA, P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 118–128, 2021. Percentil scopus: 58%. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.030

- [30] DING, D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1–4, p. 465–481, 26 out. 2015. Percentil scopus: 77%. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3

- [31] SINGH, S.; SHARMA, S. K.; RATHOD, D. W. A review on process planning strategies and challenges of WAAM. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 6564–6575, 2021. Percentil scopus: 58%. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.632

- [32] ASTAFUROV, S.; ASTAFUROVA, E. Phase composition of austenitic stainless steels in additive manufacturing: A review. **Metals**, v. 11, n. 7, 1 jul. 2021. Percentil scopus: 76%. DOI: 10.3390/met11071052

- [33] PAN, Z. et al. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. **Transactions on Intelligent Welding Manufacturing**, p. 3–24, 2018. Percentil scopus: 28%. DOI: 10.1007/978-981-10-5355-9_1

- [34] 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, 1 set. 2017. Percentil scopus: 74%. DOI: 10.1007/s40194-017-0474-5

- [35] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo, SP - Brasil: Edgard Blucher Ltda, 2008.

- [36] ZHANG, D. et al. Additive manufacturing of duplex stainless steels - A critical review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 73, p. 496–517, 1 jan. 2022. Percentil scopus: 89%. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.11.036

- [37] LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. 2005.

- [38] KAHAR, DR. S. D. Duplex Stainless Steels-An overview. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 07, n. 04, p. 27–36, abr. 2017. Percentil scopus: N/A%. DOI: 10.9790/9622-0704042736

- [39] KOTECKI, D. J.; SIEWERT, T. A. WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram. **AWS Annual Meeting**, p. 171–178, 1992. Percentil scopus: 70%. DOI: 102335459

- [40] GUNN, R. **Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications**. Elsevier, 1997.
- [41] MATIAS, J. V. S. et al. Embrittlement and corrosion decay of a cast duplex stainless steel. **Materials Research**, v. 20, p. 279–283, 2017. Percentil scopus: 49%. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0138
- [42] NILSSON, J.-O. Super duplex stainless steels. **Materials science and technology**, v. 8, n. 8, p. 685–700, 1992. Percentil scopus: 55%. DOI: 10.1179/mst.1992.8.8.685
- [43] KARUNANITHI, S. P.; ARASAPPAN, R. K.; NALLATHAMBI, S. S. Microstructural Evolution, Mechanical and Electrochemical Performance of Duplex Stainless Steel Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing with ER2209 Filler Wire. **Steel Research International**, 2024. Percentil scopus: 64%. DOI: 10.1002/srin.202400425
- [44] STANDARD, N. Welding and inspection of piping. **Standards Norway, Lysaker**, v. 2, 2004.
- [45] HEJRIPOUR, F. et al. Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 272, p. 58–71, 1 out. 2019. Percentil scopus: 94%. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.05.003
- [46] WITTIG, B.; ZINKE, M.; JÜTTNER, S. Influence of arc energy and filler metal composition on the microstructure in wire arc additive manufacturing of duplex stainless steels. **Welding in the World**, p. 47–56, 28 set. 2020. Percentil scopus: 74%. DOI: 10.1007/s40194-020-00995-z/Published
- [47] JIN, W. et al. Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 5, 1 mar. 2020. Percentil scopus: 79%. DOI: 10.3390/app10051563

- [48] ARAVIND, A.; JEROME, S. Evaluation on Mechanical and Metallurgical Properties of Wire Arc Additive Manufactured ER 2209 Duplex Stainless Steel for Automotive and Marine Applications. **SAE Technical Papers**, 2025. Percentil scopus: 30%. DOI: 10.4271/2025-28-0108

- [49] YANG, D.; WANG, G.; ZHANG, G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 244, p. 215–224, 2017. Percentil scopus: 94%. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024

- [50] LI, F. et al. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 2, 30 jan. 2018. Percentil scopus: 79%. DOI: 10.3390/app8020207

- [51] WU, B. et al. 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. Percentil scopus: 94%. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024

- [52] DA SILVA, L. J. et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2513–2523, 1 mar. 2020. Percentil scopus: 77%. DOI: 10.1007/s00170-020-05201-4

- [53] JORGE, V. L. et al. Application of near-immersion active cooling for thermal management in arc additive manufacturing of thin super duplex stainless steel walls. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 137, n. 5, p. 3025–3048, 2025. Percentil scopus: 77%. DOI: 10.1007/s00170-025-15355-8

- [54] ZHANG, Y. et al. Research and development of welding methods and welding mechanism of high-entropy alloys: A review. **Materials Today Communications**, v. 28, 1 set. 2021. Percentil scopus: 69%. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102503

- [55] GÜRAL, A.; BOSTAN, B.; ÖZDEMİR, A. Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel. **Materials & design**, 2007. Percentil scopus: 96%. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.10.005

- [56] DIN EN 10002-1. **Metallic Materials - Tensile Testing**, 2016.

- [57] XUE, C. et al. Improving mechanical properties of wire arc additively manufactured AA2196 Al–Li alloy by controlling solidification defects. **Additive Manufacturing**, v. 43, 1 jul. 2021. Percentil scopus: 97%. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102019

- [58] QI, M. et al. Columnar to equiaxed transition during β heat treatment in a near β alloy by laser additive manufacture. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 1159–1168, 1 jul. 2021. Percentil scopus: 89%. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.057

- [59] LIU, Y. et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum 5083 weldments by gas tungsten arc and gas metal arc welding. **Materials Science and Engineering: A**, v. 549, p. 7–13, 15 jul. 2012. Percentil scopus: 95%. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.108

- [60] PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 5, p. 583–585, set. 2006. Percentil scopus: 76%. DOI: 10.1179/174329306x120886

- [61] MATHERS, G. **The welding of aluminium and its alloys**. 2002.

- [62] WANG, F. et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 44, n. 2, p. 968–977, fev. 2013. Percentil scopus: 78%. DOI: 10.1007/S11661-012-1444-6

- [63] CHOI, H. et al. Wire arc additive manufactured A36 steel performance for marine renewable energy systems. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 132, n. 9–10, p. 4677–4688, 1 jun. 2024. Percentil scopus: 77%. DOI: 10.1007/s00170-024-13585-w

- [64] ZHANG, X.-Y. et al. Influence of shielding gas on microstructure and properties of GMAW DSS2205 welded joints. **Materials**, v. 14, n. 10, p. 2671, 2021. Percentil scopus: 79%. DOI: 10.3390/ma14102671

- [65] HE, Y. et al. Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of ER2209 Duplex Stainless Steel Manufactured by Plasma Arc Welding. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 77, n. 9, p. 2879–2886, 1 set. 2024. Percentil scopus: 59%. DOI: 10.1007/s12666-024-03382-0

- [66] ASTM INTERNATIONAL, W. C. PA. **Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials**, 2023

- [67] DOS SANTOS, E. B. F. et al. On the visualization of gas metal arc welding plasma and the relationship between arc length and voltage. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 7, n. 5, 15 maio 2017. Percentil scopus: 79%. DOI: 10.3390/app7050503

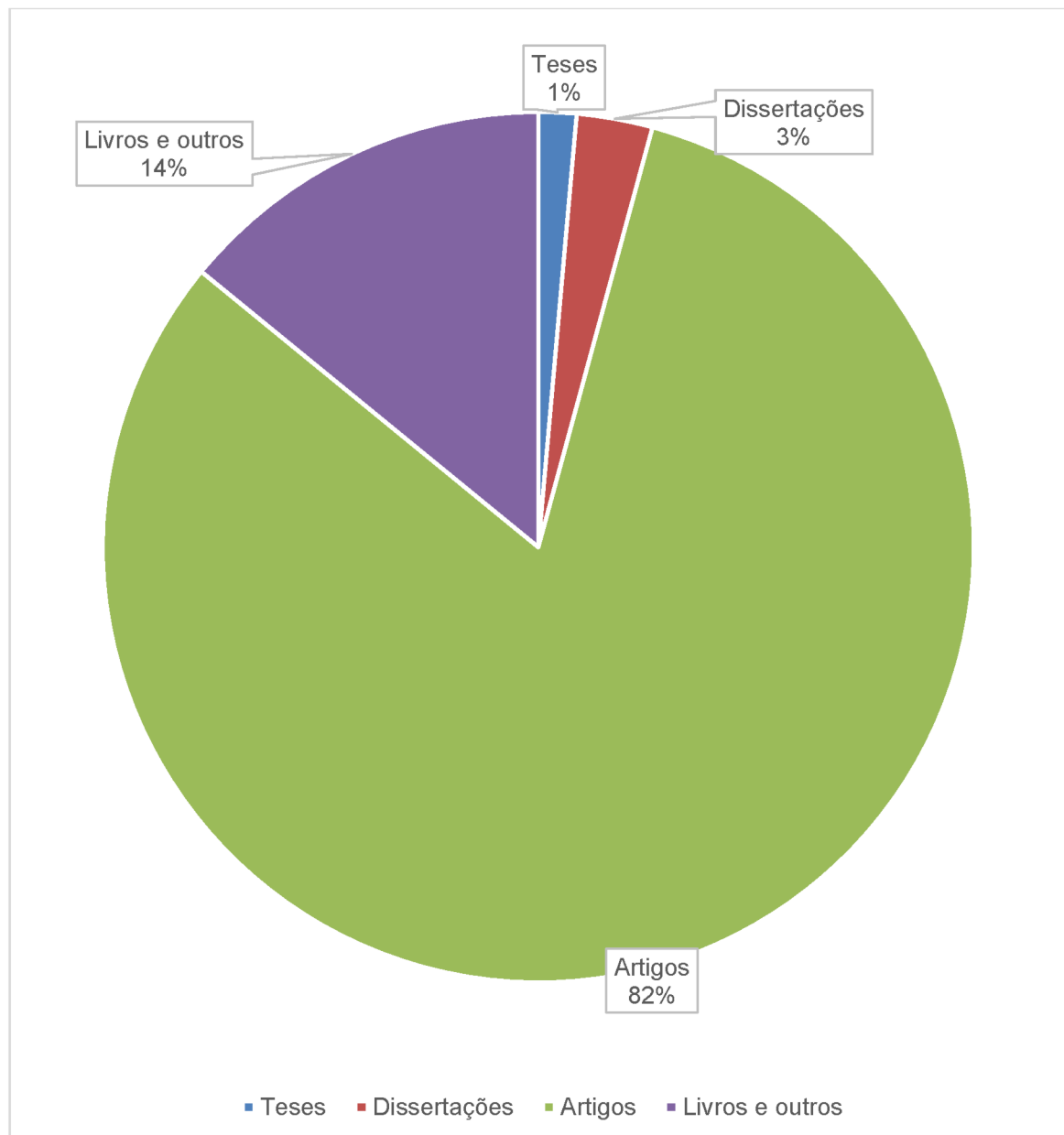
- [68] VAN, N. L.; MEELKER H.; HILKES J. Welding duplex and super-duplex stainless steels. **Welding in the World**, 1993. Percentil scopus: 74%. DOI: N/A

- [69] CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2012.

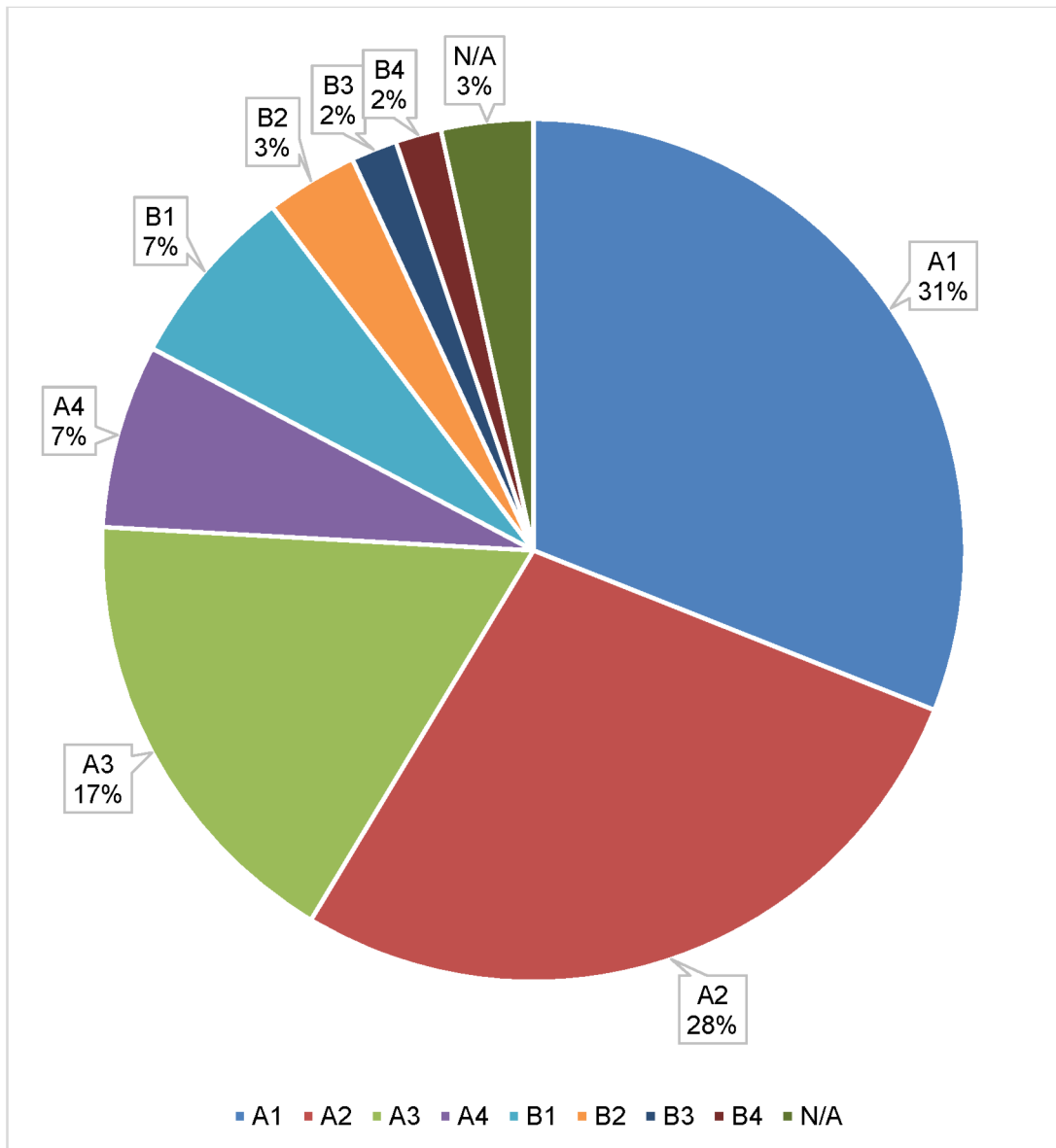
- [70] VICENTE, A. A. et al. The use of duplex stainless steel filler metals to avoid hot cracking in GTAW welding of austenitic stainless steel AISI 316L. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 7, n. 6, p. 345–355, 2020. Percentil scopus: N/A. DOI: 10.22161/ijaers.76.43

- [71] ZHANG, Y.; CHENG, F.; WU, S. The microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel components fabricated via flux-cored wire arc-additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 69, p. 204–214, 1 set. 2021. Percentil scopus: 89%. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.045

7.2 Referências por Estrato



7.3 Referências por Qualis



7.4 Referências por Data dos Artigos

