



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

---



KAROLINE DA SILVA FRAGOZES

**Estudo da influência da espessura do substrato na dureza de  
peças fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a  
Arco (MADA)**

Manaus

2023

KAROLINE DA SILVA FRAGOZES

**Estudo da influência da espessura do substrato na dureza de  
peças fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a  
Arco (MADA)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Tecnologia da  
Universidade Federal do Amazonas como parte dos  
requisitos necessários para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves

Manaus

2023

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

F811e Fragozes, Karoline da Silva  
Estudo da influência da espessura do substrato na dureza de peças fabricadas por manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) / Karoline da Silva Fragozes . 2023  
55 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Antonio do Nascimento Silva Alves  
TCC de Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Manufatura Aditiva. 2. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. 3. Mada. 4. Soldagem por deposição a arco. I. Alves, Antonio do Nascimento Silva. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

KAROLINE DA SILVA FRAGOZES

**Estudo da influência da espessura do substrato na dureza de peças fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 20/04/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antonio Alves  
Orientador (DEMEC/UFAM)

---

Prof. Dr. Marcionilo Neri  
Membro (DEMEC/UFAM)

---

Prof. Dr. Jaime Casanova  
Membro (DEMA/UFAM)

## **AGRADECIMENTOS**

A meus pais que nunca mediram esforços para proporcionar o melhor que puderam durante toda minha jornada até aqui, em especial a minha mãe por todo o tempo de vida dedicado à minha formação como ser humano com o cuidado de formar uma pessoa de caráter para agregar valor à sociedade.

A meus irmãos Karolaine e Eduardo pelo suporte que me deram nos árduos últimos meses que antecederam o término desta graduação, e não mediram esforços para me ver bem.

Aos meus amigos de formação que encontrei no início da graduação: Johnatha Costa e Paulo Leal, pela parceria que firmamos aos longos dos anos, suportando uns aos outros para conseguirmos ir de período em período em meio a tantas dificuldades. Meus sinceros votos de agradecimento pela eternidade, sempre os levarei comigo no meu coração.

Ao técnico Saymon por ter dado todo o suporte possível para a realização das atividades que foram executadas no laboratório de soldagem, pela parceria e paciência nas diversas tardes, por semanas a fio tentando definir os parâmetros que foram utilizados na parte prática deste trabalho.

Ao laboratório de físico-química do curso de materiais e ao professor Dr. Jaime Casanova pela acolhida para execução de parte importante do trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Antonio, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos comigo; pela paciência em orientar e acolher os erros de uma principiante na área, sempre usando sua experiência para apontar um caminho quando o planejado não saía como havíamos almejado. Foi uma honra poder dividir esse tempo com o senhor.

Ao departamento do curso de engenharia mecânica pelo apoio em diversos momentos do curso; aos professores que contribuíram ativamente na formação da profissional que me tornei e ainda sigo em processo constante de evolução, sempre levando em mente os conhecimentos adquiridos em sala de aula e também fora dela.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Amazonas, por possibilitar a realização deste curso.

## RESUMO

FRAGOZES, Karoline. **Estudo da influência da espessura do substrato na dureza de peças fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). 2023. 55f.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

A Manufatura Aditiva está entre as tecnologias contempladas pela Indústria 4.0 e se apresenta como uma tendência na área de fabricação de peças mecânicas. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) utiliza o arco elétrico como fonte de calor o que lhe atribui uma boa taxa de deposição na fabricação de peças em especial de aços ao carbono. Essa taxa de deposição confere à peça fabricada um acúmulo de calor que impacta diretamente nas taxas de resfriamento e conseqüentemente nas propriedades mecânicas das peças fabricadas. Um dos fatores importantes nas taxas de resfriamento é a espessura do substrato, que é a base onde a peça é construída. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da espessura do substrato sobre a dureza em peças produzidas por MADA. Para isso, foram utilizadas três chapas de aço ASTM A36 com espessuras de 3,0 mm, 6,35 mm e 12,5 mm utilizando o processo GMAW.

Foram observadas a interação de temperatura, substrato / peça variando a espessura do substrato: A temperatura de pico reduziu à medida que a espessura do substrato aumentou, e para um mesmo substrato os valores de temperatura de pico foram diminuindo conforme as deposições de camada foram sendo incrementadas. A taxa de resfriamento seguiu o mesmo comportamento, conferindo maiores valores de dureza para o substrato de 12,5 mm de espessura, logo nas primeiras camadas, em função das altas taxas de resfriamento atribuído a sua característica de chapa grossa. Como resultado sobre o aspecto de dureza foram obtidos valores de dureza Vickers (HV) ao longo da seção transversal da peça fabricada, onde percebeu-se que a dureza aumentou em função do aumento da espessura de substrato. Os valores de dureza foram 155,15 HV para o substrato de 3,0 mm, 185,10 HV para o substrato de 6,3 mm e 187,31 HV para o substrato de 12,5 mm de espessura.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva, Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, MADA; Soldagem por deposição a arco.

## ABSTRACT

Fragozes, Karoline. **Study of the influence of substrate thickness on the hardness in parts manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). 2023. 55f.** Undergraduate thesis (Mechanical Engineering) - Federal University of Amazonas, Manaus, 2023.

Additive Manufacturing is among the technologies contemplated by Industry 4.0 and presents itself as a trend in the area of mechanical parts manufacturing. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) uses the electric arc as a heat source, which gives it a good deposition rate in the manufacture of parts, especially carbon steel. This deposition rate gives the manufactured part an accumulation of heat that directly impacts the cooling rates and consequently the mechanical properties of the manufactured parts. One of the important factors in cooling rates is the thickness of the substrate, which is the base on which the part is built. The objective of this work is to evaluate the influence of substrate thickness on hardness in parts produced by WAAM. For this, three ASTM A36 steel plates with thicknesses of 3.0 mm, 6.35 mm and 12.5 mm were used using the GMAW process.

The interaction of temperature, substrate / piece was observed, varying the substrate thickness: The peak temperature reduced as the substrate thickness increased, and for the same substrate the peak temperature values decreased as the layer depositions were being performed. incremented. The cooling rate followed the same behavior, giving higher hardness values for the 12.5 mm thick substrate, right in the first layers, due to the high cooling rates attributed to its thick plate characteristic. As a result of the hardness aspect, Vickers hardness (HV) values were obtained along the cross section of the manufactured part, where it was noticed that the hardness increased due to the increase in substrate thickness. The hardness values were 155.15 HV for the 3.0 mm substrate, 185.10 HV for the 6.3 mm substrate and 187.31 HV for the 12.5 mm thick substrate.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM, Arc Welding.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento do número de publicações de trabalhos acadêmicos .....	14
Figura 2: Diagrama do sistema para soldagem MIG/MAG .....	17
Figura 3: Visualização da diferença de altura total após sucessivas deposições de material em uma mesma direção. ....	25
Figura 4: Proposta de deposição de material, intercalando o sentido de deposição. Onde I: Início e F: Fim. ....	25
Figura 5: Dimensões dos substratos ASTM A36 .....	26
Figura 6: (a) Processo de remoção de camada com esmerilhadeira; (b) Centro da chapa delimitado. ....	27
Figura 7: Equipamento de soldagem .....	27
Figura 8: (a) Teste de deposição com múltiplas camadas; (b) Testes de deposição em camadas-única; (c) Visualização de projeção na parte inferior da chapa. ....	28
Figura 9: CNC GL-3020 .....	29
Figura 10: Background do software Mach 3. ....	29
Figura 11: (a) Sistema de aquisição de dados SAP; (b) Software SAPTiV4.35s V4Ti na leitura de dados. ....	30
Figura 12: (a) representação de deposição com termopares; (b) Visualização dos termopares em vista lateral da chapa. ....	31
Figura 13: (a) Delimitação do centro da chapa; (b) Centro delimitado; (c) Pontas de termopar a serem soldados; (d) Modelo união de pontas adotado; (e) Processo de solda dos terminais dos termopares à chapa; (f) Termopares soldados, prontos para conexão no equipamento SAP. ....	32
Figura 14: (a) Terminais para sensor de temperatura no equipamento SAP; (b) Termopares soldados à chapa ligados nos terminais de comunicação; (c) visualização de termopares na face de deposição; (d) Obtenção de dados para obtenção póstuma dos ciclos térmicos. ....	32
Figura 15: (a) Produto final de deposições, chapa 3 mm; (b) Produto final de deposições, chapa 6,3 mm; (c) Produto final de deposições, chapa 12,5 mm; (d) Medição da altura final das camadas de deposição. ....	33
Figura 16: (a) Pirômetro infravermelho Minimpa MT-350; (b) Controle de temperatura na superfície de deposição. ....	33
Figura 17: (a) 1ª etapa de corte; (b) 2ª etapa de corte: Corte da secção de análise; (c) e (d) Vistas das peças em corte; (e), (f) e (g) Medida da largura das deposições. ....	34
Figura 18: (a) e (b) Corte final para delimitar secção de análise; (c) Amostras obtidas de cada chapa. ....	35
Figura 19: (a) Grânulos de baquelite; (b) Prensa de embutimento. ....	35
Figura 20: (a) Amostra pós corte no serra-fita; (b) e (c) Amostras pós processos de lixamento. ....	36
Figura 21: Representação de malha diretamente na amostra. ....	37
Figura 22: (a) Microdurômetro Vickers; (b) Ilustração do sentido das marcações no microdurômetro; (c) Visualização de uma das endentações realizada com ponteira do microdurômetro. ....	38
Figura 23: Variação dos valores de potência instantânea média sem a contribuição dos desvios padrão .....	39
Figura 24: variabilidade dos valores de potência. ....	40
Figura 25: análise de variância com teste de Tukey com 95% de confiança .....	41
Figura 26: Ciclos térmicos para as três espessuras. ....	43
Figura 27: Gráficos das temperaturas de pico (a) Face de deposição; (b) Parte inferior da chapa. ....	45



## LISTA DE FIGURAS

Figura 28: Gráficos das taxas de resfriamento .....	46
Figura 29: Mapas de microdureza para as três espessuras de chapa. ....	47
Figura 30: Média dos valores de microdureza por espessura de substrato.....	48
Figura 31: (a) Malha para medidas de microdureza; Média com desvio padrão de microdureza de cada camada, por substrato. ....	48
Figura 32: Curvas dos valores de microdureza para as três espessuras de chapa. ....	49
Figura 33: Imagem de macrografia indicando camadas .....	50

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas abordagens típicas de gerenciamento térmico para MADA relatadas na literatura recente e seus destaques observados. ....	22
Tabela 2: Composição química em % do substrato ASTM A36.....	26
Tabela 3: Composição química em % do arame ASME SFA - 5.18 ERS70S-6.....	26
Tabela 4: Parâmetros para processo de deposição de camadas .....	28
Tabela 5: Potência Instantânea Média e Energia de Deposição com seus respectivos desvios padrão. ....	39
Tabela 6: Diferença média de PIM para cada espessura de substrato .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA *Analysis of Variance* / Análise de Variância

ASME *American Society Mechanical Engineers*

ASTM *American Society for Testing and Materials*

BTF *Buy-to-fly*

CNC *Computer Numerical Control*

DBCP Distância Bico de Contato à Peça

DED *Direct Energy Deposition*

ESAB *Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget*

GMAW *Gas Metal Arc Welding*

GTAW *Gas Tungsten Arc Welding*

HV *Hardness Vickers*

MA Manufatura Aditiva

MADA Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

MAG *Metal Active Gas*

MIG *Metal Inert Gas*

PTA *Plasma Transferred Arc*

PIM Potência Instantânea Média

SAP *System Applications and Product*

TIG *Tungsten Inert Gas*

TR Taxa de Resfriamento

# LISTA DE SÍMBOLOS

$E_d$	Energia de Deposição
$T_p$	Temperatura de Pico
V	Volts
A	Ampère
$U_i$	Tensão do arco em cada deposição
$I_i$	Valores de corrente elétrica em cada deposição
n	Número de pontos aferidos
v	Velocidade de Deposição
$v_A$	Velocidade de alimentação
Ar	Argônio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Cr	Cromo
Mo	Molibdênio
Nb	Nióbio
N	Nitrogênio
Sn	Estanho
B	Boro
Ca	Cálcio
V	Vanádio
°C	Graus Celisus
mm/min	Milímetro por minuto
mm/s	Milímetro por segundo
m/min	Metro por minuto
L/min	Litro por minuto

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Organização do trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1	Soldagem .....	17
2.2	Soldagem MIG / MAG.....	17
2.3	Manufatura Aditiva (MA) / Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) .....	18
2.4	Particularidades do processo de MADA .....	19
2.4.1	Influência da Energia de Deposição em Processos MADA .....	19
2.4.2	Transferência de calor na MADA.....	20
2.4.3	Gerenciamento térmico entre camadas.....	21
2.4.4	Regime Transiente e Quase estacionário.....	23
2.4.5	Influência do substrato em MADA.....	24
2.4.6	Estratégia de deposição de camadas .....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1	Materiais .....	26
3.2	Métodos .....	27
3.2.1	Procedimento de MADA.....	27
3.2.2	Preparação de material para ensaio de microdureza .....	34
3.2.3	Macrografia .....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>55</b>

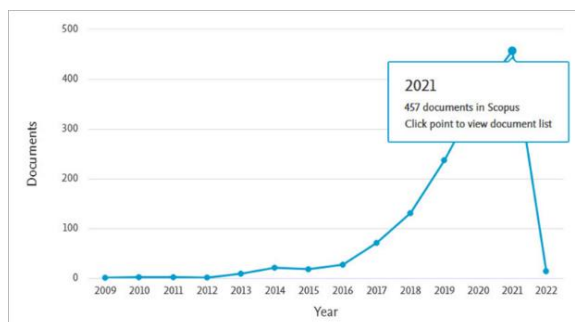
# 1 INTRODUÇÃO

Como consequência dos conceitos trazidos pelo movimento da Indústria 4.0, entre eles a busca por alternativas de fabricação que possibilitem quantitativos cada vez mais altos de produção associado ao baixo desperdício de material ou, ainda, atender manufaturas únicas e de alta precisão, com a possibilidade de reduzir etapas nos projetos de manufatura, surge a Manufatura Aditiva (MA) como proposta de tecnologia que atenda a esses requisitos.

A manufatura aditiva vai na contramão da manufatura subtrativa, esta, por sua vez, baseando-se nos processos que usam o princípio de remoção de material, representado pelo processo de usinagem, onde o material é extraído através de perfuração, corte, mandrilamento ou retificação. A fabricação por manufatura subtrativa vem sendo aperfeiçoada por décadas conferindo-lhe, assim, uma aplicação mais ampla do que a manufatura aditiva. Apesar desta última ser mais recente, já se encontra aplicada com sucesso em áreas como engenharia aeroespacial, automotiva e biomédica.

Iniciada na década de 80 por Charles W. Hull com o processo de estereolitografia, técnica utilizada posteriormente na implementação da primeira impressora 3D (ALCADE, 2018), a manufatura aditiva, por sua vez, engloba os processos de adição de material utilizando o princípio de impressão 3D: consistindo em um processo de união de material para obtenção de objetos a partir de um modelo tridimensional, normalmente camada por camada, ao contrário de processos com metodologia subtrativa (ASTM INTERNATIONAL, 2013). A Manufatura Aditiva (MA) vem apresentando crescimento da atenção da classe acadêmica, como pode ser visto na Figura 1, ao que diz respeito a estudos na área quanto às formas de desenvolver este tipo de manufatura, torná-la robusta e de relevante competitividade em relação as demais já empregadas em larga escala.

Figura 1: Crescimento do número de publicações de trabalhos acadêmicos



Fonte 1: Base Scopus. (disponível em: <https://www.scopus.com>)

Dentro da indústria metalomecânica temos a possibilidade de empregar a Manufatura Aditiva (MA), utilizando-se do princípio de impressão 3D, com adição de material camada sobre camada, por meio do processo de soldagem com uso de Deposição de Energia Direcionada (*Direct Energy Deposition* - DED), denominando-se tal como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA).

Em trabalhos recentes relacionados ao tópico, como ao proposto por Xufei, Lu, M. Chiumenti *et al.* 2021, que traz a abordagem de um projeto de substrato para minimizar tensões residuais em processos de manufatura aditiva pelo método de Deposição de Energia Direcionada (DED) observou-se a necessidade de avaliar o comportamento dos fenômenos que ocorrem durante e após a conclusão de peças fabricadas por MADA, no que confere ao comportamento e integridade das propriedades mecânicas, em especial às tensões residuais resultantes desse processo de fabricação, em função da espessura, ao longo do corpo formado via deposição de material por camadas, e como o conjunto formado interage com sua base (chamado, aqui, de substrato).

Nesse contexto, o presente trabalho visa estudar a influência da espessura do substrato sobre a dureza em peças produzidas por meio do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, analisando o comportamento do substrato à variação de temperatura no decorrer do processo, que, por sua vez, tem contribuição direta na definição do parâmetro, aqui, em estudo: os valores de dureza resultantes do processo para cada estrutura fabricada nas diferentes espessuras de chapa aqui propostas.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo geral**

Estudar a influência da espessura do substrato sobre a dureza em peças produzidas por MADA.

### **Objetivos específicos**

- Medir valores de dureza das peças fabricadas;
- Determinar as taxas de resfriamento das peças fabricadas;
- Avaliar a espessura do substrato sobre o regime transiente e quase estacionário.

## 1.2 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em cinco seções. Na primeira, encontra-se a Introdução, na qual são elencadas questões que direcionam este trabalho, de forma que as seções seguintes estão subdivididas como segue abaixo:

- 2 Referencial Teórico: São reunidas as principais referências que embasaram a construção deste trabalho, começando pelas informações relacionadas à sistemática de Manufatura Aditiva, desenvolvendo o tópico em específico sobre Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) trazendo suas vantagens e desvantagens na esfera de fabricação, seguida de uma visão geral do processo de soldagem e sua utilização dentro da manufatura aditiva com apresentação das ferramentas/tecnologias atuais que tornam possível a aplicação do processo de soldagem à Manufatura Aditiva (MA) e, por fim, a descrição do fenômeno de interação de transferência de calor entre as camadas depositadas, gerenciamento térmico e como a distribuição de calor influencia na estrutura final da peça em estudo.
- 3 Metodologia: São descritos os métodos aplicados, as ferramentas utilizadas, os equipamentos empregados, o material de análise manufaturado em laboratório de soldagem (peças finais manufaturadas em cada chapa), obtenção dos dados e breve avaliação dos resultados;
- 4 Resultados e Discussões: São apresentados os principais resultados obtidos através da metodologia empregada, já com o devido refinamento e interpretações desses resultados com base nos referenciais utilizados;
- 5 Conclusão: Apresenta as conclusões obtidas a partir da revisão da literatura, acerca da sistemática empregada neste trabalho, e dos resultados obtidos das análises baseadas nos resultados e de acordo com as discussões realizadas.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

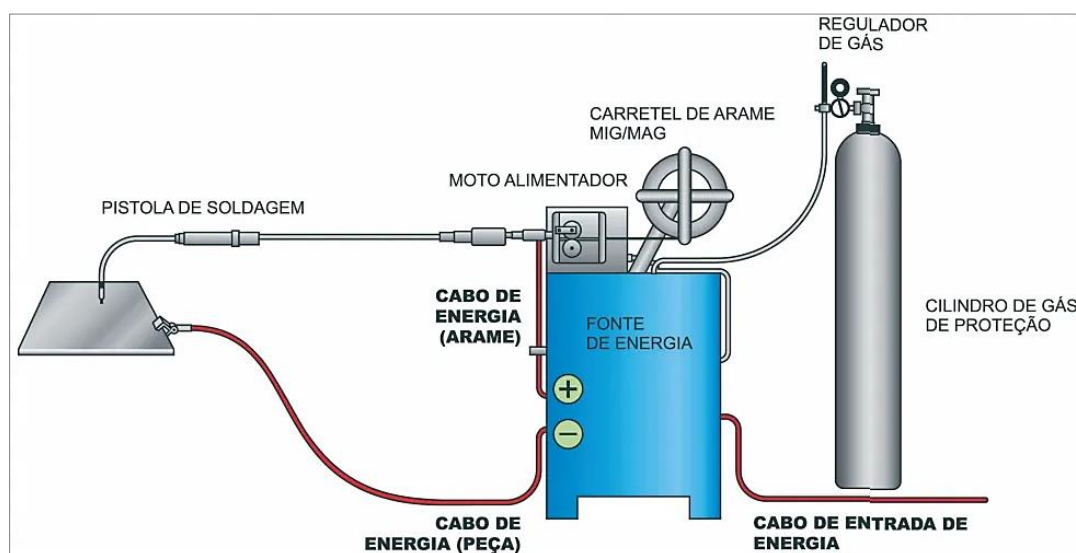
### 2.1 Soldagem

“Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo.” (Wainer et al., 1992, p.1).

### 2.2 Soldagem MIG / MAG

Em GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) há dois tipos de soldagem principais: soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*). Em ambas, um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível (metal de adição) sendo este fundido continuamente enquanto é alimentado à poça de fusão. Durante o processo, um fluxo de gás inerte ou ativo protege a poça de fusão (ESAB, 2005). Uma característica importante desse método é que ele pode ser automático, através do uso de robôs, ou semiautomático, através de um alimentador de metal de adição motorizado, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Diagrama do sistema para soldagem MIG/MAG



Fonte: RLM Máquinas. (disponível em: <https://www.rmlmaquinas.com.br/>)

A soldagem MIG utiliza argônio como gás inativo e é mais utilizada para soldagem de alumínio, aço inoxidável e cobre. A soldagem MAG utiliza-se da mistura de CO<sub>2</sub> e Argônio para soldagem de aço carbono e suas ligas. O processo de soldagem por MIG/MAG funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame localizado no polo positivo,

configuração conhecida como polaridade reversa (ESAB, 2005).

Para soldagem MIG/MAG é extremamente necessária a seleção e ajustes corretos dos parâmetros de soldagem devido ao seu maior número de variáveis e sua forte correlação com o resultado final do processo (MODENESI, 2015). A seleção incorreta dos parâmetros resulta em soldas fora dos padrões desejados que podem ser atribuídos a problemas metalúrgicos e/ou operacionais, como, por exemplo, instabilidade do arco, transferência de metal inadequada, porosidade, respingos, falta de fusão ou de penetração.

### **2.3 Manufatura Aditiva (MA) / Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**

Manufatura aditiva (MA) é o processo de união de materiais para produzir objetos a partir de um modelo 3D, geralmente camada a camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas (ISO/ASTM 52900, 2015).

A MA permite a fabricação de peças com geometrias que seriam impossíveis ou inviáveis pelos processos tradicionais de fabricação, como usinagem e fundição. Essa abordagem possibilita novas metodologias de projeto, que se traduz em maior sustentabilidade, como considerado por (Kellens, 2017).

Entre os processos de MA mais utilizados atualmente, devido à sua alta taxa de deposição, e possibilidade de criar geometrias complexas com precisão e facilidade (Gierth *et al.*, 2020), temos a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), do inglês “*Wire + Arc Additive Manufacturing*” (WAAM). Esse processo realiza a deposição de camadas dos componentes utilizando o arco elétrico como fonte de calor (HACKENHAAR, 2020).

Além da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, existem diferentes tecnologias empregadas na Manufatura Aditiva, segundo (GIBSON *et al.*, 2010), das quais pode-se citar:

- Fotopolimerização, que usa um polímero fotocurável como matéria-prima realizando a cura do material através do laser.
- Fusão de pó pré-depositados, onde um feixe eletrônico funde seletivamente regiões de um leito com pó pré-depositado, cujos materiais utilizados são polímeros, cerâmicas e metais.
- *Cladding* 3D, através de Laser e PTA, onde o material de adição é injetado diretamente no feixe/poça.
- Arco elétrico, onde a fonte de energia é um arco elétrico que funde o material de adição. Nesse processo, podem ser utilizados PTA, plasma arame, TIG, MIG/MAG.

Em MADA, o material de adição é fundido a partir de um laser, feixe de elétrons ou arco voltaico. A soldagem por arco elétrico pode utilizar dois principais processos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Tungest Arc Welding* (GTAW). GMAW, ou Soldagem a Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa, tem grande aplicação e importância na Manufatura Aditiva devido à sua alta eficiência de deposição, baixo custo, operação autônoma e boas propriedades mecânicas no produto final (HU *et al.*, 2017).

Segundo F. MARTINA; SW. WILLIAMS, 2015, as vantagens específicas da classe de MADA em MA são, entre outras: redução do desperdício de material, alta taxa de deposição, custo de fabricação muito menor do que os processos à base de pó, potencialmente sem limitação no tamanho da peça.

Para calcular o aproveitamento de material em MADA, uma das estratégias usadas é a razão *Buy-to-fly* (BTF), aplicada à indústria aeronáutica, que é definida como a razão entre o volume ou massa da peça inicial de trabalho pelo volume ou massa da peça acabada (MARTINA, 2015). Ou seja, a razão BTF depende do quão próximo o formato da peça depositada é do formato da peça acabada, após usinagem. Portanto, mais material será aproveitado, compondo a peça final, quanto mais próximo de 1 for a razão BTF (SILVA, 2020).

Comparações entre MA e as formas subtrativas de manufatura, como usinagem, são constantemente realizadas. Para se ter uma ideia do quanto MADA leva vantagem nesse quesito: estudos com a relação BTF, por exemplo, mostram valores de MADA variando de 1.5 a 3, enquanto para usinagem esses valores variam entre 6 e 50 (MARTINA, 2015), ou seja, um alto volume de material não agregado à peça final, desperdiçado no pós tratamento ou acabamento.

## **2.4 Particularidades do processo de MADA**

### **2.4.1 Influência da Energia de Deposição em Processos MADA**

Sabe-se que na soldagem convencional, a seleção de parâmetros de tensão, corrente, distância bico contato peça, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem influenciam diretamente no processo de soldagem (MODENESI E MARQUES, 2015).

Em MADA não é diferente, porém há um fator agravante para Manufatura Aditiva: ainda não se tem bem definido qual modo de transferência metálica é o mais adequado para a aplicação. Então, pontos chaves como definir bem as variáveis do processo e garantir o aporte térmico adequado, intitulado aqui de energia de deposição, balizam um trabalho satisfatório de deposições (ANDRADE, E. *et al.*, 2007).

Dentre essas variáveis, a energia de deposição é uma variável de importância fundamental para o controle da qualidade da camada depositada, tendo papel direto na formação de microestrutura, da zona fundida e da zona afetada pelo calor, nas propriedades mecânicas e na geometria da camada. Para o cálculo da energia de deposição, é preciso saber a potência do arco, que é obtida a partir do produto dos valores de tensão e corrente.

Alguns métodos para o cálculo da potência de arco foram propostos na literatura, contudo, segundo ANDRADE, E. *et al.*, 2007, existem divergências na definição do melhor método a ser utilizado no cálculo de potência do arco. Ainda, em um trabalho realizado por ANDRADE, E. *et al.*, 2007, com o objetivo de se comparar o grau de significância dos métodos para cálculo da potência elétrica através de uma abordagem experimental, em processos de soldagem a arco, foram avaliados comparativamente quatro métodos para o cálculo de potência: Potência Média Aritmética, Potência Eficaz, Potência Instantânea e Potência Instantânea RMS; Os experimentos foram efetuados com soldas MIG/MAG variando-se o modo de transferência, a saber: curto-circuito, globular, goticular e pulsado. Como resultado do trabalho, notou-se que os métodos de cálculo denominados Potência Instantânea Média e Potência Instantânea RMS são os mais indicados para o cálculo de potência, por não ser preciso um estudo preliminar do grau de dependência dos parâmetros tensão e correntes, envolvidos no cálculo, podendo, então, ambos serem aplicados para o cálculo de potência do arco para qualquer modo de transferência metálica.

#### **2.4.2 Transferência de calor na MADA**

A soldagem a arco de metal a gás (GMAW) é um processo de soldagem a arco que usa um arco de plasma entre um eletrodo de metal de adição consumível contínuo e a poça de fusão. O arco de alta temperatura funde o eletrodo e forma uma gota na ponta do eletrodo. A gota é destacada e transferida no arco para a peça de trabalho. A poça de fusão se forma sob às influências do arco e do impacto periódico de gotículas. A formação da gota, a transferência da gota no arco e a dinâmica da poça de fusão são regidas pelo equilíbrio de forças e pela transferência de calor dentro da gota ou dentro da poça de fusão e o calor transferido na interação de energia do arco (HENKELL, 2020).

A dinâmica da poça de fusão não é apenas influenciada pelo equilíbrio das forças que atuam sobre ela, mas também é afetada pelo impacto das gotas. A transferência de calor da gota e da poça de fusão inclui aquecimento ôhmico, condução e convecção. O calor transferido do arco inclui condução de calor por efeito térmico na superfície do ânodo e do cátodo (HU, 2006).

Em trabalhos onde foram realizadas deposições com chapa fria, a transferência de calor dá-se gradualmente pela distribuição não uniforme de energia ao longo do volume do substrato, podendo ocasionar distorções e tensões térmicas no substrato nas primeiras deposições até alcançar uma temperatura de trabalho estável. Com o intuito de preparar a superfície de deposição e de alcançar a estabilidade térmica, há abordagens que atuam na ideia pré-aquecimento do substrato trazendo como resultados ciclos térmicos mais suaves e diminuição da taxa de resfriamento da poça de fusão (Xiong, 2017).

Em MADA, as condições de transferência de calor mudam durante o processo de formação da peça, devido a interação e acúmulo de energia em função das sucessivas deposições de camadas de material. Abordagens de resfriamento vêm sendo mitigadas no âmbito científico, afim de se obter sistemáticas que propiciem diminuir o tempo de fabricação, visto que o resfriamento consome uma quantidade considerável de tempo de produção, pois para este processo há um intervalo de tempo entre as deposições em virtude da solidificação da camada e o controle de temperatura com o intuito de se obter o estacionário para propriedades mecânicas e em quesito de microestrutura. Nessa linha, estudos como proposto por KOZAMERNIK, 2020 mostrou que a combinação de tempo de permanência adaptável da camada intermediária e resfriamento forçado (como imersão em banho de água ou resfriamento forçado a ar) melhoram significativamente a produtividade do sistema. Porém em casos onde opta-se pela temática de resfriamento natural, à medida em que há o acréscimo de camadas e a estrutura vai ganhando altura, o tempo de resfriamento aumenta porque a transferência de calor para o substrato é mais lenta e a convecção de calor leva mais tempo para resfriar a parede.

### **2.4.3 Gerenciamento térmico entre camadas**

Uma das principais vantagens da MADA é sua elevada taxa de deposição, porém muitas vezes é negligenciado o fato de que essa característica está relacionada a elevados valores de energia na forma de calor, o que resulta em acúmulo de calor e compromete vários fatores do produto final. (Da Silva *et al.*, 2018).

Segundo Yang *et al.* (2017), o aquecimento proveniente da sobreposição progressiva de camadas e a entrada de calor excessiva gerada na MA por GMAW leva a grandes tensões residuais, distorções, um pior acabamento superficial e menor precisão geométrica. Portanto, a necessidade de estudos de gerenciamento térmico na área de MADA é crucial, principalmente devido a sua influência na forma final e nas propriedades mecânicas da peça.

De acordo com Da Silva *et al.* 2021, gerenciamento térmico trata-se de um conjunto de abordagens e técnicas utilizadas para controlar a temperatura durante o processo de fabricação,

ou em alguns casos após a deposição.

A falta de gerenciamento térmico adequado pode levar ao acúmulo de calor e causar variações diversas durante o processo de MADA e refletir tanto na microestrutura como na aparência final da peça. Com o aumento do interesse acadêmico e industrial em MADA, diferentes abordagens de gerenciamento térmico foram propostas e implementadas, conforme podemos visualizar na Tabela 1.

Tabela 1: Algumas abordagens típicas de gerenciamento térmico para MADA relatadas na literatura recente e seus destaques observados.

<b>Gerenciamento térmico Abordagem</b>	<b>Processo de Deposição de Material</b>	<b>Destaques selecionados</b>
Resfriamento em processo com N2 líquido	GMA e AISI 316 L	O resfriamento no processo promoveu o refinamento do grão e a melhoria das propriedades mecânicas
Tempo de permanência (resfriamento natural)	GMA e aço de baixo carbono	Não ocorreu acúmulo de calor para tempos e passes acima de 5 minutos
Arrefecimento do substrato	GMA e aço de baixo carbono	Paredes finas eram mais difíceis de depositar continuamente sem uma solução de resfriamento obrigatória, ou seja, condição natural.
Redução da corrente de deposição	GTA e liga Al-Si	A redução da corrente de deposição (de 140 para 100 A em 40 camadas) foi suficiente para lidar com acúmulo de calor.
Aumento da velocidade de deslocamento	GMA e aço de baixo carbono	A largura da camada foi mantida constante ao longo da seção transversal da peça, aumentando a velocidade da soldagem à medida que as camadas eram depositadas.
Resfriamento entre passes com jato de CO2 comprimido	GTA e Ti6Al4V	O resfriamento entre passes reduziu a oxidação e aumentou significativamente a produtividade.
Resfriamento em processo com CO2 comprimido, N2 e ar	GMA e aço de baixo carbono	O CO2 teve melhor efeito de resfriamento do que o N2, que excedeu a capacidade do ar.
Resfriamento ativo e corrente de deposição de polaridade variável	Liga GMA e Al-Mg	Abordagens de processo de resfriamento ativo e deposição foram usadas para mitigar o acúmulo de calor, onde a primeira se mostrou mais eficiente.
Resfriamento ativo e corrente de deposição de polaridade variável	Liga GMA e Al-Mg	As abordagens de resfriamento ativo e processo de deposição afetaram os aspectos macro e microestruturais das peças de Al.

Fonte: Adaptado de Da Silva *et al.*, 2021.

Vê-se que na segunda linha da Tabela 1, onde se tem a abordagem de resfriamento

natural, com controle de tempo para processos GMAW utilizando baixo aço carbono, a opção pode ser eleita como uma proposta acessível, uma vez que não é preciso integrar ao processo outro equipamento, por outro lado faz-se, apenas, controle do tempo entre deposições (com auxílio de um relógio) ou controle de temperatura não necessariamente atrelada ao controle de tempo (com auxílio de um pirômetro infravermelho, por exemplo).

#### **2.4.4 Regime Transiente e Quase estacionário**

Um dos tópicos recorrentes em soldagem é como e o quanto a variação do fluxo de energia via calor pode promover variações microestruturais e, por consequência, variações de propriedades físicas ao longo de um mesmo cordão de solda. As mudanças de fase, o modo como o calor interage na estrutura no decorrer no processo são abordadas pela literatura nos tópicos de transferência de calor como regime transiente e regime quase-estacionário.

A saber, no regime transiente é onde se tem um universo de variáveis se modificando uma em função das outras, durante e após o processo de soldagem. Já o regime quase-estacionário é o cenário caracterizado pela estabilidade ou previsibilidade das variáveis e das propriedades resultantes destas. Segundo Arruda *et al.*, 2019 o regime quase-estacionário pode não ser alcançado em soldagens a arco elétrico para peças de pequenas dimensões ou para materiais de maior condutividade térmica. Por outro lado, o regime transiente sempre ocorre no início e no final do processo de soldagem; abordagem que se leva em conta em trabalhos de pesquisa e na indústria, como critério para o descarte dos trechos de início (ponto ou seção de abertura do arco) e fim do cordão para confecção de corpos de prova para ensaios destrutivos e as análises microestruturais da seção central do cordão que restou após descarte.

Em um trabalho experimental realizado por Arruda *et al.*, 2019 onde se propôs a definir os momentos de comportamento transiente e quase-estacionário em deposições de 150 mm de comprimento, em chapas de aço ASTM A36 e SAE-1045 sob o processo GMAW, foi constatado através de análise de microdureza e macrografias que o regime quase-estacionário pode ter sido alcançado para as três últimas seções do cordão para ambos os materiais.

Observando da ótica de MADA, onde se tem a construção de camadas, a aplicação do conceito do quase-estacionário vai além da abordagem de variação das propriedades ao longo de um mesmo cordão e passa também a ser considerada a atuação da transferência de calor ao longo das camadas depositadas (Lu, X., 2021), fazendo com que haja questionamentos como “até que momento o substrato tem influência nas camadas e em que momento da deposição se alcança o estado quase-estacionário”. Ainda são necessários muitos estudos que embasem este

tópico.

### **2.4.5 Influência do substrato em MADA**

Em termos de substrato existem fatores intrínsecos da matéria que estão inteiramente relacionados a definição dos parâmetros de deposição, e sucesso do produto final manufaturado. Em trabalhos como em Kalashnikov *et. al.*, 2021, que se propuseram a estudar a influência substrato em MADA, foi trabalhados fatores como composição físico-químico, espessura e área da superfície do substrato e em como estes fatores também têm um papel importante na performance do processo, considerando que, dependendo dos parâmetros particulares do substrato, diferentes características de capacidade térmica absoluta surgirão, o que por sua vez afetará as transformações de fase estrutural na interface produto-substrato. Conforme resultado dos experimentos, foi constatado que o material e a espessura do substrato determinam a taxa de dissipação de calor, que tem um impacto acentuado na solidificação do material e contribuição direta na formação de microestrutura durante as deposições de camadas, com variação de microdureza média para espessuras diferentes de um mesmo material de substrato, por exemplo.

Abordagens de preparação do substrato antes do processo de deposição já são estudadas e empregadas na MADA, tal como apresentada em Corbin, 2018, onde estuda-se o efeito do pré-aquecimento da superfície do substrato na distorção da peça, descobrindo-se que o aquecimento antes da deposição reduziu o grau de distorção final observada, sem alteração microestrutural do material de base.

Em outro estudo, realizado por Marshall *et. al.*, 2015, com o intuito de saber a influência da espessura do substrato na microdureza em deposições de camada a laser, formando peças cilíndricas de Ti-6Al-4V, mostrou que a dureza Vickers média aumentou ao longo da seção transversal da peça fabricada, em função do aumento da espessura do substrato, assim como valores de temperatura máxima, observados, tenderam a diminuir à medida que a espessura do substrato aumentou.

Por outro perspectiva, fazendo uma correlação do regime quase-estacionário e a influência do substrato ao longo da estrutura de camadas depositadas, deseja-se saber em que momento da deposição para diferentes espessuras de substrato isto é alcançado. Em um trabalho realizado por Xufei Lu *et al.*, 2021 com a finalidade de se dimensionar espessuras de substratos para minimizar tensões residuais, onde fosse possível otimizar o estágio não estacionário e obter peças DED de alta qualidade, concluiu-se que a maioria das tensões residuais nos processos DED são geradas durante a deposição das primeiras camadas, quando o substrato ainda está frio

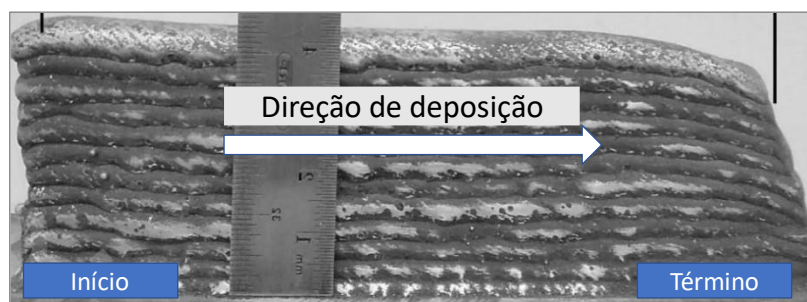


e se desenvolvem gradientes de temperatura muito elevados. Quando as condições quase-estacionárias são alcançadas, tensões residuais muito menores são geradas durante o processo de deposição. Foi observado, também, que em substratos mais finos houve redução das tensões residuais, porventura da redução do fluxo de calor, em função do volume menor de material, permitindo um estágio estável mais rápido e uma restrição mecânica mais baixa.

#### 2.4.6 Estratégia de deposição de camadas

Na soldagem por MIG/MAG, é observado naturalmente uma diferença de altura, de camadas depositadas, nos pontos de abertura e de fechamento de arco, sendo a região de início mais alta que a região de término como pode-se ver na Figura 3.

Figura 3: Visualização da diferença de altura total após sucessivas deposições de material em uma mesma direção.

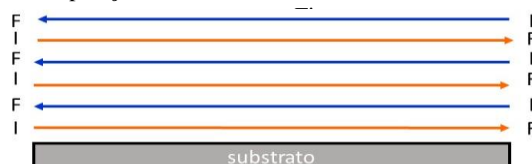


Fonte: Adaptado de G. P. Rajeev, 2020.

Isso acontece devido aos seguintes fatores: Na área de abertura do arco há uma alta dissipação de calor, o que faz com que as gotículas de metal transferidas para a poça de fusão não tenham tempo suficiente para se espalhar, resultando em uma rápida solidificação do cordão (XIONG *et al.* 2016).

Quando são efetuadas deposições sucessivas de material, como ocorre em MADA, conforme há incremento de camadas na peça, essa diferença de altura entre o ponto de abertura e fechamento de arco se torna muito significativa. Isso, além de gerar uma irregularidade na geometria do cordão, pode influenciar nas propriedades e na estabilidade do cordão, devido a variação do parâmetro da distância entre bico e peça (DBCP). Com base nessas observações, adota-se estratégia de deposição ilustrada na Figura 4, abaixo:

Figura 4: Proposta de deposição de material, intercalando o sentido de deposição. Onde I: Início e F:



Fonte: Autoria própria

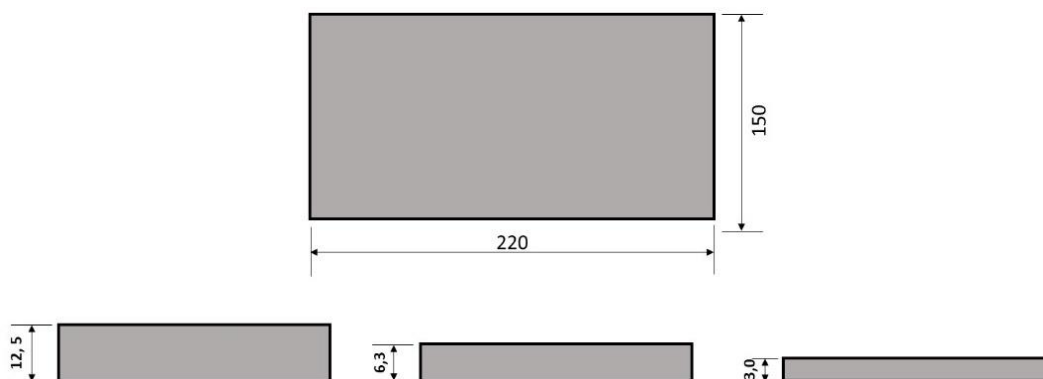
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Substrato

Foi utilizado como substrato, o aço carbono ASTM A36 em forma de chapa com as seguintes dimensões: 220 mm × 150 mm × 3 mm; 220 mm × 150 mm × 6,35 mm; e 220 mm × 150 mm × 12,5 mm, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Dimensões dos substratos ASTM A36



Fonte 2: Autoria própria

Conforme composição química do substrato ASTM A36 descrita na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química em % do substrato ASTM A36

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>
0,06 - 0,19	0,010 - 0,015	0,320 - 0,700	0,011 - 0,017	0,0060 - 0,0082	0,022 - 0,042	0,007 - 0,009	0,004 - 0,006
<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Nb</b>	<b>N</b>	<b>Sn</b>	<b>B</b>	<b>Ca</b>	
0,015 - 0,024	0,000 - 0,001	0,000 - 0,001	0,0036 - 0,0055	0,001	0,000 - 0,0001	0,0001 - 0,0003	

Fonte: Autoria própria (base: fornecedor ArcelorMittal Brasil S.A.)

##### 3.1.2 Material de adição

O material de adição (arame maciço) utilizado foi o ASME SFA – 5.18 ERS70S-6, com 1 mm de diâmetro e composição química disposta na Tabela 3. Indicado para soldagem de aços carbono em geral, garante desoxidação durante a soldagem e maior uniformidade no cordão.

Tabela 3: Composição química em % do arame ASME SFA - 5.18 ERS70S-6

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>
0,06 - 0,015	0,4 - 1,85	0,20 - 1,15	0,025 Máx.	0,035 Máx.	0,15	0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,03 Máx.	0,5 Máx.

Fonte: Base catálogo Metal Arc.

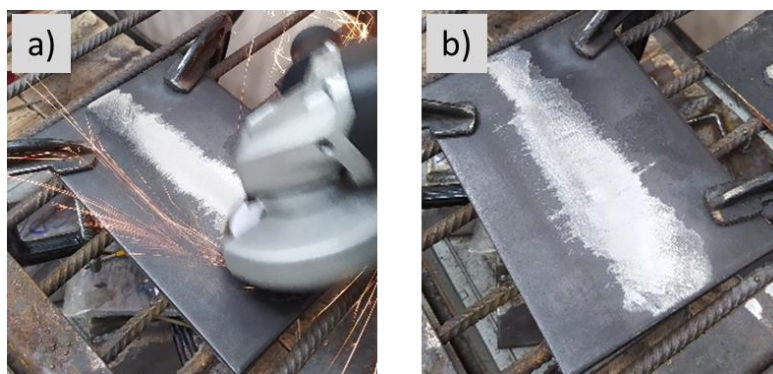
## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Procedimento de MADA

#### 3.2.1.1 Preparação dos corpos de prova

A preparação de cada substrato deu-se pela limpeza da superfície para remoção de óleo e outras impurezas; Em seguida, com o auxílio de uma esmerilhadeira (Figura 6), foi realizada a remoção de uma fina camada de material das chapas a fim de delimitar a área de trabalho por onde passaria o cordão de solda e, antes disso, também, para facilitar a aderência dos contatos dos termopares à superfície de cada chapa.

Figura 6: (a) Processo de remoção de camada com esmerilhadeira; (b) Centro da chapa delimitado.



Fonte: Autoria própria

#### 3.2.1.2 Processo de MADA

Para a realização dos experimentos foram utilizados os equipamentos localizados no Laboratório de Soldagem do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Foi utilizada solda MIG por meio do equipamento ESAB Warrior™ 400i (Figura 7), com uma mistura gasosa de 92% Ar e 8% CO<sub>2</sub>.

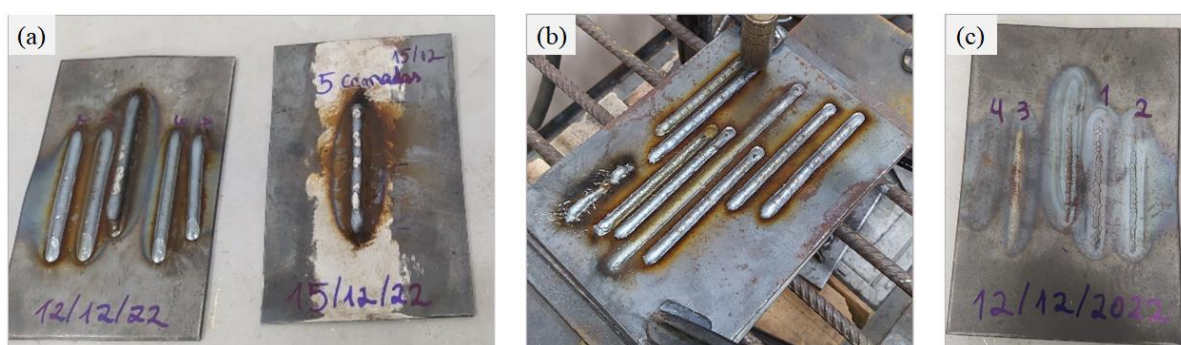
Figura 7: Equipamento de soldagem



Fonte: Autoria própria

Inicialmente foram realizados diversos ensaios-teste, Figura 8 (a) e (b), a fim de se definir os parâmetros de soldagem para o processo de deposição. A chapa de 3 mm foi utilizada como referencial, visto que é a chapa de menor espessura empregada neste trabalho e, portanto, mais suscetível ao estado de projeção (excesso de penetração), conforme pode-se visualizar na Figura 8 (c).

Figura 8: (a) Teste de deposição com múltiplas camadas; (b) Testes de deposição em camadas-única; (c) Visualização de projeção na parte inferior da chapa.



Fonte: Autoria própria

Com a validação dos testes para atender ao estado de projeção favorável, foram eleitos os parâmetros de soldagem registrados na Tabela 4:

Tabela 4: Parâmetros para processo de deposição de camadas

Parâmetros do processo	Valores
Corrente de deposição	170 A
Tensão de arco	18 V
Velocidade de deposição	5,83 mm/s (350 mm/min)
Velocidade de alimentação do arame	6 m/min
DBCP	7 mm
Vazão do gás de proteção (92% Ar e 8% CO <sub>2</sub> )	15 L/min
Temperatura de superfície para deposição seguinte	30 °C

Fonte: Autoria própria

### 3.2.1.3 Sistema de deposição de camadas e definição de trajetória

Para a deposição de camadas de forma parcialmente autônoma, foi utilizada uma CNC de bancada modelo CNC GL-3020, Figura 9, adaptada com um acoplador para a tocha de soldagem. A soldagem foi realizada de forma semiautomática: onde a movimentação é realizada pela CNC, e a abertura de arco elétrico realizada de forma manual a partir de um botão de acionamento interligado ao sistema.

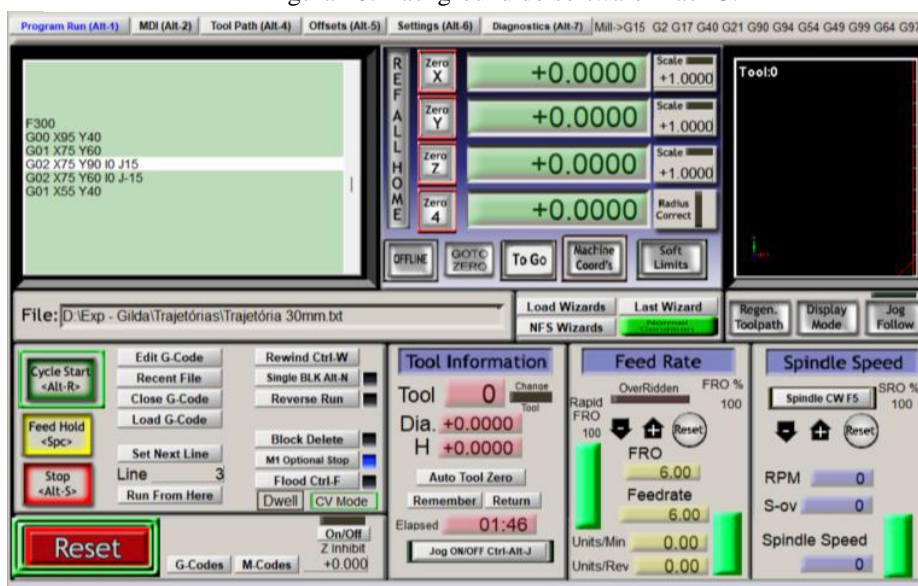
Figura 9: CNC GL-3020



Fonte: Autoria própria

Para a movimentação da CNC foi utilizado o *software Mach 3* com programação no código G (Figura 10).

Figura 10: Background do software Mach 3.



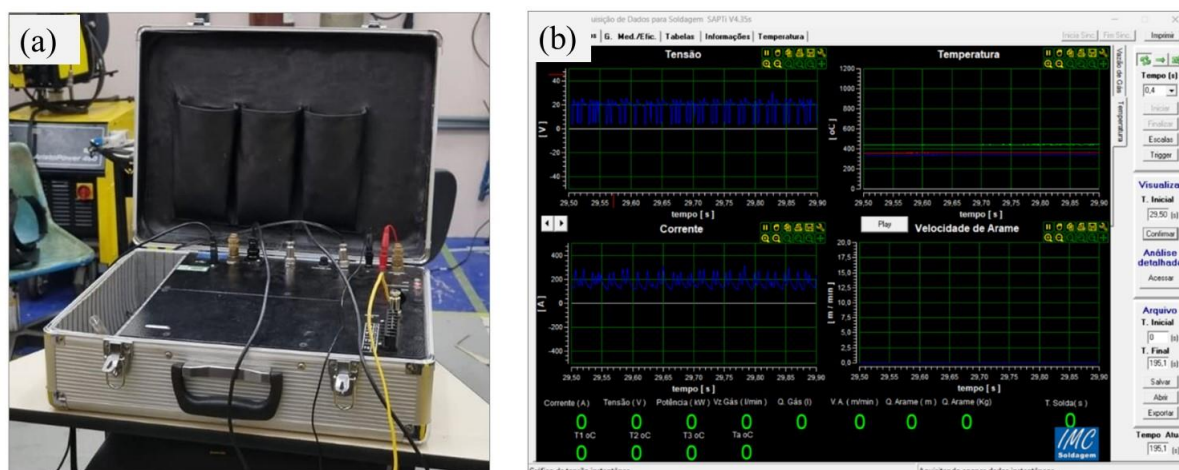
Fonte: Autoria própria

### 3.2.1.4 Aquisição de dados (Sistema SAP: tensão, corrente, temperatura)

- **Aquisição dos parâmetros de deposição**

Para a captura e análise dos dados de temperatura, tensão, corrente e velocidade de alimentação do consumível, foi utilizado o equipamento de instrumentação IMC® SAP V4Ti, Figura 11 (a), integrado ao *software* SAPTiV4.35s, Figura 11 (b).

Figura 11: (a) Sistema de aquisição de dados SAP; (b) Software SAPTiV4.35s V4Ti na leitura de dados.



Fonte: Autoria própria

Foram coletados valores de tensão, corrente e temperatura para cada camada depositada, em cada chapa, e posteriormente, com os arquivos de texto gerados pelo sistema SAP, realizou-se o tratamento de dados que ver-se-á na seção de resultados e discussões.

- **Obtenção da Energia de Deposição ( $E_d$ ) e Potência Instantânea Média (PIM)**

A energia de deposição ( $E_d$ ), o equivalente ao chamado aporte térmico em soldagem ou energia de soldagem, é uma variável fundamental para o controle da qualidade da solda, influenciando diretamente na microestrutura da zona fundida, da zona termicamente afetada pelo calor (ZAC), nas propriedades mecânicas e na geometria do cordão.

Para o cálculo da energia de deposição, é preciso saber da potência do arco, que por sua vez é obtida através dos valores de corrente de soldagem e tensão do arco. Dentre os métodos existentes para o cálculo da potência do arco, neste trabalho adotou-se utilizar o cálculo da Potência Instantânea Média (PIM), dada pela média aritmética dos resultados do produto da tensão pela corrente realizados pontualmente em cada amostragem de deposição, conforme Equação (1).

$$PIM = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times I_i}{n} \quad [W] \quad (1)$$

Onde:

- $U_i$ : valores de tensão do arco em cada deposição;
- $I_i$ : valores de corrente elétrica aquisitados durante o processo de deposição;
- $n$ : número de pontos aferidos pelo equipamento ao longo do processo de deposição.
- 

A energia de deposição, Equação (2), por sua vez, é o quociente da potência instantânea média pela velocidade de deposição ( $v$ ) que neste caso, para o processo, é um parâmetro com  $v = 5,83$  mm/s conforme registrado na Tabela 4.

$$E_d = \frac{PIM}{v} \quad [J/mm] \quad (2)$$

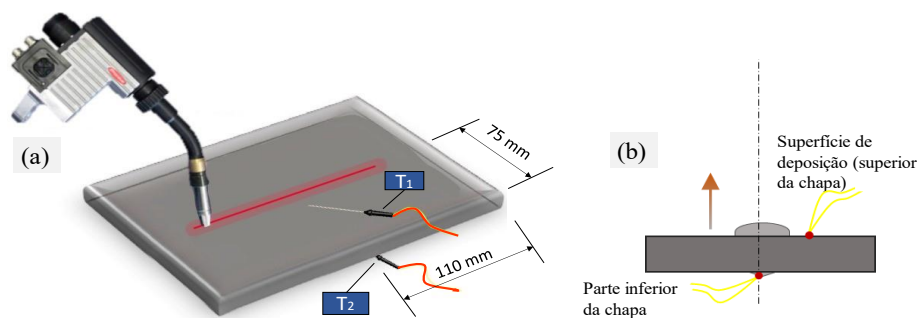
- **Soldagem de termopares para aquisição dos ciclos térmicos**

Para obtenção de dados de temperatura foi utilizado termopar tipo K, o qual é constituído por uma junção de Chromel (elemento positivo) com Alumel (elemento negativo).

A faixa de temperatura do termopar tipo K está entre os  $-200^{\circ}C$  e  $1260^{\circ}C$ , com uma faixa de resolução de aproximadamente  $41\mu V/^{\circ}C$  e diâmetro do terminal de medição: 0,5 mm.

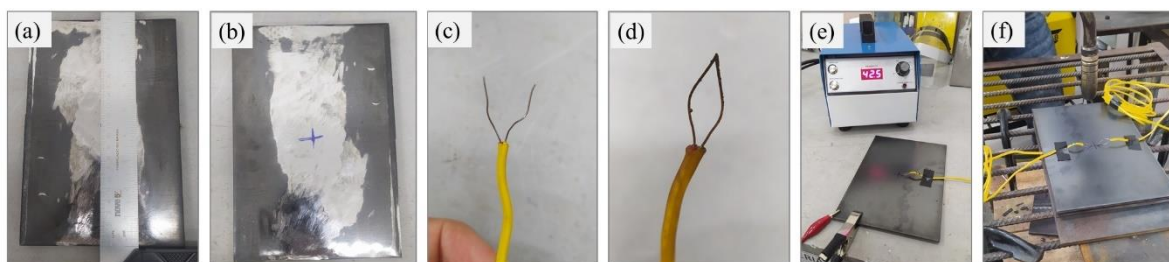
Foi adotada uma estratégia para a alocação dos termopares no plano da chapa, conforme o ilustrado, abaixo, Figura 12, onde adotou-se o centro da chapa como ponto de medição de temperatura do processo, visto que, no início da deposição há um acúmulo de energia em função da abertura do arco. Então, devido a isto os termopares foram centralizados à chapa: um termopar, para aferição, na superfície direta de deposição e um outro termopar na face oposta à deposição.

Figura 12: (a) representação de deposição com termopares; (b) Visualização dos termopares em vista lateral da chapa.



Os termopares foram soldados, à cada chapa, com o auxílio do equipamento de solda por descarga capacitiva, Figura 13 (e), a uma distância de 10 mm do ponto onde passaria o cordão de solda. Para a soldagem dos termopares à superfície de cada chapa, foi utilizado o equipamento com um intervalo de cargas de tensão entre: 23 a 42 V.

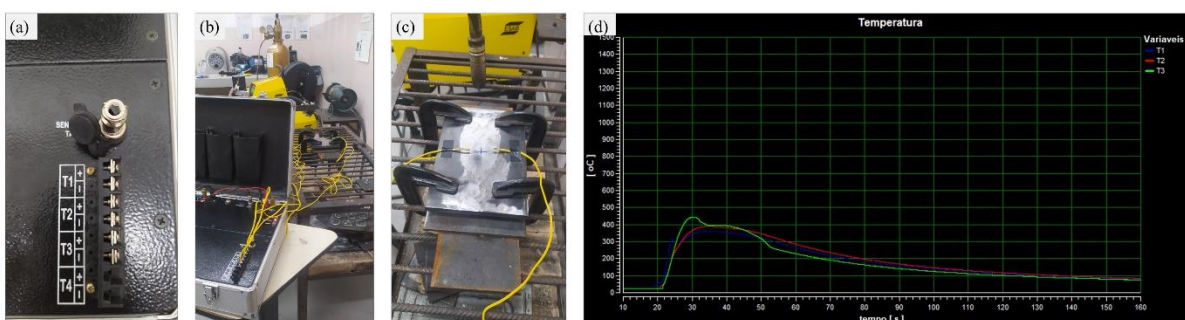
Figura 13: (a) Delimitação do centro da chapa; (b) Centro delimitado; (c) Pontas de termopar a serem soldados; (d) Modelo união de pontas adotado; (e) Processo de solda dos terminais dos termopares à chapa; (f) Termopares soldados, prontos para conexão no equipamento SAP.



Fonte: Autoria própria

Com os terminais dos termopares devidamente conectados às portas de comunicação para aquisição de temperatura, do sistema SAP V4Ti, Figura 14 (b), um arquivo de texto contendo os valores para intervalos de temperatura do processo de deposição foi gerado pelo sistema SAP V4Ti, juntamente com a representação da curva de temperatura para cada deposição como pode-se observar na Figura 14 (d).

Figura 14: (a) Terminais para sensor de temperatura no equipamento SAP; (b) Termopares soldados à chapa ligados nos terminais de comunicação; (c) visualização de termopares na face de deposição; (d) Obtenção de dados para obtenção póstuma dos ciclos térmicos.



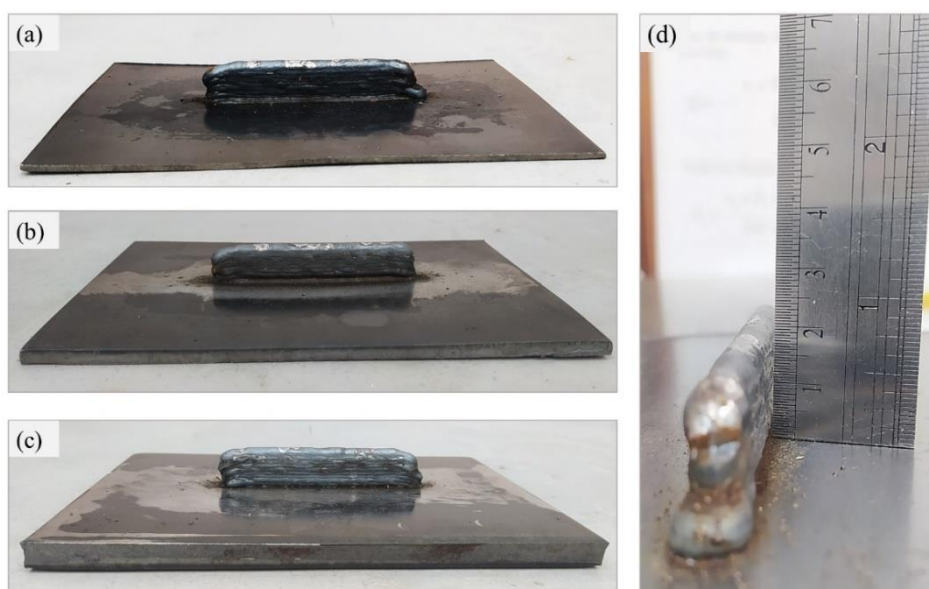
Fonte: Autoria própria

Foram realizadas 10 camadas de deposição de material com uma trajetória de deposição de 100 mm de comprimento, em cada um dos substratos, conforme regime adotado como estratégia de deposição, ilustrado o sentido das deposições na Figura 4 . Os produtos das



deposições podem ser observados na Figura 15, onde vê-se que foi construído um formato de parede; A altura total ao final das deposições ficou de 18 mm para o substrato de 3,0 mm; 19,5 mm para o substrato de 6,3 mm e de 20 mm para o substrato de 12,5 mm de espessura.

Figura 15: (a) Produto final de deposições, chapa 3 mm; (b) Produto final de deposições, chapa 6,3 mm; (c) Produto final de deposições, chapa 12,5 mm; (d) Medição da altura final das camadas de deposição.

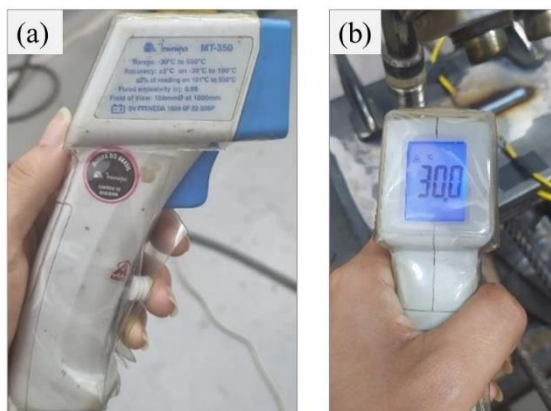


Fonte: Autoria própria

- **Controle de temperatura entre as deposições**

Para o gerenciamento térmico, entre uma deposição e outra, foi utilizado um pirômetro infravermelho digital da marca Minimpa MT-350, Figura 16 (a), com uma faixa de temperatura de -30 a 550 °C e faixa espectral de 1,65–2,1 μm, para o controle de temperatura na superfície de cada camada, onde esperava-se por resfriamento natural a superfície atingir a temperatura de 30 °C para uma nova deposição, Figura 16 (b).

Figura 16: (a) Pirômetro infravermelho Minimpa MT-350; (b) Controle de temperatura na superfície de deposição.



Fonte: Autoria própria.

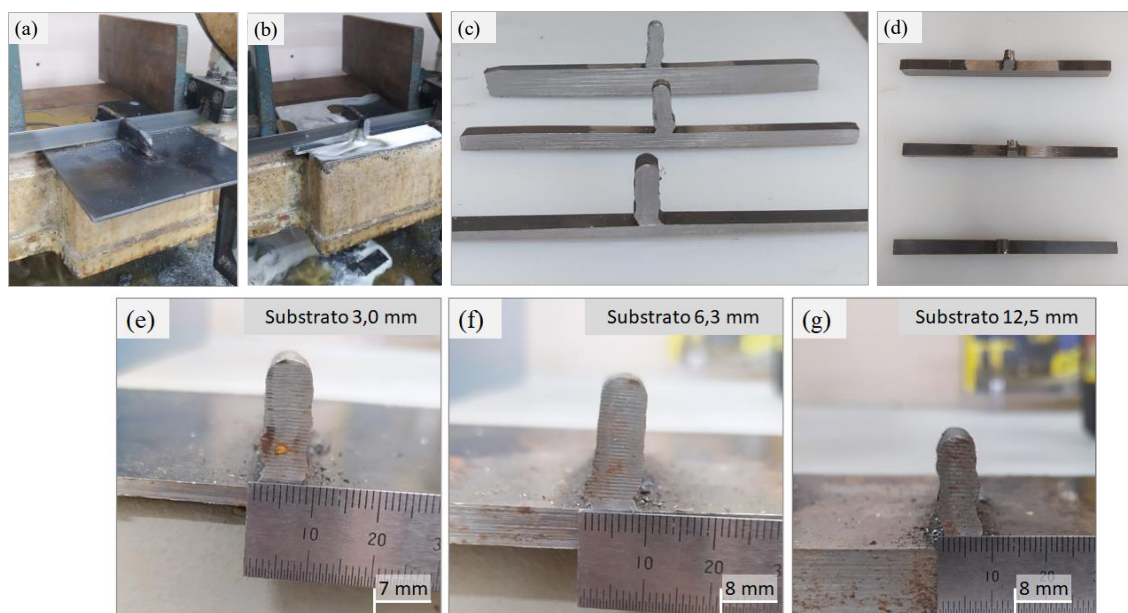
### 3.2.2 Preparação de material para ensaio de microdureza

Alguns procedimentos de preparação foram realizados a fim se obter o perfil de interesse para a seção do ensaio de microdureza. Iniciou-se com o corte das peças fabricadas, em seguida a etapa de embutimento para internalização do perfil e, por fim, lixamento e polimento da face aparente. Tais tópicos são descritos a seguir.

#### 3.2.2.1 Delimitação de perfil de amostras

Como parte da preparação, após o processo de deposição de camadas, foi realizado o corte da seção transversal para cada peça com uso do equipamento de corte serrafita, Figura 17 (a) e (b), obtend o-se os perfis em corte como pode-se ver em Figura 17 (c) e (d).

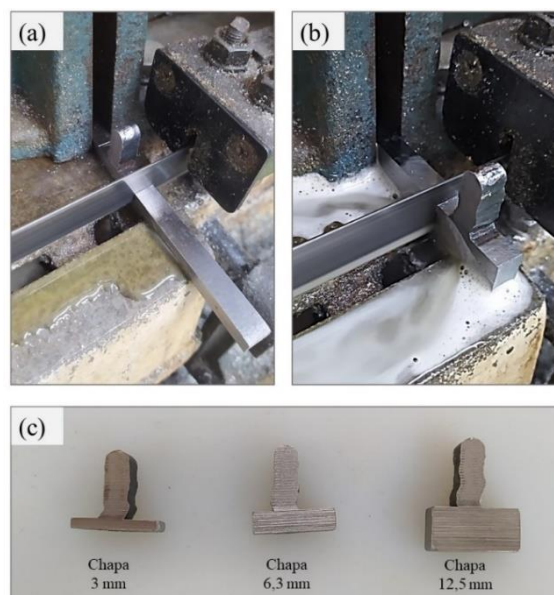
Figura 17: (a) 1ª etapa de corte; (b) 2ª etapa de corte: Corte da secção de análise; (c) e (d) Vistas das peças em corte; (e), (f) e (g) Medida da largura das deposições.



Fonte: autoria própria

A partir dos perfis em corte, Figura 18 (c), mais uma etapa de corte foi realizada, de modo a se obter um contorno transversal centralizado da amostra de deposição de camadas.

Figura 18: (a) e (b) Corte final para delimitar secção de análise; (c) Amostras obtidas de



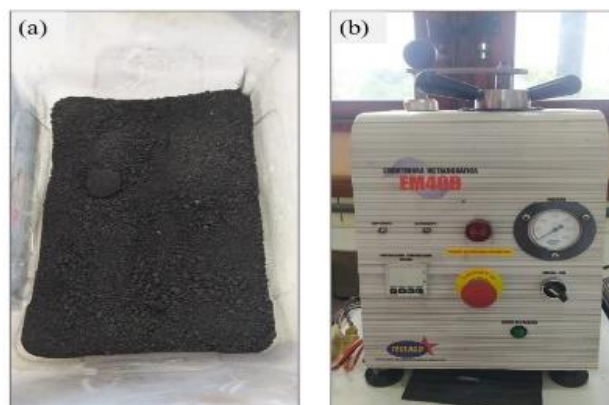
Fonte: Autoria própria

### 3.2.2.2 Embutimento

Com as secções dos corpos de prova definidos, realizou-se o processo de embutimento que tem como finalidade facilitar o manuseio das peças em corte, proporcionando segurança e certo conforto no momento de lixar e polir as superfícies, além de evitar que as arestas dos corpos de prova danifiquem as lixas e o pano de polimento.

A etapa de embutimento foi realizada à quente com resina baquelite, Figura 19 (a), onde uma amostra por vez foi colocada na prensa de embutimento com resina (Figura 19 b) sob um intervalo de temperatura de 40°C a 170° e pressão entre 125 a 150 kgf/mm<sup>2</sup> com duração de 8 minutos para cada corpo de prova.

Figura 19: (a) Grânulos de baquelite; (b) Prensa de embutimento.



Fonte: Autoria própria

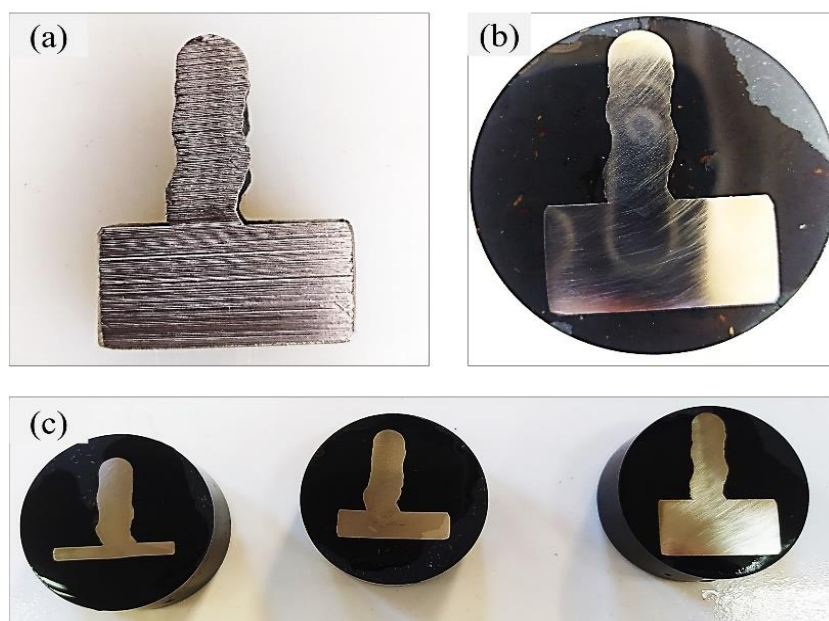
### 3.2.2.3 Lixamento da secção embutida

Foi o processo mais demorado do circuito de preparação das amostras. Esta etapa tem como finalidade retirar os riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um certo acabamento e preparando para a etapa seguinte: polimento.

A técnica de lixamento, aqui, consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção ( $90^\circ$ ) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

As granulometrias das lixas utilizadas no processo de lixamento das amostras foram na seguinte sequência: 80, 120, 200, 400, 600 e 1200. A seguir podemos observar um registro da evolução da superfície da amostra, na Figura 20.

Figura 20: (a) Amostra pós corte no serra-fita; (b) e (c) Amostras pós processos de lixamento.



Fonte: Autoria própria

### 3.2.2.4 Polimento da secção embutida

Etapa pós lixamento que tem como finalidade deixar a superfície isenta de marcas e que permita a visualização de uma imagem nítida ao microscópio. Para alcançar este feito é utilizado abrasivos como pasta de diamante ou alumina. Na operação foi utilizada a alumina com esferas de  $3\mu\text{m}$  e  $1\mu\text{m}$ , sempre adicionando água destilada ao processo e com uma rotação baixa no equipamento.

É de extrema importância que a superfície a ser polida esteja limpa. A limpeza da superfície pode de feita com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de

ebulição, como álcool por exemplo, para que a secagem seja rápida.

### 3.2.2.5 Ensaio de microdureza Vickers

O ensaio de microdureza consiste na realização de uma marcação na superfície da peça, através da aplicação de uma ponta de penetração sobre pressão. A medida é dada em função da carga aplicada a partir das medidas da impressão realizada.

Com a superfície do corpo de prova devidamente polida, uma malha 3x10, foi representada na superfície de cada amostra para realizar as indentações (Figura 21).

Figura 21: Representação de malha diretamente na amostra.

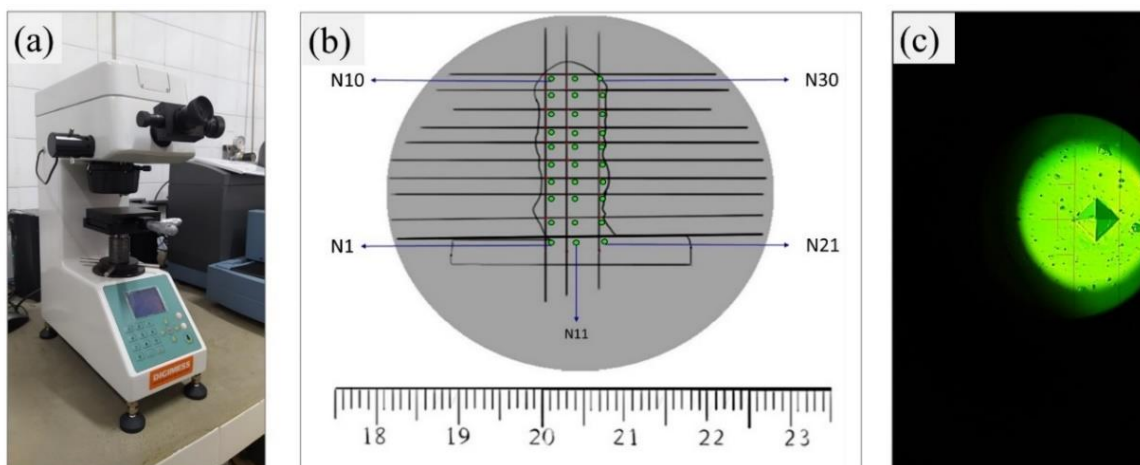


Fonte: Autoria própria

As medições foram realizadas através do Microdurômetro Vickers Digimes 400.31, Figura 22 (a), e para as marcações: base quadrada, com um penetrador diamantado em forma de pirâmide possuindo ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas. A carga utilizada para as endentações foi de 500 kgf com aplicações durando 15 segundos.

Foram realizadas 30 indentações, para cada amostra, a partir da distribuição dos pontos dispostos na malha definida, com leituras realizadas da esquerda para a direita de baixo para cima, na ordem ilustrada na Figura 22 (b). Para o resultado de microdureza é necessário o uso do microdurômetro para medir as duas diagonais da indentação realizada na superfície, Figura 22 (c), inserir os valores lidos no próprio equipamento e obter o valor nominal de microdureza.

Figura 22: (a) Microdurômetro Vickers; (b) Ilustração do sentido das marcações no microdurômetro; (c) Visualização de uma das endentações realizada com ponteira do microdurômetro.



Fonte: Autoria própria

### 3.2.3 Macrografia

Após o lixamento e polimento, os corpos de prova foram mergulhados em um material reativo (ataque por imersão em Nital 2% de concentração) onde passa pelo processo de ataque que levou em média de 10 a 15 segundos.

Após esse ataque, a superfície em questão foi imediatamente lavada com álcool e então submetida a um processo de secagem por um jato de ar quente.

Com o macroataque realizado, fica em evidência a macroestrutura, a qual pode-se ser observada a olho nu ou através de uma lupa de baixo aumento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Potência Instantânea Média e Energia de Deposição

Para o cálculo da Potência Instantânea Média (PIM) e Energia de Deposição ( $E_d$ ) foram utilizadas as equações (1) e (2) respectivamente. Na Tabela 5, pode-se observar os valores das 10 camadas de deposição para as 3 espessuras de chapa, juntamente com seus desvios padrão.

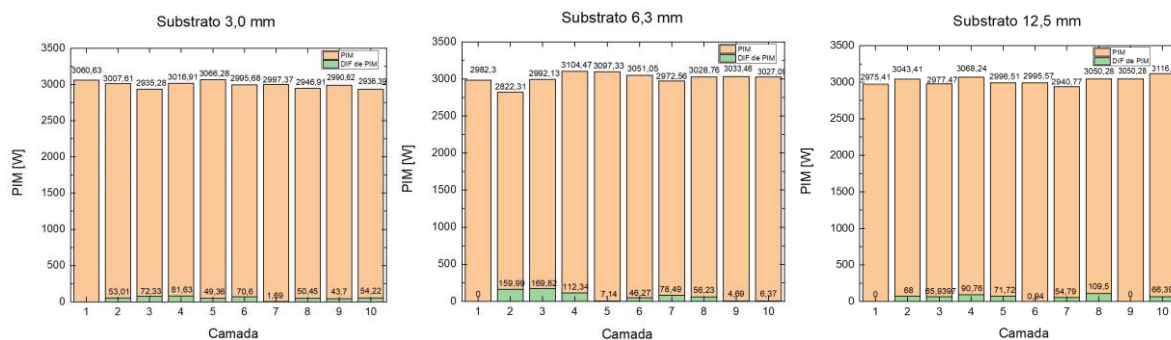
Tabela 5: Potência Instantânea Média e Energia de Deposição com seus respectivos desvios padrão.

Potência Instantânea Média e Energia de Deposição por espessura						
Camada	3,0 mm		6,3 mm		12,5 mm	
	PIM [kW]	Ed [J/mm]	PIM [kW]	Ed [J/mm]	PIM [kW]	Ed [J/mm]
1	2,97 ± 1,45	510,38 ± 249,04	2,98 ± 1,42	511,37 ± 244,22	3,06 ± 1,42	524,98 ± 245,18
2	3,04 ± 1,39	522,02 ± 239,78	2,82 ± 1,27	484,10 ± 219,07	3,00 ± 1,35	515,88 ± 231,56
3	2,97 ± 1,45	510,71 ± 249,36	2,99 ± 1,34	513,23 ± 231,29	2,93 ± 1,31	503,47 ± 225,53
4	3,06 ± 1,37	526,28 ± 235,87	3,10 ± 1,33	532,50 ± 229,12	3,01 ± 1,33	517,48 ± 229,50
5	2,99 ± 1,35	513,98 ± 232,45	3,09 ± 1,38	531,27 ± 236,75	3,06 ± 1,36	525,94 ± 233,88
6	2,99 ± 1,34	513,82 ± 230,20	3,05 ± 1,36	523,33 ± 233,46	2,99 ± 1,34	513,83 ± 230,91
7	2,94 ± 1,35	504,42 ± 233,02	2,97 ± 1,33	509,87 ± 229,56	2,99 ± 1,33	514,12 ± 229,57
8	3,05 ± 1,35	523,20 ± 231,95	3,02 ± 1,39	519,51 ± 238,63	2,94 ± 1,30	505,47 ± 223,09
9	3,08 ± 1,37	527,62 ± 232,86	3,03 ± 1,35	520,31 ± 232,11	2,99 ± 1,33	512,97 ± 229,03
10	3,11 ± 1,37	534,59 ± 235,38	3,02 ± 1,37	519,22 ± 235,94	2,93 ± 1,29	503,67 ± 222,97

Fonte: Autoria própria

No primeiro momento podemos observar graficamente, na Figura 23, a diferença dos valores de potência instantânea média (PIM) entre uma camada e outra de deposição para um mesmo substrato, sem a contribuição dos desvios padrão registrados na Tabela 5.

Figura 23: Variação dos valores de potência instantânea média sem a contribuição dos desvios padrão



Fonte: Autoria Própria

Quantifica-se então, na Tabela 6, uma variabilidade média PIM entre uma camada e outra de:

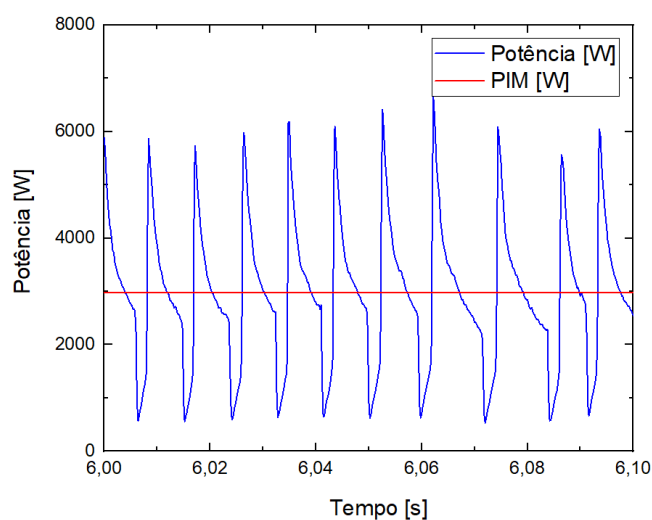
Tabela 6: Diferença média de PIM para cada espessura de substrato

Espessura do substrato	Diferença média de PIM entre camadas
3,0 mm	58,67 W
6,3 mm	71,60 W
12,5 mm	53,00 W

Fonte: Autoria própria

Por outra perspectiva, na Figura 24, pode-se observar a amplitude dos valores de potência em relação a potência instantânea média (PIM) durante o processo de deposição de camadas. Esta variabilidade na amplitude deve-se aos valores pontuais de tensão e corrente ao longo do processo.

Figura 24: variabilidade dos valores de potência.

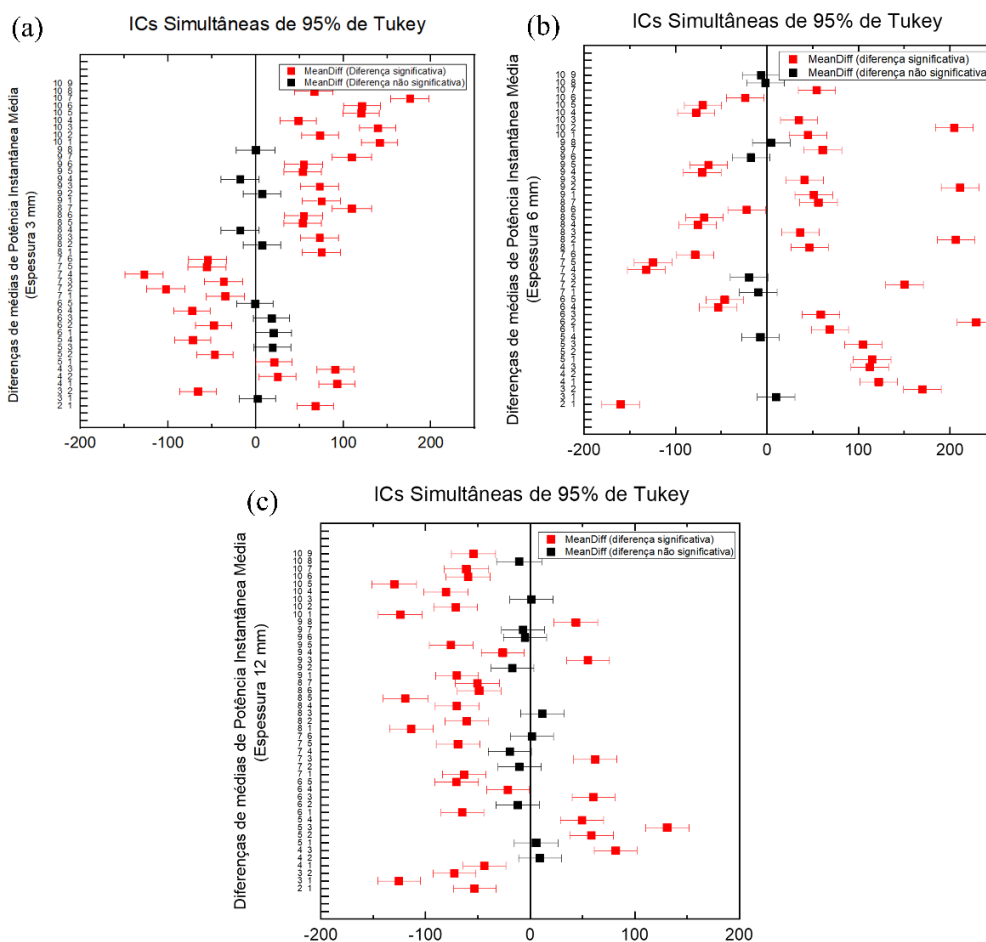


Fonte: Autoria Própria

Para verificar a similaridade dos valores de potência instantânea média (PIM) com seu desvio padrão, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) através do teste de Tukey com 95% de confiança, com o objetivo de se verificar a diferença significativa ou não dos valores apresentados na Tabela 5. Na Figura 25, pode-se observar os resultados obtidos da análise de variância.



Figura 25: análise de variância com teste de Tukey com 95% de confiança



Fonte: Autoria própria

A partir da análise, percebe-se em maior número diferenças significativas de 77,27% das médias comparadas para a espessura de 3 mm, 79,54% para a espessura de 6,3 mm e 72,73% para a espessura de 12,5 mm. Essas diferenças podem ser justificadas a partir da instabilidade intrínseca do processo, como, por exemplo, o modo de transferência metálica, neste caso: curto-circuito convencional.

No modo de transferência metálica por curto-circuito temos controle apenas dos valores de entrada setados diretamente na fonte, ou software ligado ao processo, como por exemplo, input dos valores de tensão, velocidade de alimentação do arame, velocidade de deposição e vazão do gás de proteção; fazendo com que outros fatores não sejam de fato gerenciados, visto que um ponto importante no desenvolvimento do tópico de manufatura aditiva por deposição a arco é ajustar a transferência metálica, uma vez que o equipamento de soldagem é projetado principalmente para a soldagem convencional e não para fabricação aditiva camada por camada.

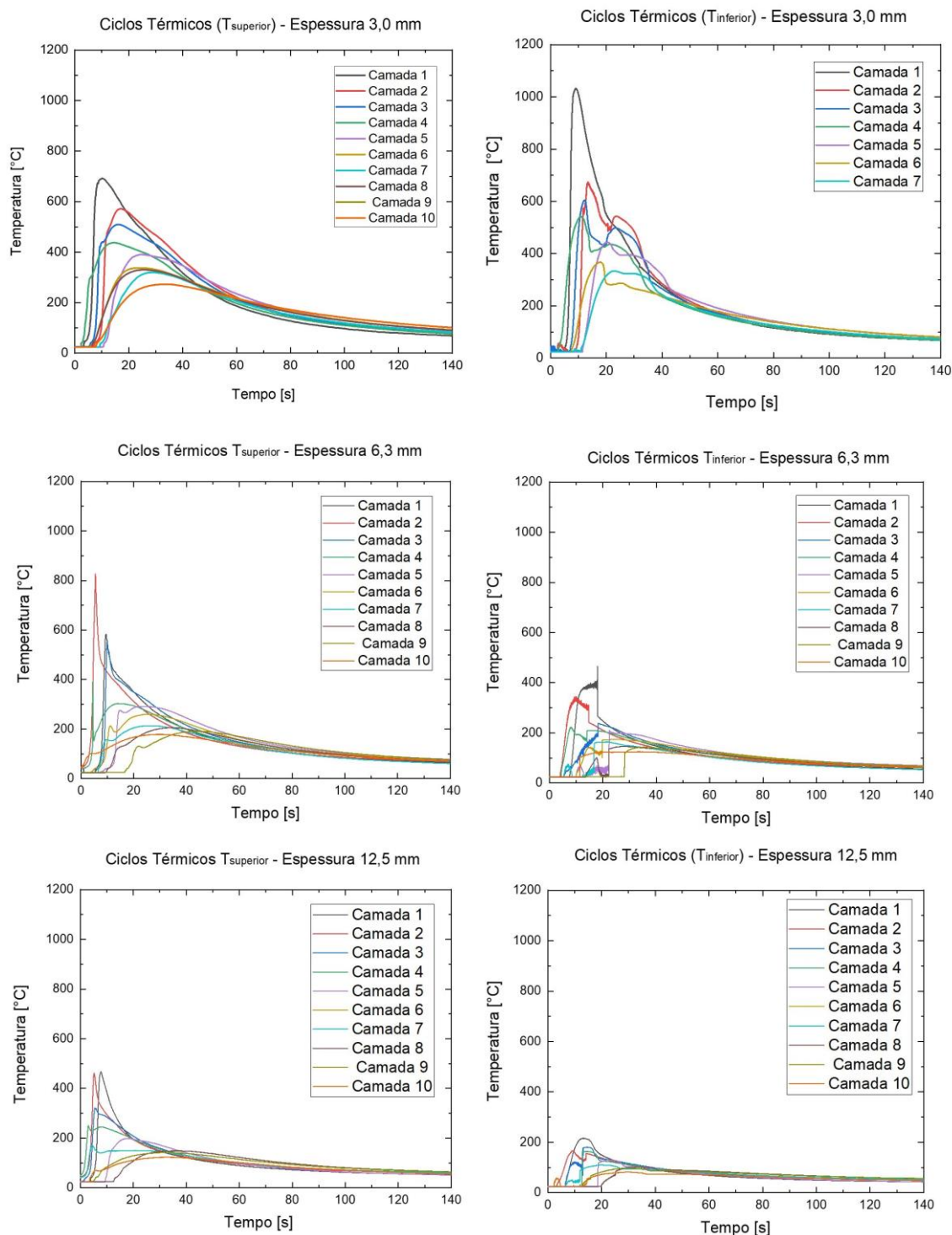
E por fim, outro fator, que pode ter causado certa instabilidade no processo é o efeito de distorção das chapas no decorrer das deposições, pois, foi observado, já na 1ª camada de deposição de material, um grau de distorção das chapas; em maior grau na chapa de 3 mm e quase imperceptíveis nas chapas seguintes de espessuras maiores. As ondulações na superfície, antes plana, pode levar a pequenos erros nas atualizações do parâmetro de DBCP, contribuindo, assim, para variações na corrente, como comentado no parágrafo anterior, ocasionando conseqüentemente variabilidade nos valores de PIM ao longo do processo. Esse comportamento da distorção pode ser suavizado com o ajuste dos grampos, que prendem a chapa à base de deposição localizado logo abaixo da tocha, em pontos estratégicos da mesma, os ajustes variam de caso para caso, devendo-se observar previamente em testes antes da construção de modelos finais.

Após a análise dos dados percebeu-se que a ANOVA não é o método de análise mais adequado para verificar o nível de diferença não significativa entre os valores de PIM, pois os valores de Potência Instantânea Média não seguem uma distribuição normal, como pode ser verificado nos testes de normalidade apresentados no Apêndice A.

## **4.2 Ciclos Térmicos**

A Figura 26 mostra os ciclos térmicos, para as três espessuras de chapa empregadas no trabalho, compostos pela representação das curvas de temperatura para as 10 camadas de deposição construídas em cada amostra. Os ciclos foram obtidos a partir da aquisição de dados por meio do uso de termopares distintos para parte superior e inferior da chapa, com registro efetuado camada a camada, durante o processo de deposição durando em média 16 segundos por camada até a fase de resfriamento que se estende após a temperatura de pico.

Figura 26: Ciclos térmicos para as três espessuras



Fonte: Autoria própria

De modo geral, nota-se um maior aporte térmico nas 3 primeiras camadas de deposição para todas as espessuras de chapa, com temperaturas mais altas nos 20 segundos iniciais da captura, e uma ascendência das curvas com variações suaves ocorrendo durante o resfriamento, observado até aos 140 segundos de captura, dando o formato de curva mais linear ao longo do

tempo a partir dos 45 ou 50 segundos.

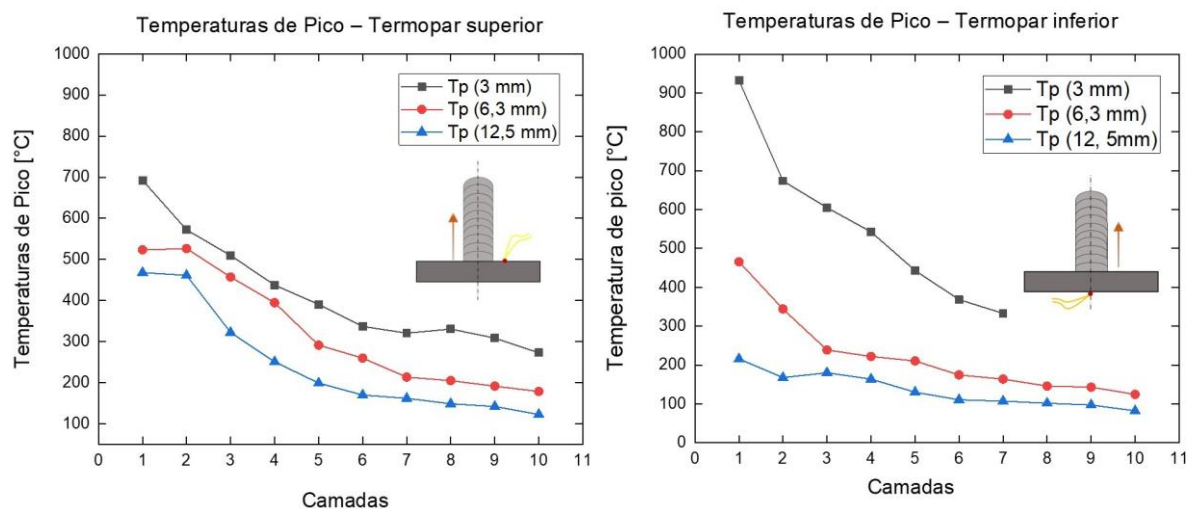
Na Figura 26 (a) e (b) tem-se os ciclos térmicos, da parte superior e inferior respectivamente, da chapa de espessura 3 mm, onde nota-se uma harmonia e congruência no comportamento dos ciclos de todas as camadas. No registro da Figura 26 (b), referente ao registro do termopar localizado na parte inferior, nota-se um elevado valor de temperatura na 1ª camada, levando a uma diferença considerável quando comparada com o mesmo registro da camada 1 para o termopar alocado na face de deposição, isto certamente se deve à transferência de calor direta recebida pelo termopar, uma vez que este ficou alocado no ponto central onde passaria a trajetória da deposição, tendo, assim, um contato direto com a energia no momento da deposição. Uma ressalva quanto as capturas do termopar da parte inferior da chapa de 3 mm é que não foram obtidos os registros dos ciclos das três últimas camadas de deposição em decorrência de problemas técnicos do termopar (perda da união das pontas do termopar, comprometendo a leitura de dados).

Na Figura 26 (c) e (d), tem-se os ciclos térmicos, da parte superior e inferior respectivamente, da chapa de espessura 6,3 mm, nota-se curvas de temperaturas mais estreitas em comparação aos ciclos térmicos da chapa de espessura 3 mm, esta última com curvas mais espaçadas, isso se deve ao aumento da espessura da chapa, e curva de temperaturas mais baixas são registradas à medida que as deposições vão sendo incrementadas. Tal comportamento aplica-se também aos ciclos térmicos obtidos para a chapa de maior espessura como pode-se visualizar na Figura 26 (e) e (f), onde tem-se os ciclos térmicos, da parte superior e inferior respectivamente, da chapa de espessura 12,5 mm, seguindo o mesmo comportamento da chapa de espessura de 6,3 mm em relação a chapa de 3 mm.

### **4.3 Temperaturas de Pico ( $T_p$ )**

Na Figura 27 , tem-se a representação gráfica das temperaturas de pico ao longo de cada deposição de camada, com as curvas agrupadas, em paralelo para cada espessura de chapa, divididas em temperaturas de pico registradas pelo termopar superior (face de deposição da chapa) e registros efetuados pelo termopar inferior.

Figura 27: Gráficos das temperaturas de pico (a) Face de deposição; (b) Parte inferior da chapa.



Fonte: Autorial própria

Percebe-se que quanto menor a espessura da chapa, mais altas são as temperaturas de pico, e que, para uma mesma chapa, ao passo que as deposições de camadas vão sendo incrementadas, os valores de pico vão diminuindo em virtude do aumento de altura, ao avançar das camadas, e consequente distanciamento da superfície de deposição, onde está alocado o termopar.

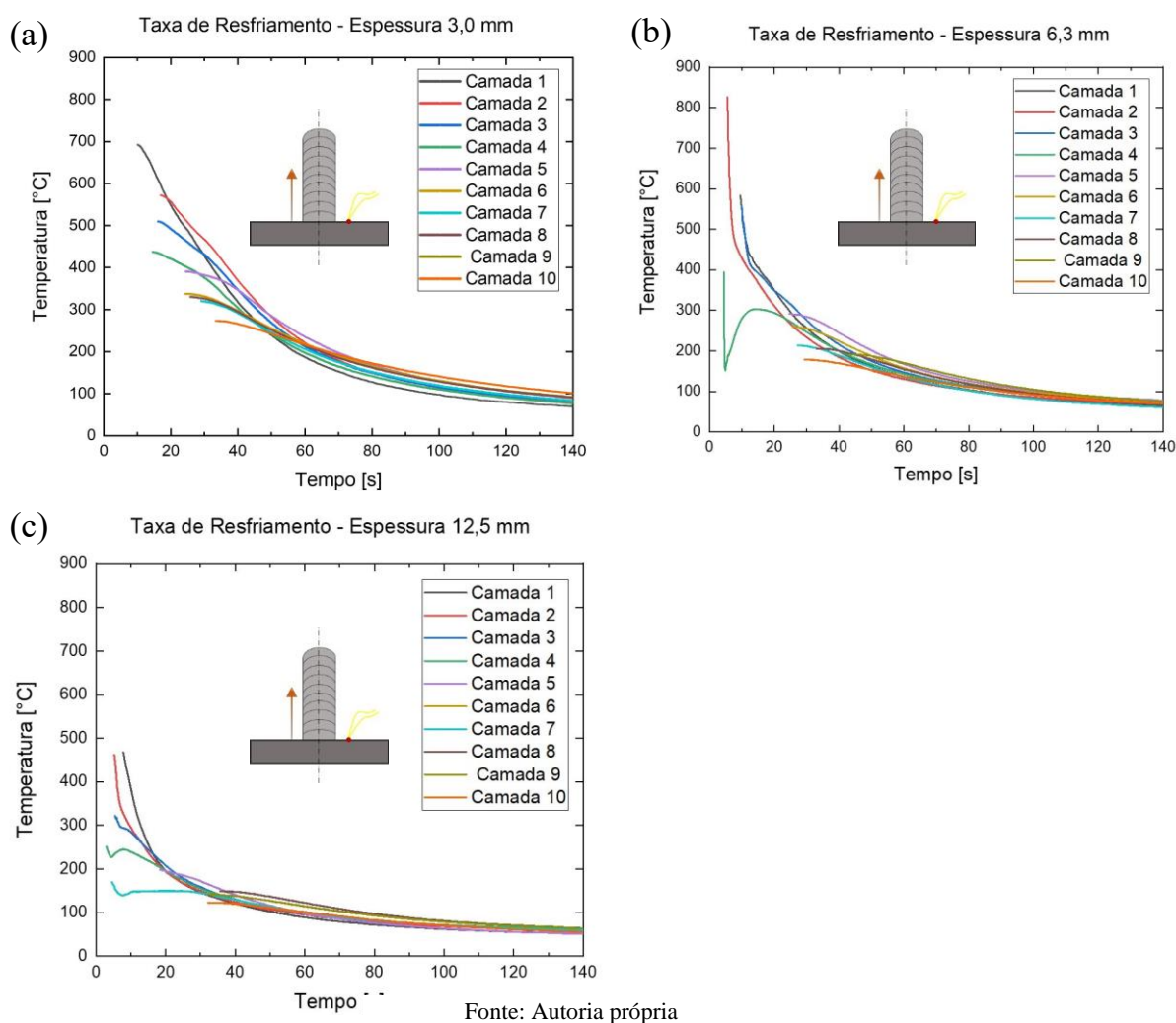
Na Figura 27 (b), é possível notar que as temperaturas de pico capturadas na parte inferior da chapa são menores para as chapas de espessura 6,3 mm e 12,5 mm, visto que a barreira física, tida pela própria espessura da chapa, proporciona uma transferência de calor mais branda. Já os valores de pico, capturados pelo termopar inferior da chapa de 3 mm, mostram temperaturas ligeiramente próximas das capturadas na face superior da mesma; novamente, aqui, efeito ocasionado pela espessura e a esta em especial por ser a chapa de menor espessura.

Percebe-se que a partir da 6ª camada existe pouca variação na temperatura de pico nas três espessuras dos substratos. Observa-se que nas duas maiores espessuras, esse comportamento é mais acentuado, devido ao fato de que a partir desta camada, os modos predominantes de transferência de calor, são condução e convecção da própria parede que assume o comportamento de uma aleta. Já na chapa de 3 mm de espessura seriam necessárias mais deposições de camadas para se evidenciar melhor esse comportamento levando a concluir que quanto maior a espessura do substrato, mais rápido é alcançado a estabilidade ou proximidade das temperaturas de pico, visto que o substrato não terá mais influência a partir da 6ª camada de deposição aqui observada.

#### 4.4 Taxa de Resfriamento (Termopar superior)

Na Figura 28, estão representadas as taxas de resfriamento adquiridas na parte superior da chapa obtidas a partir da etapa de resfriamento dos ciclos térmicos medidos.

Figura 28: Gráficos das taxas de resfriamento

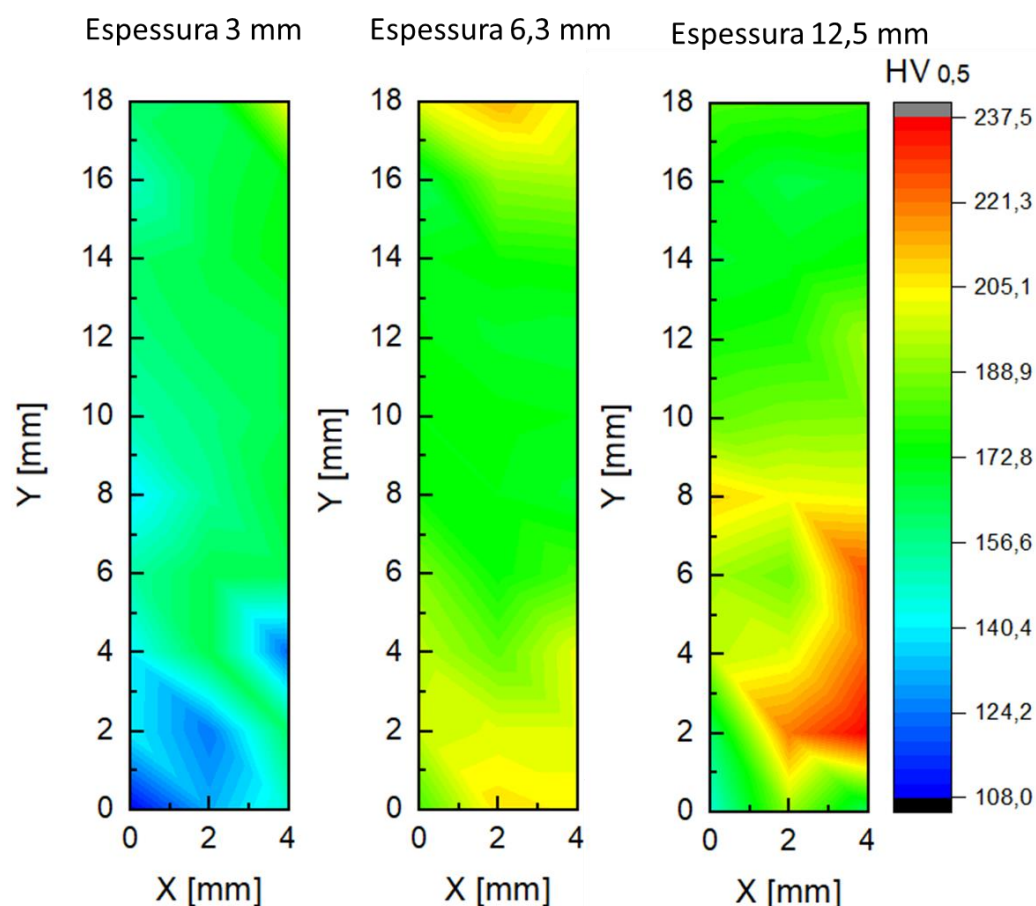


Na Figura 28 (a), para a espessura de 3 mm, nota-se um comportamento do resfriamento mais lento devido ao menor volume de material e a transferência de calor para a vizinhança; para as chapas de maiores espessura, em especial a chapa de 12,5 mm percebe-se, através do comportamento das curvas, uma taxa de resfriamento maior para o meio. Além disso, este comportamento também pode ser percebido através dos valores de temperatura de pico, ou seja, há um decréscimo de temperatura partindo da espessura de 3 mm até a espessura de 12,5 mm.

#### 4.6 Ensaio de microdureza

Foram realizadas as medidas de microdurezas para cada espessura a partir da definição de uma malha obtida com o uso da ferramenta “Matrix” do software de tratamento de dados Origin®, que através do recurso de interpolação das medidas de microdurezas e suas respectivas coordenadas foi gerado o mapa de microdureza como pode ser visto na Figura 29.

Figura 29: Mapas de microdureza para as três espessuras de chapa.



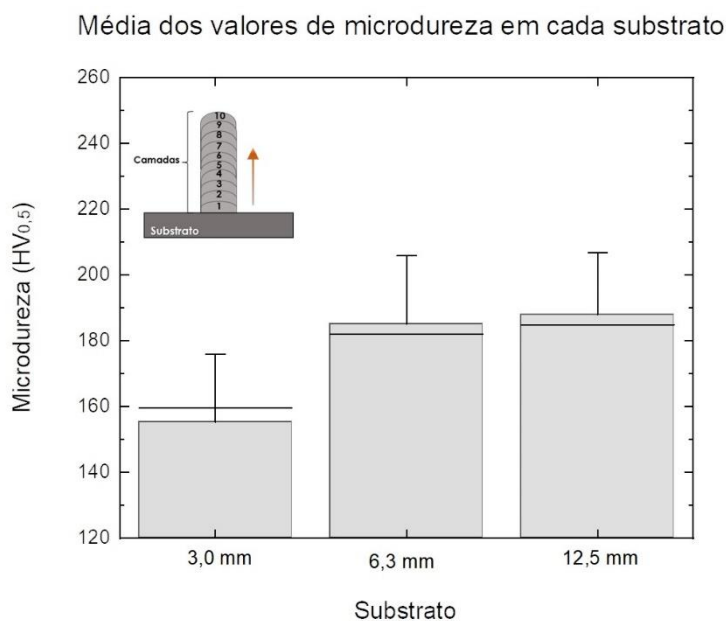
Fonte: Autoria Própria

Pelo mapa de microdureza gerado, nota-se que para a espessura de 3 mm, até em  $Y=4$  mm de altura, que corresponde aos valores de microdureza nas 2 primeiras camadas, são mais baixos comparados à mesma região e número de camadas depositadas nas chapas de maior espessura; isso se deve à influência da taxa de resfriamento, onde para maiores taxas de resfriamento, tem-se maiores valores de dureza, e como discutido, anteriormente, nos resultados obtidos das taxas de resfriamento, tem-se uma taxa de resfriamento maior para as chapas de maior espessura. Logo, nas chapas de maior espessura, os valores de dureza tendem a se

estabilizar com um maior número de deposições de camada, onde finalmente alcança a zona do quase estacionário e pode-se, então, existir uma certa previsibilidade para a dureza.

Na Figura 30, pode-se visualizar o valor da média para a microdureza para cada espessura de substrato, onde para a espessura de 3,0 mm a média do valor microdureza é de 155,15 HV; para a espessura de 6,3 mm a média do valor microdureza é de 185,10 HV e para a espessura de 12,5 mm a média do valor microdureza é de 187,31 HV. Percebe-se aqui, o aumento do valor de microdureza em função do aumento de espessura do substrato.

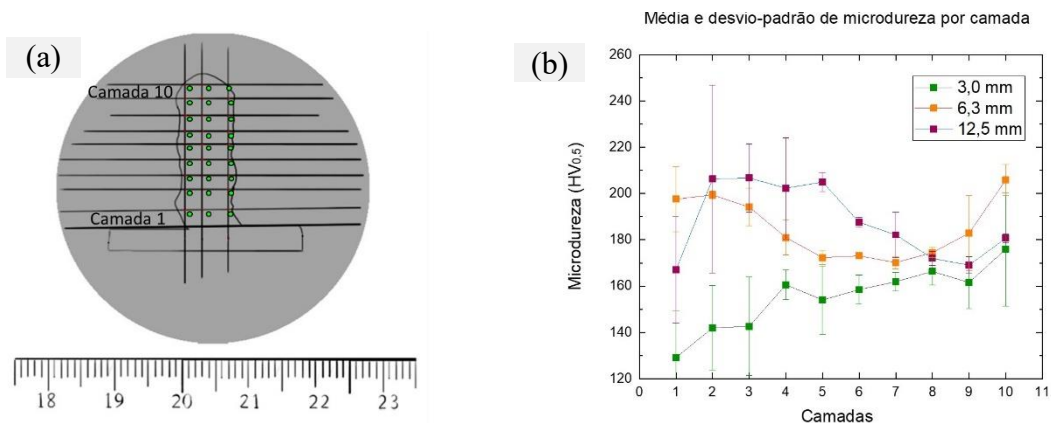
Figura 30: Média dos valores de microdureza por espessura de substrato



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 31, tem-se a representação dos valores de média de microdureza ao longo das camadas depositadas para cada substrato.

Figura 31: (a) Malha para medidas de microdureza; Média com desvio padrão de microdureza de cada camada, por substrato.

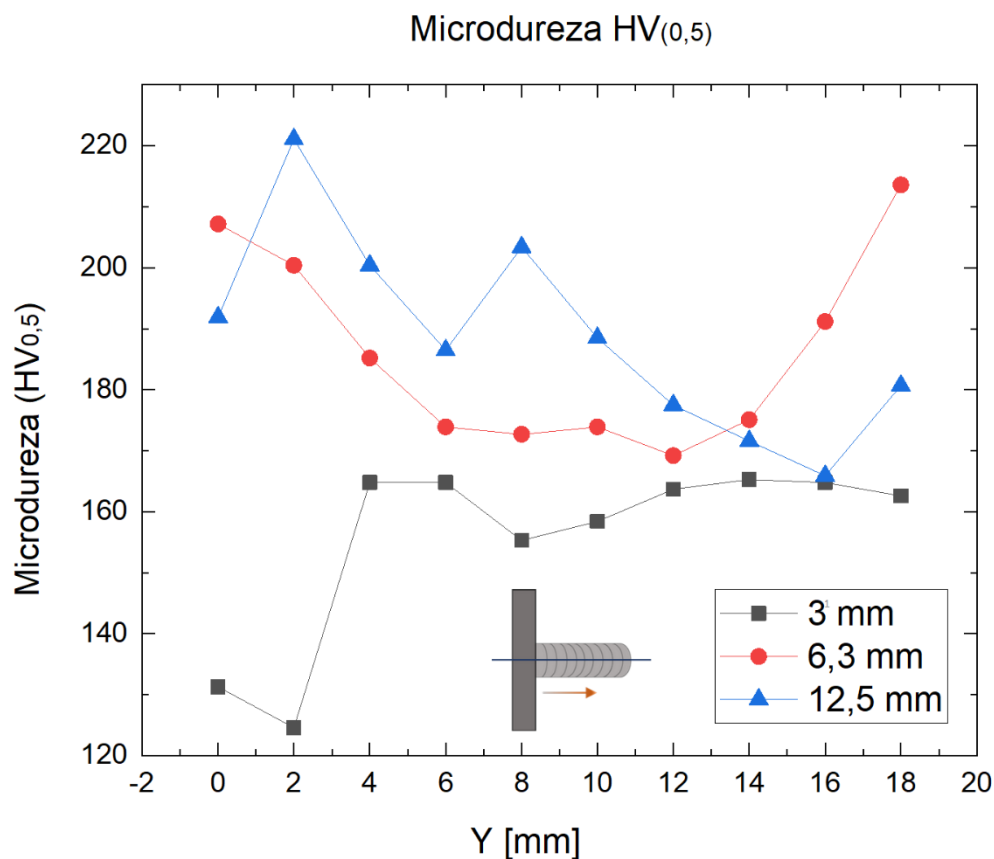


Fonte: Autoria Própria



Ainda em aspectos de microdureza, foi evidenciado o perfil central, como pode-se visualizar na Figura 32, para valores de microdureza medidos, uma vez que estes pontos da linha central estão mais suscetíveis à troca de energia no processo de deposição, impactando diretamente nas taxas de resfriamento e consequentemente nos valores de microdureza.

Figura 32: Curvas dos valores de microdureza para as três espessuras de chapa.



Fonte: Autoria própria

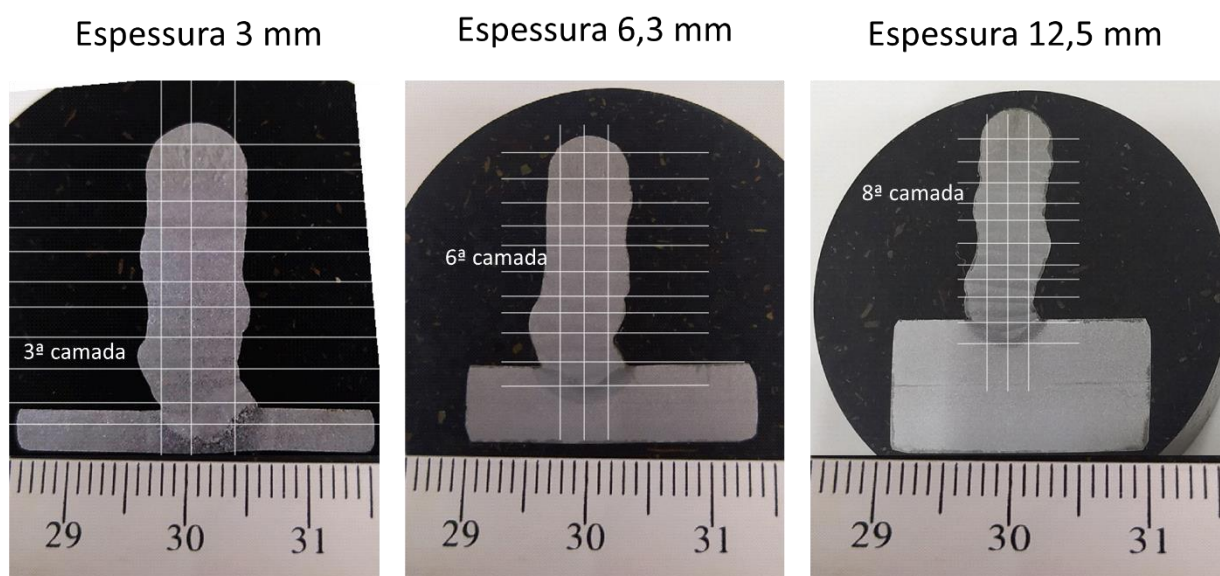
Pela evolução das curvas de microdureza, percebe-se que a espessura de chapa contribui diretamente para os valores dessa propriedade, onde pode-se afirmar que a partir de um certo número de deposições, o substrato não interage tanto com a camada depositada no momento pois o aumento do acúmulo de energia na camada favorece o reaquecimento na deposição póstuma, uma vez que o volume do substrato passa a participar pouco na dissipação do calor em virtude do distanciamento da camada e a base inicial de deposição (substrato), e, então, o calor passa a ser dissipado nas camadas depositadas anteriormente.

Nota-se também uma equiparação dos valores de microdureza a partir de  $Y = 12$  mm que equivale a 6ª camada depositada para ambas as espessuras, reforçando o que foi registrado

e discutido no tópico de taxas de resfriamento por camadas, na Figura 28 (b) e (c), onde a partir da 6ª camada para a espessura de 6,3 mm e a partir da 8ª camada para a espessura de 12,5 mm as taxas de resfriamento diminuem.

Na , pode-se visualizar a sinalização da camada onde se inicia a curva de previsibilidade de microdureza para cada espessura de chapa.

Figura 33: Imagem de macrografia indicando camadas



Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÕES

A partir da metodologia empregada e da discussão de resultados realizada, conclui-se:

- Que a partir da análise de variância realizada para os valores de potência instantânea média, pode-se inferir que para o modo de transferência metálica utilizado pode haver graus de instabilidade no processo, acarretando em mudanças nos valores de potência, uma vez que esta é produto da tensão pela corrente e esta última, por sua vez, altamente suscetível a variações ocasionadas por questões próprias do processo de MADA, como, por exemplo, ajuste contínuo da altura de deposição (DBCP). Levando-se a concluir que o modo de transferência metálica, empregado nas deposições de camadas, pode não ser o mais efetivo para trabalhos em MADA, pois nesse tipo de configuração não é possível controlar os pormenores característicos do processo. Em se tratando de qual espessura de substrato se utilizar para se desenvolver um trabalho em MADA, com base no que foi analisado, recomenda-se o uso de substratos de espessuras intermediárias a grossas, pois para estas espessuras a etapa de definição de parâmetros torna-se menos onerosa e o quesito de distorção pouco notável.
- Como discutido, houve maiores valores de temperatura de pico para a chapa de espessura mais fina, por proporcionar uma dissipação lenta de calor em virtude da interação do aporte térmico com seu volume, favorecendo um reaquecimento rápido nas camadas seguintes, mantendo, assim, valores acentuados para temperaturas de pico. O contrário também é válido, temperaturas de pico notavelmente menores em chapas de espessura mais grossa devido à forma como a energia é absorvida pelo seu volume, no momento da abertura do arco até o término da deposição. O que se leva a concluir que para este quesito, para trabalhos em MADA, não se teria preferência em chapa mais grossa ou mais fina, pois as temperaturas de pico tendem a diminuir em função do aumento do número de camadas para todas as amostras observadas.
- Foram observadas taxas de resfriamento mais lentas para o substrato de menor espessura, e taxas de crescimento gradual para o resfriamento em função do aumento da espessura do substrato. Portanto, faz-se recomendação do uso de chapa fina a espessuras intermediárias, visto que estas proporcionarão uma taxa de resfriamento mais lenta, trazendo o cenário da entrega de valores mais elevados de dureza com um maior número de deposições.

- Para trabalhos em MADA onde deseja-se o volume efetivo, ou seja, aquele que é depositado e que pode ser utilizado para a geometria final da peça, minimizando desperdícios de matéria-prima nas etapas seguintes de fabricação, são desejados menores valores de dureza em camadas mais próximas do substrato. Para a chapa de 3,00 mm de espessura, esse comportamento é visualizado logo nas primeiras deposições, o que se leva a inferir de que seriam necessárias mais camadas de deposição para maiores quantitativos dos valores dureza. Já nas chapas de maior espessura o comportamento de regime transiente é observado logo nas primeiras camadas depositadas, com indicação de forte influência do substrato nos valores de dureza. O alcance do regime estacionário para os valores de dureza torna-se mais estáveis a partir da 3<sup>a</sup> camada para o substrato de 3,00 mm, 6<sup>a</sup> camada para o substrato de 6,35 mm e 8<sup>a</sup> camada para o substrato de 12,5 mm de espessura, onde as camadas já não recebem tanta influência do substrato. Então, para determinados projetos, usando MADA, seria recomendado o uso de chapas mais finas na fabricação de estruturas que não necessitam de tantas deposições, e de chapas mais grossas para projetos onde é necessário um alto número de deposição de camadas.

## REFERÊNCIAS

LU, X. et al. Substrate design to minimize residual stresses in Directed Energy Deposition AM processes. **Materials and Design**, v. 202, 1 abr. 2021.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F., Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro, *Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté*, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.

ESAB, Apostila de soldagem MIG/MAG. 2005

M. Gierth, P. Henckell, Y. Ali, J. Scholl, and J. P. Bergmann, “Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of aluminum alloy AlMg5Mn with energy-reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW),” *Materials*, vol. 13, no. 12, pp. 1–22, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122671

Hackenhaar, W., Mazzaferro, J.A.E., Mazzaferro, C.C.P. et al. Effects of different WAAM current deposition modes on the mechanical properties of AISI H13 tool steel. *Weld World* 66, 2259–2269 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01342-0>

MARTINA, F; WILLIAMS, S. Wire+Arc Additive Manufacturing vs. Traditional Machining From Solid: A Cost Comparison, Cranfield University, 2015, 27p.

JOÃO DA SILVA, L.; SOUZA, D. M.; BEZERRA DE ARAÚJO, D. Gerenciamento Térmico via Resfriamento Ativo por Quase-imersão Aplicado à Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco (Thermal Management by Near-immersion Active Cooling Approach for WAAM). Ubercândia-MG: [s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329626136>

YANG, Dongqing; WANG, Gang; ZHANG, Guangjun. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 244, p. 215-224, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>.

ANDRADE, E. M. COMPARACÃO MÉTODOS PARA CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL / MATEMÁTICA, EM PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO. Cusco: [s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266318676>.

Da Silva, L.J.; Ferraresi, H.N.; Araújo, D.B.; Reis, R.P.; Scotti, A. Effect of Thermal Management Approaches on Geometry and Productivity of Thin-Walled Structures of ER 5356 Built by Wire + Arc Additive Manufacturing. *Coatings* 2021, 11, 1141. <https://doi.org/10.3390/coatings11091141>

DE ARRUDA, N. F. et al. Influence of the heat flow transient state on the microstructure and microhardness of ASTM-A36 and SAE-1045 steels welded by GMAW process. *Soldagem e Inspecao*, v. 24, 2019.

KALASHNIKOV, K. N. et al. A substrate material and thickness influence on the 3D-printing of Ti–6Al–4V components via wire-feed electron beam additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 16, p. 840–852, 1 jan. 2022.

CORBIN, David J.; NASSAR, Abdalla R.; REUTZEL, Edward W.; BEESE, Allison M.; MICHALERIS, Pan. Effect of Substrate Thickness and Preheating on the Distortion of Laser Deposited Ti–6Al–4V. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, [s. l.], v. 140, n. 6, p. 12-23, 23 mar. 2018. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4038890>.

MARSHALL, G. J. et al. Effect of substrate thickness on micro-hardness of direct laser deposited Ti-6Al-4V parts. 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. *Anais...American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.*,

XIONG, Jun; YIN, Ziqiu; ZHANG, Weihua. Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 87, n. 1-4, p.579-586, 27 fev. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8543-2>.

RAJEEV, G.P.; RAHUL, M.R.; KAMARAJ, M.; BAKSHI, Srinivasa R.. Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited Stellite 6 alloy. *Materialia*, [S.L.], v. 12, n. 100724, p. 19-38, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100724>.

HENCKELL, Philipp; GIERTH, Maximilian; ALI, Yarop; REIMANN, Jan; BERGMANN, Jean Pierre. Reduction of Energy Input in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Materials*, [S.L.], v. 13, n. 11, p. 2491, 29 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13112491>.

HU, J.; TSAI, H.L.. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: the arc. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, [S.L.], v. 50, n. 5-6, p. 833-846, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025>.

XIONG, Jun; LEI, Yangyang; LI, Rong. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. *Applied Thermal Engineering*, [S.L.], v. 126, p. 43-52, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168>.

KOZAMERNIK, Nejc; BRAČUN, Drago; KLOBČAR, Damjan. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [S.L.], v. 110, n. 7-8, p. 1955-1968, 31 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>.

# APÊNDICE A

Histograma e teste de normalidade Anderson-Darling das 10 camadas da chapa de 3 mm:

