



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO 2**

# **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E CURVATURA NA DEPOSIÇÃO DE PEÇAS OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT**

**Ruan Diego Amorim de Melo Vieira**

**Brasília-DF, 20 de dezembro de 2023.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

# **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E CURVATURA NA DEPOSIÇÃO DE PEÇAS OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT**

POR,

**Ruan Diego Amorim de Melo Vieira**

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

### **Banca Examinadora**

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

Profa. Olga Liskevych, DEM/CT-UFES (*Coorientadora*)

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

Profa. Aline Souza de Paula, ENM/FT-UnB (*Examinadora interna*)

## FICHA CATALOGRÁFICA

Vieira, Ruan Diego Amorim de Melo

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E CURVATURA NA DEPOSIÇÃO DE PEÇAS OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT / Ruan Diego Amorim de Melo Vieira; orientador Maksym Ziberov; co-orientador Olga Liskevych. -- Brasília, 2023.

68 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Mecânica) -- Universidade de Brasília, 2023.

1. Manufatura Aditiva. 2. MADA. 3. CMT. 4. ER70S-6. 5. Peças Inclinadas. I. Ziberov, Maksym, orient. II. Liskevych, Olga, co-orient.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, R.D.A de M. (2023). *ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E CURVATURA NA DEPOSIÇÃO DE PEÇAS OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 68p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: RUAN DIEGO AMORIM DE MELO VIEIRA

TÍTULO: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E CURVATURA NA DEPOSIÇÃO DE PEÇAS OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA CMT.

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Ruan Diego Amorim de Melo Vieira  
Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) – FT  
Universidade de Brasília (UnB)  
Campus Darcy Ribeiro  
CEP 70919-970 – Brasília – DF – Brasil

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ivany e Wilson, por sempre me apoiarem e acreditarem nos meus sonhos, e à minha família e amigos, por estarem presentes e servirem como uma rede de apoio na vida e na graduação.*

*Ruan Diego Amorim de Melo Vieira*

## **Agradecimentos**

*Agradeço a Deus e à minha família por todas as oportunidades e incentivos. Expresso também minha gratidão ao meu orientador, Prof. Maksym Ziberov, e à coorientadora, Profa. Olga Liskevych, pela paciência, apoio e todo aprendizado ao longo da realização deste trabalho. Agradeço ao mestre André Luiz Brito Novelino, ao técnico Rafael Silva Barros e ao técnico Ivan Banho de Andrade Reis pelo auxílio prestado. À Universidade de Brasília, professores e servidores do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia, por toda dedicação, ensinamento e pelos recursos disponibilizados para a realização deste trabalho. Aos meus amigos da Engenharia, agradeço a ajuda e companhia ao longo do curso. À Profa. Déborah de Oliveira e à Profa. Aline Souza de Paula, minha sincera gratidão pela participação na banca examinadora, assim como pelas sugestões construtivas que contribuíram para o aprimoramento do trabalho. Agradeço ainda, ao CNPq processo 402730/2023-2. Minha gratidão a todos. Vocês foram a base para esta conquista.*

*Ruan Diego Amorim de Melo Vieira*

---

## RESUMO

A manufatura aditiva (MA) é uma técnica que permite a construção de estruturas pela adição sucessiva de material em camadas. Esse material pode se apresentar em forma de pó, arame ou líquido, sendo processado por diversas tecnologias. No contexto da MA de metais, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) destaca-se como uma técnica promissora para a produção de peças complexas e volumosas. A MADA tem a capacidade de fabricar peças com inclinação, dispensando a necessidade de suportes adicionais. Contudo, a qualidade superficial e o ângulo de inclinação podem variar de acordo com a estratégia adotada. Este estudo visa analisar a inclinação e curvatura na deposição de peças planas e curvas, utilizando o arame ER70S-6 de 1,20 mm de diâmetro e o processo *Cold Metal Transfer* (CMT) convencional. Foram depositadas peças planas inclinadas com 10 camadas e 50 mm de comprimento. Diferentes parâmetros, como velocidade de deslocamento da tocha ( $V_d$ ), velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ) e avanço da tocha, foram ajustados para investigar o efeito na inclinação. Observou-se que, com os parâmetros utilizados, a largura da camada não era adequada para avanços maiores, sendo recomendado um avanço de 0,50 mm. Ao aumentar  $V_a$  de 1,40 m/min para 1,70 m/min com  $V_d$  de 6,0 mm/s, houve um incremento de 25,50% na entrada de calor e uma redução de 12,0% no ângulo de inclinação. Com  $V_d$  de 8,0 mm/s, o aumento foi de 23,70% na entrada de calor e a redução no ângulo de inclinação foi de 39,60%. A influência da  $V_a$  na inclinação ocorre devido à diminuição da viscosidade da poça de fusão, resultando em peças com menor inclinação. Com base nos melhores resultados obtidos, foi realizada a deposição de uma peça plana (71 camadas) e duas curvas (45 e 57 camadas) com 150 mm de comprimento. Observou-se que, com o aumento da quantidade de camadas na geometria plana, a distância bico de contato peça (DBCP) cresceu ao longo do processo, atingindo 39,20 mm na septuagésima primeira camada, resultando na ocorrência de *humping* e interrupção da deposição. Analisando o efeito da geometria, a peça curva apresentou um acabamento superior em uma maior quantidade de camadas em comparação com a peça plana, devido à melhor estabilidade do arco e fluidez da poça de fusão. Ao alterar a geometria (cone) e a estratégia de deposição (deposição por blocos), observou-se que a altura do cone com melhor qualidade superficial é 39,40% maior do que a peça curva e 54,55% maior do que a peça plana. Entretanto, a estratégia de deposição por blocos resultou em uma área efetiva 14,10% menor e uma largura efetiva 52,01% menor em comparação com a peça plana depositada com arco contínuo. Isso ocorre devido à menor largura na intercamada dos blocos causada pelo resfriamento; no entanto, a estratégia de deposição por blocos é eficaz na fabricação de peças com maior quantidade de camadas para solucionar o problema da DBCP.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva, MADA, CMT, ER70S-6, Peças Inclinadas.

---

## ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is a technique that allows the construction of structures by successively adding material in layers. This material can be in the form of powder, wire or liquid, and is processed using different technologies. In the context of metal AM, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) stands out as a promising technique for the production of complex and bulky parts. WAAM has the ability to manufacture tilted parts, eliminating the need for additional supports. However, the surface quality and inclination angle may vary according to the strategy adopted. This study aims to analyze the inclination and curvature in the deposition of flat and curved parts, using ER70S-6 wire with a diameter of 1.20 mm and the conventional Cold Metal Transfer (CMT) process. Flat inclined pieces with 10 layers and 50 mm in length were deposited. Different parameters, such as Torch Travel Speed (TTS), Wire Feed Speed (WFS), and torch offset, were adjusted to investigate their effect on the slope. It was observed that with the parameters used, the layer width was not suitable for larger offset, and an offset of 0.50 mm was recommended. Increasing WFS from 1.40 m/min to 1.70 m/min with TTS of 6.0 mm/s resulted in a 25.50% increase in heat input and a 12.0% reduction in the slope angle. With TTS of 8.0 mm/s, there was a 23.70% increase in heat input, and the reduction in the slope angle was 39.60%. The influence of WFS on the slope occurs due to the decrease in the viscosity of the molten pool, resulting in parts with a lower slope. Based on the best results obtained, the deposition of a flat part (71 layers) and two curved parts (45 and 57 layers) with a length of 150 mm was carried out. It was observed that, with the increase in the number of layers in the flat geometry, the contact tip-to-work distance (CTWD) grew throughout the process, reaching 39.20 mm on the seventy-first layer, resulting in the occurrence of humping and interruption of deposition. Analyzing the effect of geometry, the curved part showed a superior finish over a greater number of layers compared to the flat part, due to the better stability of the arc and fluidity of the molten pool. By changing the geometry (cone) and deposition strategy (block deposition), it was observed that the height of the cone with better surface quality is 39.40% greater than the curved part and 54.55% greater than the flat part. However, the block deposition strategy resulted in an effective area 14.10% smaller and an effective width 52.01% smaller compared to the flat part deposited with continuous arc. This is due to the narrower interlayer width of the blocks caused by cooling; however, the block deposition strategy is effective in manufacturing parts with a greater number of layers to address the CTWD issue.

**Keywords:** Additive Manufacturing, WAAM, CMT, ER70S-6, Inclined Parts.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	4
1.2	JUSTIFICATIVA	4
1.3	OBJETIVO	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA	5
2.1.1	MANUFATURA ADITIVA DE POLÍMEROS/CERÂMICA	7
2.1.2	MANUFATURA ADITIVA DE METAIS	9
2.2	MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO PARA MANUFATURA ADITIVA	10
2.2.1	MANUFATURA ADITIVA DE POLÍMEROS/CERÂMICA	13
2.2.2	MANUFATURA ADITIVA DE METAIS	15
2.3	MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO	17
2.3.1	PROCESSOS DE SOLDAGEM	18
2.3.1.1	SOLDAGEM MIG/MAG	18
2.3.1.1.1	SOLDAGEM MIG/MAG PULSADO	19
2.3.1.1.2	SOLDAGEM CMT	20
2.3.2	PROCESSO CMT NA MANUFATURA ADITIVA	22
2.4	ESTRATÉGIAS DE DEPOSIÇÃO PARA MANUFATURA ADITIVA	24
2.4.1	MANUFATURA ADITIVA DE METAIS	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
3.1	EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS	29
3.2	ETAPAS EXPERIMENTAIS	30
3.3	METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO PRÉ-TESTE E TESTE	31
3.4	METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DO CONE	33
3.5	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	34
3.6	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>36</b>
4.1	ANÁLISE DAS DEPOSIÇÕES PRÉ-TESTE	36
4.2	ANÁLISE DAS DEPOSIÇÕES TESTE	41
4.2.1	PAREDE INCLINADA PLANA	41
4.2.2	PAREDE INCLINADA CURVA	43
4.3	ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DO CONE	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>49</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	50
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE A - CÓDIGO G</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES DO ARAME BOHLER ER70S-6</b>	<b>68</b>



# LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Vantagens e desafios da MA (BANDYOPADHYAY e BOSE, 2016). .....	1
<b>Figura 2</b> Etapas de fabricação de uma peça por MA (adaptado de GIBSON et al., 2021). 2	2
<b>Figura 3</b> Equipamento de impressão 3D em missões espaciais: (a) ZLM e (b) Ogiva impressa com um metro de diâmetro (MUELLER et al., 2018). .....	2
<b>Figura 4</b> Comparação da fabricação convencional com a MA (custo em US\$, equivalente a 2020, créditos da NASA) (adaptado de KERSTENS; CERVONE; GRADL, 2021). .....	3
<b>Figura 5</b> Canal subsuperficial formado pela ação do arco no processo TIG Pulsado (adaptado de TOKAR, 2015). .....	3
<b>Figura 6</b> Processos aplicados em etapa única para metais, cerâmicas e polímeros (adaptado de ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2018)). .....	5
<b>Figura 7</b> Modelo de um coelho fabricado pelo RoboFDM (esquerda) e modelo fabricado por FDM convencional (direita) (WU et al., 2017). .....	7
<b>Figura 8</b> Peças fabricadas por SLS: (a) Fivela de duas partes (ESPERA JR. et al., 2019), (b) corrente circular (ESPERA JR. et al., 2019) e (c) duto utilizado para aumentar o desempenho do automóvel (SARVANKAR e YEWALE, 2019). .....	8
<b>Figura 9</b> Peças fabricadas com SiO <sub>2</sub> via SLA: (a) scaffold poroso; (b) cristais fotônicos; (c) pá de turbina oca; (d) impulsor; (e)–(f): moldes de microfusão (CHEN et al., 2019). .....	9
<b>Figura 10</b> (a) Primeira ponte de metal impressa em 3D, (b) teste físico e (c) simulação numérica (adaptado de GARDNER et al., 2020). .....	10
<b>Figura 11</b> Técnicas e processos de MA (adaptado de RAJAN et al., 2022). .....	10
<b>Figura 12</b> Etapas do processo de impressão 3D por: (a) BJ (adaptado de WANG; MÜLLERTZ; RANTANEN, 2022), (b) DED (adaptado de XIONG et al., 2017), (c) PBF (adaptado de DEBROY et al., 2018), (d) SL (adaptado de TOPMAXTECH, 2015), (e) MJ (adaptado de HUBS, 2022), (f) ME (adaptado de SUWANPREECHA e MANONUKUL, 2022) e (g) VP (adaptado de WALLACE et al., 2014). .....	12
<b>Figura 13</b> Peças fabricadas por: (a) BJ (SCULPTEO, 2022), (b) DED (FITNIK, 2022), (c) PBF (SCULPTEO, 2022), (d) SL, créditos da Impossible Objects (ENGINEERING PRODUCT DESIGN, 2022), (e) MJ (3D SYSTEMS, 2017), (f) ME (SCULPTEO, 2022) e (g) VP (FORMLABS, 2020). .....	13
<b>Figura 14</b> Comparação da resolução de impressão e volume de construção de diferentes técnicas de MA, dados adotados por empresas de MA (adaptado de SUN et al., 2023). .....	15
<b>Figura 15</b> Esquema do MF <sup>3</sup> para Ti-6Al-4V (adaptado de SINGH et al., 2020). .....	16
<b>Figura 16</b> Dobradiça do Airbus A320 (TOMLIN e MEYER, 2011). .....	17
<b>Figura 17</b> Câmara de combustão fabricada por SLM, a varredura de luz vista na tela do computador, ajudou a verificar se a peça foi construída conforme projetada, créditos da NASA/MSFC/Emmett Given (adaptado de HARBAUGH, 2015). .....	17
<b>Figura 18</b> Diagrama do MIG/MAG pulsado (BAUM e FICHTER, 1999). .....	19
<b>Figura 19</b> Aparência do cordão de solda para diferentes formas de onda de corrente (#1 sem corrente média, #2 I <sub>m</sub> = 140 A e #3 I <sub>m</sub> = 250 A) (adaptado de XU et al., 2022). .....	20
<b>Figura 20</b> Esquema da soldagem CMT (adaptado de KUMARAN et al., 2020). .....	20
<b>Figura 21</b> Perfis do cordão e macroestruturas transversais de juntas representativas das amostras 6082/6082 com parâmetros variados (adaptado de ELREFAEY e ROSS, 2015). ...	21
<b>Figura 22</b> FGM fabricado pelo processo CMT convencional (adaptado de CHANDRASEKARAN; HARI; AMIRTHALINGAMC, 2020). .....	22
<b>Figura 23</b> Fotografias dos componentes cilíndricos de aço carbono fabricados (adaptado de NAGASAI; MALARVIZHI; BALASUBRAMANIAN, 2020). .....	23
<b>Figura 24</b> Paredes fabricadas por MADA (LISKEVYCH et al., 2023). .....	23

<b>Figura 25</b> Utilização de suportes (adaptado de JIANG; XU; STRINGER, 2018. ....	24
<b>Figura 26</b> Seções transversais das soldas: (a) Processo MIG/MAG de velocidade normal, (b) hump no processo MIG/MAG de alta velocidade, (c) Rebaixo no processo MIG/MAG de alta velocidade (WU et al., 2017).....	24
<b>Figura 27</b> Mapa de humping proposto da velocidade de deslocamento (TS) em função da posição angular de deposição ( $\theta$ ) (YUAN et al., 2020). ....	25
<b>Figura 28</b> Etapas do processo proposto: (a) Decomposição progressiva de um exemplo em subvolumes com suas próprias direções de construção, (b) agrupamento de subvolumes com estrutura em árvore de profundidade e (c) divisão do modelo ao longo de várias direções de construção (adaptado de DING et al., 2016). ....	25
<b>Figura 29</b> Estratégias de deposição para o estudo de fadiga: (a) Orientação de construção por FDM e (b) direções de deposição (ZIEMIAN et al., 2014). ....	26
<b>Figura 30</b> Resumo dos métodos de geração de caminho das camadas: (a) raster, (b) zigzag, (c) contorno, (d) espiral, (e) contínuo e (f) híbrido (adaptado de DING et al., 2015). ....	26
<b>Figura 31</b> Resultado da geometria das camadas depositadas com variações de parâmetros e os três cenários propostos (adaptado de YUAN et al., 2021). ....	27
<b>Figura 32</b> Diagrama esquemático de deposição da peça inclinada, onde $\alpha$ é o ângulo de inclinação, $d$ é a distância de deslocamento e $h_\alpha$ é a altura da camada da parede inclinada (XIONG et al., 2017).....	28
<b>Figura 33</b> Variação do ângulo máximo de inclinação em função da (a) velocidade de alimentação do arame e (b) velocidade de deslocamento da tocha (XIONG et al., 2017). ....	28
<b>Figura 34</b> Estratégia de deposição de paredes inclinadas (KAZANAS et al., 2012). ....	28
<b>Figura 35</b> Robô cartesiano MAXR23-S42-H42-C42 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2021). ....	29
<b>Figura 36</b> Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (FRONIUS, 2020). ....	29
<b>Figura 37</b> Local de realização do experimento: (a) Equipamentos utilizados e (b) substrato onde as deposições foram realizadas.....	30
<b>Figura 38</b> Preparação do experimento: (a) IHM do robô e (b) IHM da fonte RCU5000i. ....	31
<b>Figura 39</b> Esquema da metodologia de deposição: Vistas (a) frontal e (b) lateral. ....	31
<b>Figura 40</b> Vista isométrica do modelo esquemático da metodologia de deposição: Parede inclinada plana com (a) arco contínuo, (b) arco interrompido e (c) parede inclinada curva. ..	32
<b>Figura 41</b> Esquema da metodologia de deposição do cone. ....	33
<b>Figura 42</b> Fluxograma de atividades. ....	34
<b>Figura 43</b> Metodologia proposta para medição da (a) inclinação e (b) curvatura. ....	35
<b>Figura 44</b> Paredes compostas por 10 camadas, cada uma com 50 mm de comprimento e um avanço de 0,5 mm: (a) Vista superior e (b) vista frontal. ....	36
<b>Figura 45</b> Paredes de 10 camadas, com 50 mm de comprimento e avanço de 0,5 mm: (a) Vista superior e (b) vista frontal.....	37
<b>Figura 46</b> Paredes de 10 camadas: Vistas (a) superior e (b) frontal. ....	39
<b>Figura 47</b> Seções transversais das paredes depositadas. ....	40
<b>Figura 48</b> Variação na altura das peças depositadas com: (a) $V_d = 6,0$ mm/s e (b) $V_d = 8,0$ mm/s (Observação: *Deposição com arco interrompido). ....	40
<b>Figura 49</b> Processo parado na septuagésima primeira camada por conta da DBCP. ....	41
<b>Figura 50</b> Parede de 71 camadas e 150 mm de comprimento: (a) Vista lateral, (b) vista isométrica, (c) vista frontal e (d) vista posterior. ....	42
<b>Figura 51</b> Variação na altura da peça depositada com $V_d$ de 8,0 mm/s. ....	42
<b>Figura 52</b> Interrupção do arco após (a) 57 camadas e (b) 45 camadas depositadas. ....	43
<b>Figura 53</b> Paredes curvas inclinadas: Parede 1 vista (a) frontal, (b) lateral e (c) posterior e parede 2 vista (d) frontal, (e) lateral e (f) posterior. ....	44
<b>Figura 54</b> Peça fabricada através da deposição por blocos. ....	46
<b>Figura 55</b> Cone fabricado em 5 blocos (20+20+20+20+16 camadas). ....	48
<b>Figura 56</b> Variação na altura da seção do cone. ....	48

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Normas técnicas relacionadas a MA que estão em vigor (ABNT, 2023).....	6
<b>Tabela 2</b>	Resumo das técnicas de impressão 3D (adaptado de WANG et al., 2017). .....	14
<b>Tabela 3</b>	Características das técnicas de MA (adaptado de LIU et al., 2022). .....	16
<b>Tabela 4</b>	Propriedades do arame ER70S-6 (BOHLER WELDING, 2023).....	30
<b>Tabela 5</b>	Parâmetros médios utilizados na deposição da peça (NOVELINO, 2021). .....	32
<b>Tabela 6</b>	Parâmetros utilizados nas deposições pré-teste e teste. ....	32
<b>Tabela 7</b>	Parâmetros utilizados na deposição do cone.....	33
<b>Tabela 8</b>	Medidas utilizadas na deposição do cone. ....	33
<b>Tabela 9</b>	Parâmetros médios de deposição utilizados na fonte e no robô. ....	36
<b>Tabela 10</b>	Parâmetros médios de deposição utilizados na fonte e no robô. ....	38
<b>Tabela 11</b>	Parâmetros médios de deposição da parede plana. ....	41
<b>Tabela 12</b>	Parâmetros médios de deposição das paredes curvas. ....	43
<b>Tabela 13</b>	Parâmetros médios de deposição do cone.....	45

# LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

## SIGLAS E SÍMBOLOS

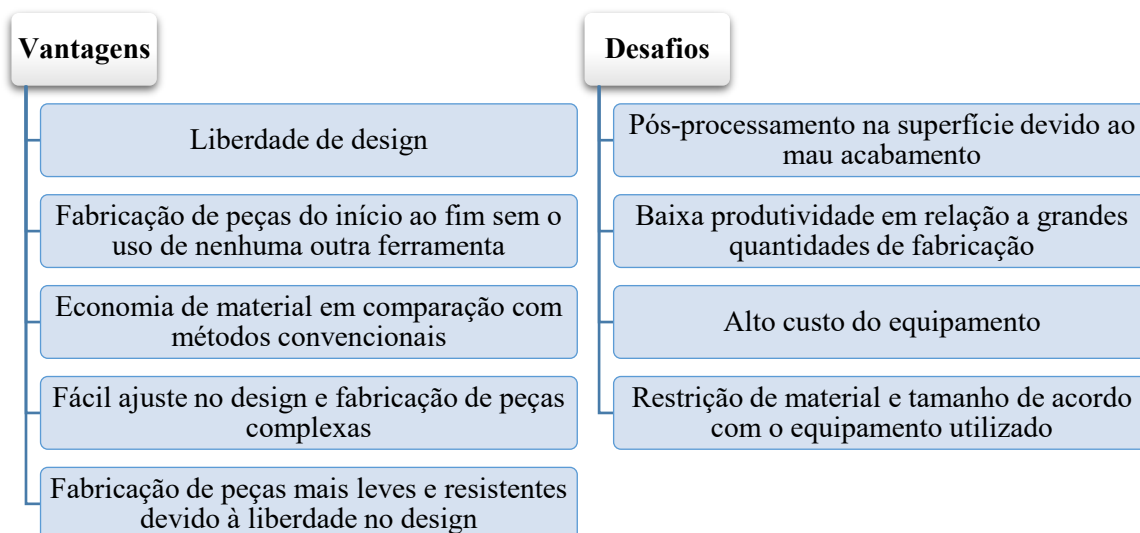
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DBCP	Distância Bico De Contato Peça
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DIW	<i>Direct Ink Writing</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	<i>Electron Beam Welding</i>
ECS	<i>Environmental Control System</i>
EFF	<i>Extrusion Free-Forming</i>
FDM	<i>Fused Decomposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
GMAW-P	<i>Pulsed-Arc Transfer</i>
IJP	<i>Inket Printing</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JM	Johson Matthey
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva Por Deposição A Arco
ME	<i>Material Extrusion</i>
MJ	<i>Material Jetting</i>
NTWD	<i>Nozzle to Work Distance</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PCL	Policaprolactona
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
PVA	<i>Polyvinyl Alcohol</i>
SL	<i>Sheet Lamination</i>
SLA	Estereolitografia
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TPL	<i>Two-Photon Lithography</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>
TS	<i>Torch Speed</i>
UAM	<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>
V <sub>a</sub>	Velocidade de Alimentação do Arame
V <sub>d</sub>	Velocidade de Deslocamento da Tocha
VED	<i>Volumetric Energy Density</i>
VP	<i>Vat Photopolymerization</i>
WFS	<i>Wire Feed Speed</i>

# 1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia que permite a construção de uma estrutura tridimensional (3D) por meio da adição sucessiva de material, camada por camada, a partir de modelos desenvolvidos por CAD (*Computer Aided Design*). Essa técnica possibilita a impressão de polímeros, metais, cerâmicas, vidros, biomateriais e materiais compósitos em diferentes formas e técnicas específicas. Nos processos tradicionais de fabricação, como, por exemplo, na usinagem, ocorre a subtração de material até se obter a forma desejada; no forjamento, a geometria final é definida por meio da deformação plástica do material, e na fundição, a peça final é obtida a partir do metal líquido depositado em um molde. Diferente desses processos, a MA oferece maior customização, o que possibilita a produção de peças complexas em um curto período, reduzindo os custos de fabricação (LIU et al., 2021). Os estudos sobre a MA estão concentrados no desenvolvimento das técnicas de fabricação, na comunicação de dados e nas mudanças de sistemas. Por isso, essa tecnologia trouxe mudanças significativas para as principais indústrias, sendo considerada parte da industrial 4.0 (TOFAIL et al., 2018).

A primeira patente na área de MA de metais foi registrada em 1925 por Ralph Baker, que propôs um método que utiliza o arco elétrico para fabricação de objetos decorativos. Em 1986, Charles W. Hull registrou uma patente do processo de impressão 3D chamado de estereolitografia (SLA). Posteriormente, ele fundou uma empresa chamada 3D Systems, responsável por desenvolver e fabricar impressoras 3D. Atualmente, essa é a empresa mais valiosa do mundo nesse ramo.

Segundo Bandyopadhyay e Bose (2016), essa tecnologia tem se desenvolvido bastante nos últimos anos e será cada vez mais integrada ao nosso dia a dia. No desenvolvimento de protótipos, a MA pode ser uma boa alternativa, permitindo pequenos ajustes no modelo CAD e diversas impressões de baixo custo para testes práticos. Na Figura 1, podem-se observar as vantagens e desafios da MA. De acordo com Raju et al. (2022), nos últimos anos, várias pesquisas foram desenvolvidas, como casas, pontes e peças impressas em 3D. Com o aumento da demanda nessa área, empresas estão investindo em máquinas que oferecem um custo acessível, sendo que esse custo varia de acordo com o processo e o material. Os materiais processados podem ser em pó, líquido ou arame.



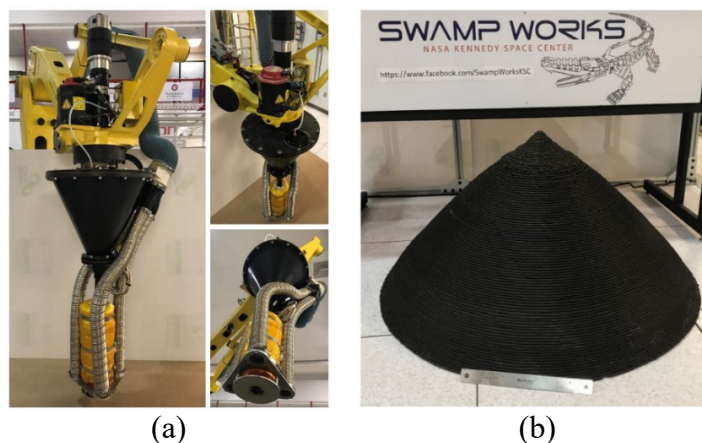
**Figura 1** Vantagens e desafios da MA (BANDYOPADHYAY e BOSE, 2016).

A MA envolve uma série de etapas que vão desde a criação do CAD até o produto físico final. Produtos simples podem ser fabricados de forma rápida e em poucas etapas, enquanto produtos mais complexos exigem uma série de etapas e interações ao longo da fabricação. Para alcançar a forma desejada, a MA é usada apenas para obter a peça bruta devido ao tempo e custo de fabricação. Algumas peças exigem limpeza e pós-processamento, como lixamento, usinagem e pintura, antes de serem utilizadas. A maioria dos processos de MA é submetida a basicamente oito etapas, como pode ser observado na Figura 2 (GIBSON et al., 2021).



**Figura 2** Etapas de fabricação de uma peça por MA (adaptado de GIBSON et al., 2021).

O estudo da fabricação de peças por MA também está presente no espaço, em condições de gravidade reduzida, vácuo, altas temperaturas e radiação. Os desenvolvimentos nessa área estão sendo utilizados, por exemplo, na manutenção de satélites e na montagem de grandes estruturas que não podem ser incluídas nas condições de lançamento (HOFFMANN e ELWANY, 2023). Mueller et al. (2018) desenvolveram um braço robótico que imprime em 3D utilizando como matéria-prima uma mistura de polímero e 70% de recursos *in-situ* (ISRU), ou seja, recursos encontrados em outros astros na missão espacial. Esse equipamento, que pode ser observado na Figura 3a, é conhecido como *Zero launch mass* (ZLM) e tem como objetivo cumprir a missão de reduzir o peso no lançamento para zero, já que a maioria dos materiais precisam ser ISRU e uma pequena quantidade derivada de componentes que já estão voando na missão, como lixo. Através dos resultados dos testes, os autores concluíram que essa tecnologia pode fornecer novas opções para construção de infraestrutura no espaço. Como pode-se observar na Figura 3b, uma ogiva de um metro de diâmetro foi impressa sem a utilização de suportes, demonstrando a possibilidade de impressões de estruturas com saliência.



**Figura 3** Equipamento de impressão 3D em missões espaciais: (a) ZLM e (b) Ogiva impressa com um metro de diâmetro (MUELLER et al., 2018).

Na indústria aeroespacial, a MA oferece liberdade no projeto e vantagens na fabricação de peças com geometria complexa. Isso resulta em melhorias no desempenho na integração de vários componentes em um único sistema, redução de peso e de custos devido à otimização na distribuição e quantidade de material utilizado, mantendo os requisitos de resistência e redução nos modos de falha. Também é possível reduzir o *lead time*, devido à redução nas etapas e ferramentas utilizadas. Este setor dependente de estruturas de tarugo que são usinadas; esses materiais são certificados quanto à

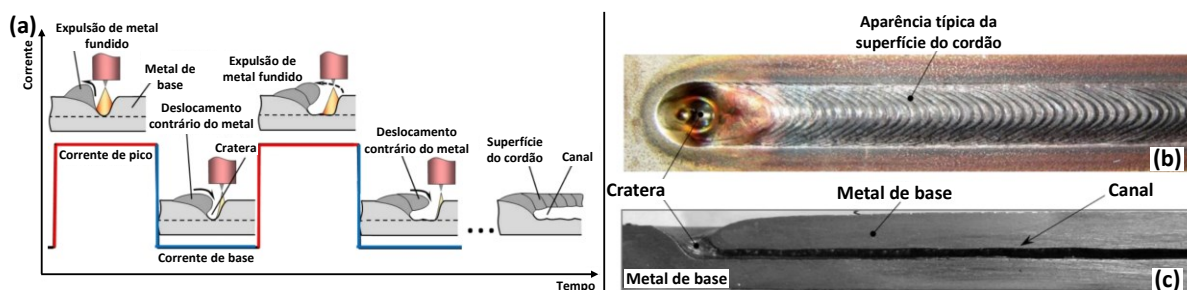
porosidade e microestrutura, mas possuem um alto custo agregado na fabricação e prazos de produção. A quantidade de cavaco gerada é reciclada ou processada, adicionando custos ao processo. A MA reduz esse problema, economizando na quantidade de material necessário e no custo (BLAKEY-MILNER et al., 2021).

Além disso, é possível obter um melhor desempenho por meio da otimização mecânica e térmica de peças que anteriormente não eram possíveis de fabricar, como, por exemplo, canais de resfriamento interno em câmaras de combustão de motores de foguete. À medida que essa tecnologia evolui, é possível obter economia em relação a custo e tempo de fabricação. Um exemplo disso pode ser visto na Figura 4, onde uma câmara composta por duas peças soldadas é substituída por uma única peça (KERSTENS; CERVONE; GRADL, 2021).



**Figura 4** Comparação da fabricação convencional com a MA (custo em US\$, equivalente a 2020, créditos da NASA) (adaptado de KERSTENS; CERVONE; GRADL, 2021).

Os canais internos são uma solução para que as peças possam ser aquecidas ou resfriadas devido às variações de temperatura que precisam ser compensadas para garantir a operação. Tokar (2015) realizou um estudo sobre a formação de canais subsuperficiais de resfriamento/aquecimento em peças metálicas pela ação do arco voltaico, que teve sua patente registrada em 2014 por Ponomarov e Reis (2014). A formação do canal pelo processo *Tungsten Inert Gas* (TIG) pulsado, como pode ser observado na Figura 5a, ocorre através da expulsão do metal fundido. Durante o pulso (corrente elevada), há maior fusão do metal de base, e devido à maior pressão do arco, ocorre a expulsão do metal fundido da região dianteira da poça, que se desloca para região traseira. Como resultado, surge uma cratera na região dianteira da poça. Na corrente de base, a pressão do arco diminui, ocorrendo o deslocamento do metal para a região da cratera. Nesse caminho de volta, as camadas inferiores da poça se solidificam antes das camadas superiores, deixando um canal subsuperficial no fundo, que pode ser visualizado na Figura 5b e Figura 5c, mostrando a aparência da superfície do cordão e a seção longitudinal. Essa técnica é bastante promissora devido à formação de canais longos com diâmetro razoável em diferentes trajetórias.



**Figura 5** Canal subsuperficial formado pela ação do arco no processo TIG Pulsado (adaptado de TOKAR, 2015).



## 1.1 MOTIVAÇÃO

Conforme mencionado na introdução, a MA possui aplicações em diversas áreas da indústria, principalmente no setor aeroespacial. A primeira patente na área de MA de metais foi registrada em 1925 por Ralph Baker, tornando-a uma técnica recente (registrada) na área de metais que está em constante evolução, com várias pesquisas sendo desenvolvidas ao longo dos anos. As empresas e instituições de ensino estão trabalhando no desenvolvimento de tecnologias que atendem a essa tendência de mercado. Por isso, este trabalho possui as seguintes motivações:

- Na área de metais é uma técnica que está em constante evolução, e várias pesquisas sendo desenvolvidas ao longo dos anos;
- A MADA tornou-se um processo promissor com a utilização de diversas matérias-primas. No entanto, representa um desafio na fabricação de camadas com alta qualidade superficial, podendo variar dependendo dos parâmetros do processo, os quais podem impactar na qualidade da microestrutura e do acabamento;
- Contribuir com o conhecimento científico das estratégias de deposição de peças inclinadas fabricadas por MADA, comparando-as com outras técnicas que utilizam diferentes materiais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A MA é uma técnica promissora na fabricação de grandes componentes que necessitam de materiais de alto custo, como mencionado na introdução. Esse processo permite a produção de componentes funcionais com boa precisão geométrica, acabamento superficial e propriedades mecânicas que atendem aos requisitos exigidos pelo mercado.

A MA de metais, que utiliza a alimentação de arame como matéria-prima, envolve entrada excessiva de calor e alta taxa de deposição, gerando tensões residuais e distorções na peça fabricada. Portanto, esses fatores são mais bem compreendidos por meio do estudo da influência da velocidade de alimentação do arame, velocidade de deslocamento da tocha, tipo de arco (contínuo ou interrompido), estratégia de deposição (bidirecional ou unidirecional), padrão de deslocamento e outros parâmetros. Além disso, o acabamento superficial e a precisão limitam essa técnica, sendo necessário o uso de pós processamento.

Portanto, os processos MADA, têm um grande potencial e diversas vantagens em comparação com outros processos de MA, como o curto tempo de fabricação de peças, baixo desperdício e baixo consumo de energia. Isso torna esse processo um diferencial, principalmente nas indústrias automotiva e aeroespacial, podendo dominar esse mercado em breve. Essa técnica promissora foi explorada para ligas metálicas, como alumínio e aço, mas deve ser explorado para outros materiais mais avançados (SHAH et al., 2023).

## 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar a deposição de peças planas e curvas que possuem um ângulo de inclinação, fabricadas com o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, por meio da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, utilizando o processo CMT convencional. Tendo como finalidade:

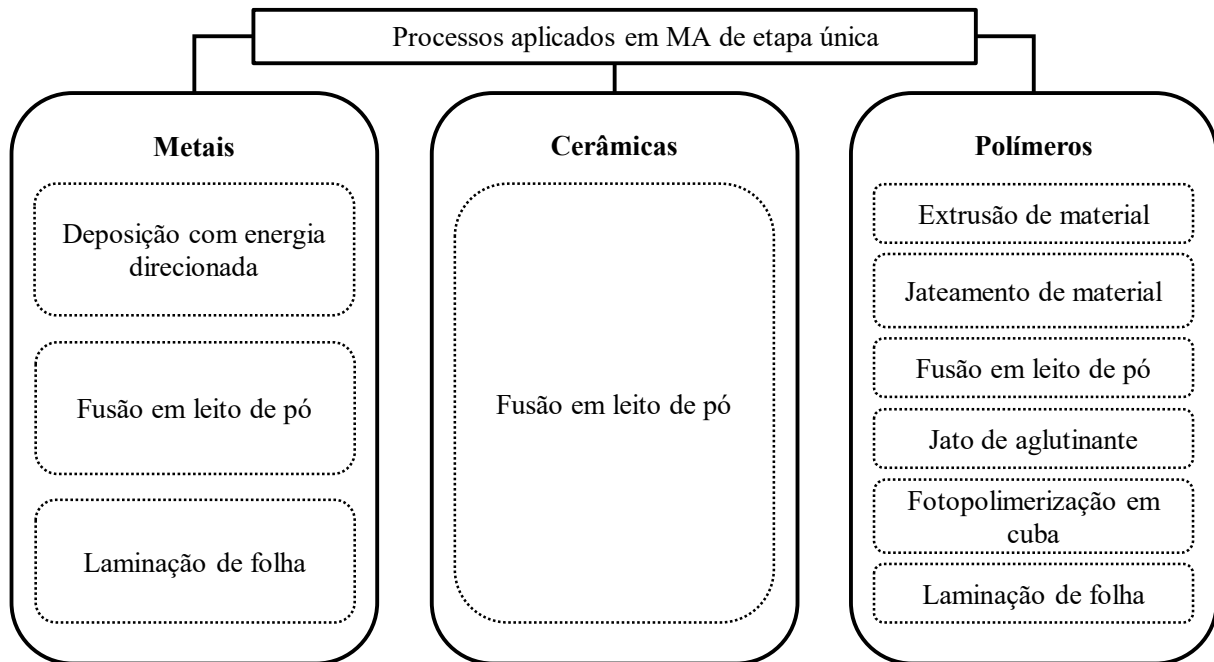
- Analisar as características geométricas de cada peça, como altura, largura, ângulo de inclinação, curvatura e qualidade superficial;
- Verificar a influência da velocidade de alimentação do arame, velocidade de deslocamento da tocha, tipo de arco (contínuo e interrompido) e avanço da tocha na geometria;
- Analisar a influência da Distância Bico de Contato Peça (DBCP) no aporte térmico e na qualidade superficial;
- Analisar o efeito do aporte térmico em peças depositadas com arco contínuo, interrompido e deposição por blocos.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2018) da *American Society Testing and Materials*, os processos de MA se enquadram em sete categorias: Jato de Aglutinante (BJ), Fusão em Leito de Pó (PBF), Laminação de Folha (SL), Deposição com Energia Direcionada (DED), Extrusão do Material (ME), Jateamento de Material (MJ) e Fotopolimerização em Cuba (VP). Esses processos para cerâmicas, metais e polímeros são categorizados em processos de uma única etapa (*single-step*) e de várias etapas (*multi-step*), como pode ser observado na Figura 6, os processos que podem ser aplicados de acordo com o tipo de material em uma única etapa.



**Figura 6** Processos aplicados em etapa única para metais, cerâmicas e polímeros (adaptado de ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2018)).

A MA aumentou sua popularidade nos últimos anos devido à disponibilidade de impressoras 3D no mercado com preços acessíveis. No entanto, é importante discutir questões ambientais relacionadas a ela. Um grande contribuinte para as mudanças climáticas é a quantidade de plástico depositada no ambiente. Portanto, nos últimos anos, houve esforços na produção de materiais recicláveis e reutilizáveis, bem como métodos que minimizem o impacto ambiental. Isso inclui a utilização de softwares para ajudar a reduzir a quantidade de material necessário para a fabricação de uma peça e o tempo de fabricação, reduzindo assim o consumo de energia (JAVAID et al., 2021).

De acordo com Bonneau et al. (2017), estima-se que até 2050 a MA possa economizar até 90% da matéria-prima necessária para a fabricação. Verhoef et al. (2018) analisaram o efeito da MA na demanda global de energia até 2050 e concluíram que, para o setor aeroespacial, a maior economia energética estaria na redução de peso das peças. A fabricação de componentes com peso reduzido levará a uma economia de energia estimada entre 5% e 25% até 2050, bem como à redução dos custos de fabricação de 4% a 21% para o mesmo período.

No processo DED a geração de resíduos pode ser reduzida aumentando a eficiência do bocal e no caso da PBF pode-se adaptar a geometria da câmara de acordo com a peça construída. Uma vez que, o pó pode ser reutilizado após uma etapa de peneiramento, e se estiver muito contaminado não pode ser reutilizado e deve ser reciclado, onde o pó pode ser refundido e após os ajustes da composição pode-se obter o novo pó. No entanto, essa última etapa também é considerada como descarte (ARRIZUBIETA et al., 2020).

Atualmente, estão em vigor várias normas que devem ser consideradas na fabricação de peças por MA, como pode ser observado na Tabela 1. Essas normas servem como guia e padronização dos termos utilizados, garantindo clareza na comunicação dos trabalhos científicos e estabelecendo um padrão de qualidade na fabricação. Entre as normas, estão incluídas terminologias que devem ser utilizadas, matérias-primas, padrão de projeto de componentes da área médica, formato dos arquivos e os requisitos mínimos das peças fabricadas.

**Tabela 1** Normas técnicas relacionadas a MA que estão em vigor (ABNT, 2023).

Normas	Descrição
ISO/ASTM 52900	Define os termos e estabelece as terminologias utilizadas na MA (ISO/ASTM, 2018)
ISO 17296	Norma complementar que descreve as matérias primas utilizadas nos processos de MA (ISO, 2019)
NBR 16627	Utilizada para padronizar os termos e projetos de componentes destinados a implantes para cirurgia (NBR 16627, 2020)
ISO/ASTM 52915	Especifica o formato de arquivo para MA (ISO/ASTM, 2020)
NBR 16798	Define os termos e nomenclaturas associadas ao sistema de coordenadas e metodologias de ensaio utilizadas ABNT na MA (NBR 16798, 2019)
ISO/ASTM 52901	Especifica os requisitos necessários para peças compradas que foram fabricadas por MA (ISO/ASTM, 2019)

Os processos de MA são amplos e consolidam diversos métodos e sistemas, por conta disso, a microestrutura dos materiais metálicos são afetados de acordo com os parâmetros utilizados (SAMES et al., 2015). Os parâmetros mais investigados são: potência da fonte de calor, tamanho do ponto de feixe, velocidade de varredura, espaçamento de hachura e espessura da camada. Durante a impressão, a resistência mecânica da peça será afetada caso ocorra a incidência de porosidade, portanto, para atingir uma densidade ideal esses parâmetros devem ser analisados (YAKOUT; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2019). Um fator bastante estudado é a Densidade Volumétrica de Energia (VED), ou seja, a quantidade de energia depositada por unidade de volume de pó. Quando ocorre de partículas não fundidas se depositarem no fundo da poça, tem-se um VED baixo, levando a poros irregulares (TANG; PISTORIUS; BEUTH, 2017). Para um VED muito alto, a temperatura da poça de fusão excede o ponto de ebulição do metal, ocorrendo a evaporação do material e a formação de poros esféricos na peça (KING et al., 2014).

Outro fator que deve ser levado em conta na fabricação de peças complexas é a direção de deposição. Na maioria dos processos atuais, ao fatiar um modelo 3D em seções transversais 2D, o algoritmo realiza a deposição perpendicular a direção de construção, entretanto, essa estratégia de fatiamento é limitada, sendo necessário o uso de suportes em alguns casos para evitar o colapso durante a deposição em locais que possui saliência, causando desperdício de material e mau acabamento superficial. A fim de superar essas limitações, estudos são realizados para desenvolver tecnologias de MA sem a utilização de suporte (HUANG et al., 2022).

Wu et al. (2017) desenvolveram um sistema robótico (RoboFDM) que possui um braço que fornece movimento em seis graus de liberdade, o princípio utilizado é a modelagem de deposição fundida (*fused decomposition modeling - FDM*) e o material utilizado é o ácido polilático (PLA). O RoboFDM possui um algoritmo capaz de imprimir peças em diversas direções e em diferentes lugares sem suporte e sem colisões. As direções de impressão são determinadas através de um cálculo de decomposição do modelo. Foi relatado que os resultados foram promissores e as peças que possuem grandes saliências podem ser fabricadas sem suporte com algumas limitações de velocidade, tamanho, custos e geometria.



**Figura 7** Modelo de um coelho fabricado pelo RoboFDM (esquerda) e modelo fabricado por FDM convencional (direita) (WU et al., 2017).

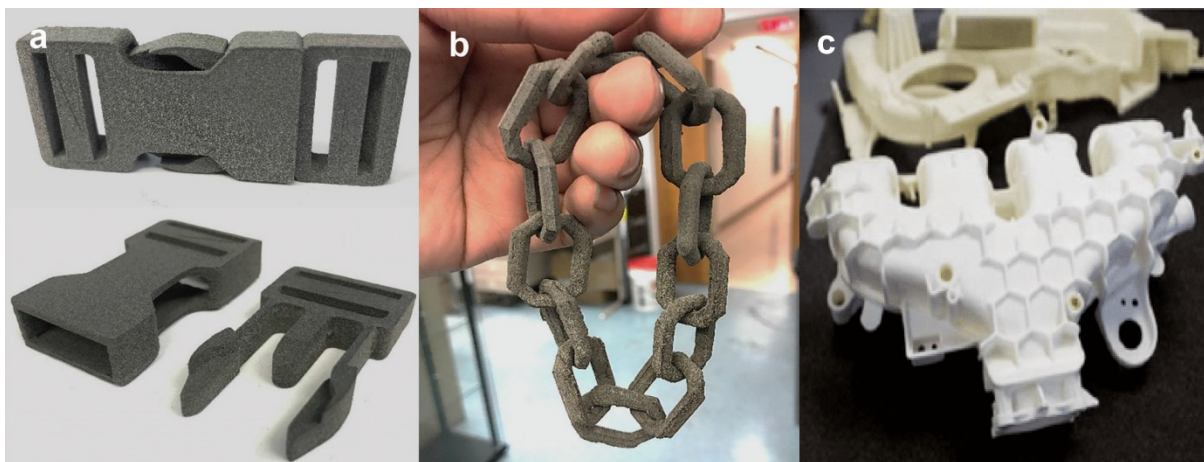
### 2.1.1 MANUFATURA ADITIVA DE POLÍMEROS/CERÂMICA

Os polímeros possuem uma ampla quantidade de materiais e podem ser utilizados em diferentes processos de MA. Se destacam pela facilidade de processamento e disponibilidade no mercado, entretanto, não possuem resistência mecânica em comparação com outros materiais. Em comparação com processos convencionais de fabricação, a MA de polímeros se destaca pela possibilidade de fabricação de peças multimateriais, que está sendo utilizada principalmente pelo setor industrial por conta da limitação do processo em impressoras comerciais (SAFAEE et al., 2022). Um fator importante na deposição de materiais poliméricos é o controle da direção da anisotropia da estrutura, sendo fundamental para dispersar cargas concentradas em uma área maior, levando a tensões menores e evitando falhas (GARCIA; WARDLE; HART, 2008).

Esses materiais são encontrados com facilidade e estão disponíveis na forma de filamento, resina e pó, o que torna esse processo de MA bastante popular e de baixo custo. Os polímeros mais utilizados para impressão 3D são: nylon, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e seus derivados, Ácido Polilático (PLA), Álcool Polivinílico (PVA), Poliuretano Termoplástico (TPU) e o Policarbonato (PC). Além disso, a MA possibilita a impressão de diferentes tipos de materiais, podendo variar de acordo com a rigidez e a resistência mecânica, o uso de materiais mais resistentes está aumentando e pode ser utilizado em variadas aplicações (SALIFU et al., 2022).

Samat et al. (2021) analisaram as propriedades mecânicas e in vitro de uma mistura de TPU e PLA para impressões 3D de *scaffolds* traqueais. A lesão traqueal pode resultar em câncer, infecção, trauma e anomalias congênitas, o tratamento alternativo é a reconstrução total ou parcial, utilizando enxerto ou *scaffold* no local da lesão, entretanto não existe nenhum material que atende aos critérios necessários. O maior desafio é a escolha do material e o design para fabricação, como por exemplo, os *scaffolds* devem criar um local adequado para as células se desenvolverem, sem provocar reação imune que possa desencadear uma resposta inflamatória. A taxa de degradação deve ocorrer na medida que as células produzem sua matriz celular e os subprodutos eliminados com segurança pelo corpo. Também é necessária uma estrutura com uma resistência mecânica suficiente para permitir a funcionalidade fisiológica desde a implantação até a conclusão do processo. Esse estudo analisou as propriedades mecânicas, taxa de absorção de água, biodegradabilidade e biocompatibilidade da mistura. Os autores concluíram que os polímeros de TPU e PLA que foram misturados por fusão são biocompatíveis e possuem taxa de absorção e degradação necessária para a aplicação desejada, sendo viável para uso na forma de filamento para fins médicos.

Dentre as técnicas de MA utilizadas na indústria automotiva, a sinterização a laser seletiva (*selective laser sintering - SLS*) permite a criação de peças composta por polímeros. Nessa técnica, os pós de polímeros são fundidos a laser camada por camada em locais específicos de acordo com o modelo desenvolvido (SALIFU et al., 2022). Na Figura 8a e b, pode-se observar duas peças fabricadas com poliamida 12 e na Figura 8c, pode-se observar um duto do sistema de controle ambiental (*environmental control system - ECS*) fabricado por SLS, esse duto é utilizado em corridas para aumentar o desempenho dos automóveis e no setor aeroespacial é utilizado para pressurização de cabines. Utilizando essa técnica é possível projetar a estrutura da peça altamente otimizada, com espessura de parede variada, a fim de melhorar a relação de resistência e peso. A SLS permite a fabricação de peças complexas sem suporte e com alto nível de precisão (SARVANKAR e YEWALE, 2019).

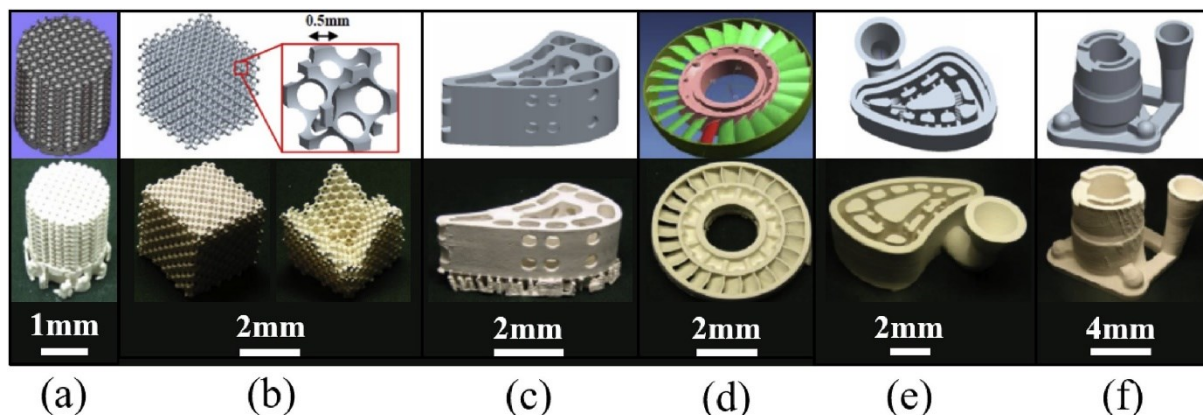


**Figura 8** Peças fabricadas por SLS: (a) Fivela de duas partes (ESPERA JR. et al., 2019), (b) corrente circular (ESPERA JR. et al., 2019) e (c) duto utilizado para aumentar o desempenho do automóvel (SARVANKAR e YEWALE, 2019).

As cerâmicas são materiais utilizados na indústria de energia, aeroespacial, bioengenharia, construção e nanotecnologia. Possuem uma combinação de propriedades específicas, como por exemplo, alta dureza, força e resistência ao desgaste, com baixa densidade, resistência a altas temperaturas e ambientes corrosivos (JANSSEN; SCHEPPOKAT; CLAUSSEN, 2008). A fabricação de peças cerâmicas sem defeitos não é uma tarefa trivial devido às suas propriedades extremas. Alta temperatura de fusão e baixa ductilidade deixa esse material com baixa processabilidade a partir do estado líquido fundido, e quando submetido a tratamento térmico sem um controle adequado, ocorre a formação de rachaduras e poros por conta de sua baixa resistência ao choque térmico (LAKHDAR, 2021). A usinagem de componentes sinterizados também é um desafio, por conta da alta dureza e fragilidade é comum a ocorrência de defeitos e microfissuras na superfície. Devido às ferramentas de corte e retificação diamantadas, estima-se que a usinagem corresponde a mais de 70% dos custos de fabricação (KLOCKE, 1997).

A indústria de materiais cerâmicos é uma das áreas mais promissoras para adoção da tecnologia de MA, devido a possibilidade do desenvolvimento de componentes complexos, superando a baixa processabilidade intrínseca e altos custos de processamento desse tipo de material (HUR et al., 2022). As matérias primas em pó e suspensão são as mais utilizadas em MA de materiais cerâmicos. Entre as 7 técnicas de MA, a estereolitografia (SLA, que pertence à fotopolimerização em cuba), formação livre de extrusão (*extrusion free-forming - EFF*, que pertence à extrusão de material) e litografia de dois fótons (*two-photon lithography - TPL*), que pertence a fotopolimerização em cuba) são as técnicas mais utilizadas para fabricar componentes cerâmicos. A sinterização seletiva a laser (que pertence a PBF) e o jato de aglutinante também são técnicas utilizadas para esse material à base de pó (ZHANG, et al., 2022).

Nos anos 90 um projeto do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) utilizou o jato de aglutinante como técnica para fabricar com pós cerâmicos, que logo após foi adquirido pela Z Corporation e comprado pela 3D Systems depois de alguns anos (VALDIVIESO, 2019). Na conferência internacional sobre MA e impressão 3D de 2017, Samantha O'Callaghan (líder do grupo de pesquisa da JM em MA de materiais cerâmicos) explicou que essa técnica provou ser a mais adequada para empresa na época por conta da produção de componentes de baixo custo, porosos, flexíveis e com o tempo de fabricação em escala ser menor comparado com outras técnicas de MA (GOEHRKE, 2017). Na Figura 9, pode-se observar algumas peças cerâmicas fabricadas por SLA.



**Figura 9** Peças fabricadas com SiO<sub>2</sub> via SLA: (a) *scaffold* poroso; (b) cristais fotônicos; (c) pá de turbina oca; (d) impulsor; (e)–(f): moldes de microfusão (CHEN et al., 2019).

### 2.1.2 MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

Os materiais metálicos podem ser utilizados em MA por diversos processos, como por exemplo, PBF, DED e extrusão do material. Dentre as ligas metálicas utilizadas, têm-se o aço inoxidável, ligas de titânio, ligas de níquel, cobalto e ligas de alumínio (SUWANPREECHA e MANONUKUL, 2022). As técnicas de MA de metais não são utilizadas apenas para fabricação de peças complexas em baixa escala, mas possuem um alto valor agregado no investimento de equipamentos e instalações para suportar todo o processo e a demanda energética necessária (THOMAS e GILBERT, 2014). Por exemplo, o processo de fusão seletiva a laser (*selective laser melting – SLM*) utiliza um laser para fundir o pó metálico, exigindo uma estrutura adequada de filtragem da recirculação do gás inerte e um sistema de resfriamento, portanto, o crescimento da MA de metais vai exigir processos mais econômicos e acessíveis (GONG et al., 2018).

De acordo com Liu et al. (2021), na MA os parâmetros utilizados estão diretamente ligados com as propriedades mecânicas da peça final. Por conta disso, foram projetados novos materiais metálicos, que podem ser aplicados na MA, para obter altos valores de resistência e tenacidade, e uma boa microestrutura. E uma limitação na MA é que as ligas típicas utilizadas na indústria não são aplicáveis na MA, por conta da dificuldade em obter as propriedades desejadas utilizando essas ligas, portanto, pesquisas recentes buscam desenvolver novos materiais metálicos que podem ser aplicados na MA e possuem as mesmas propriedades mecânicas das ligas mais utilizadas na indústria. Martin et al. (2017) desenvolveram um processo que controla a solidificação durante a MA, através da introdução de nanopartículas de nucleantes utilizando ligas de alumínio das séries 7075 e 6061. Através dos resultados obtidos, foi possível concluir que, essas ligas de alumínio que antes não podiam ser utilizadas na MA, podem ser processadas com sucesso por SLM após a utilização de nucleantes. Essa abordagem é aplicável a diversas ligas e pode ser utilizada em vários tipos de processos, e permitirá a utilização de outras ligas na MA, como por exemplo, superligas de níquel não soldáveis e intermetálicos.

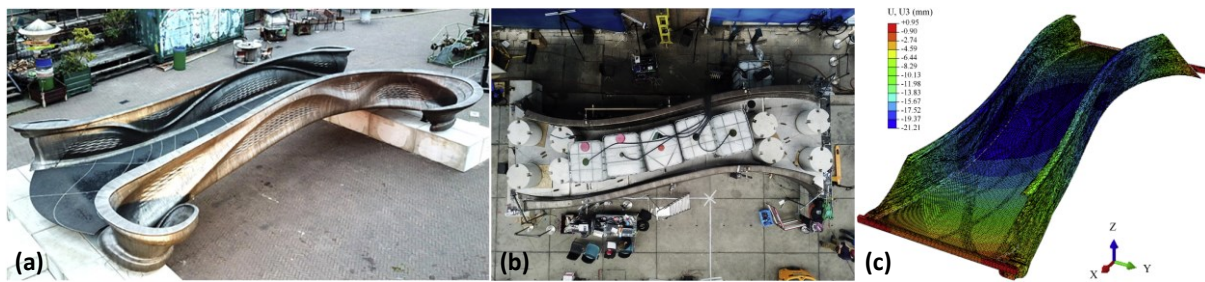
O polímero é o material mais utilizado na MA, em segundo lugar, o metal. Isso ocorre por conta da facilidade de utilização de diversos tipos de ligas metálicas e ao seu alto grau de liberdade. Além dos metais mais comuns, como por exemplo, alumínio, cobre e zinco, ligas específicas como titânio grau 5, Inconel e muitas outras ligas superiores podem ser utilizadas na MA de metal. A utilização desse material está crescendo, sendo muito empregado na indústria aeroespacial, que demanda a fabricação de peças complexas com ligas que não podem ser utilizadas por métodos convencionais (MADHAVADAS et al., 2022).

De acordo com Çam (2022), dentre as técnicas de MA, os sistemas que utilizam a alimentação de arame estão se tornando mais atraentes do que os sistemas que utilizam pó de metal, por conta do alto custo do pó metálico e a possibilidade de fabricação de peças em grandes dimensões utilizando arame, em especial o processo MADA. Segundo Williams et al. (2015) através da MADA, é possível a fabricação de componentes com mais de 10 kg em titânio, alumínio, aço e outros metais.

Na Figura 10a, pode-se observar a primeira ponte de metal impressa em 3D por meio do processo CMT convencional, um método que possibilita a fabricação de componentes com custo e tempo de construção menores em comparação com métodos convencionais. A ponte passou por alguns testes, incluindo o teste de carga de 10 ton, que pode ser observado na Figura 10b. Como parte da verificação,



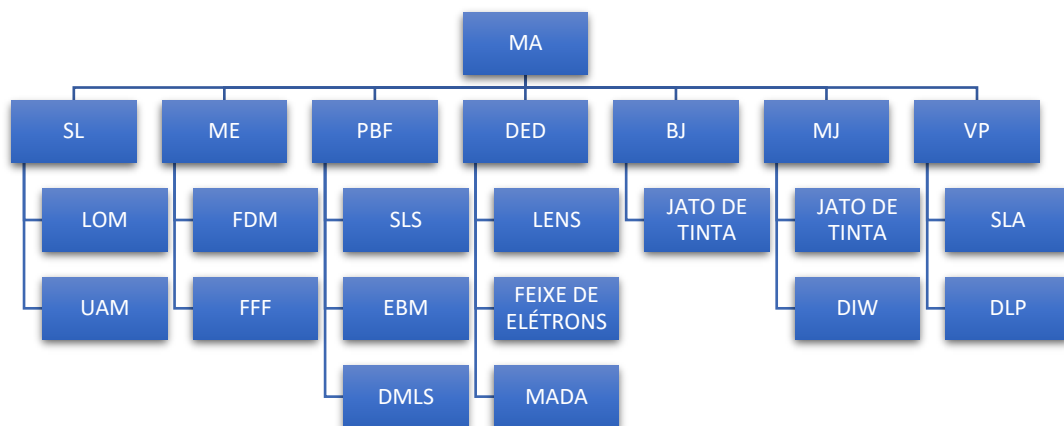
também foi realizada a modelagem de elementos finitos, como pode ser observado na Figura 10c. A empresa responsável pela construção da ponte é a MX3D, que utilizou quatro peças principais impressas e quatro redemoinhos de cantos que foram soldados manualmente. A ponte possui uma massa total de 7,8 ton, das quais aproximadamente 4,6 ton foram impressas, sendo necessários mais de 1100 km de arame de aço inoxidável austenítico grau 308LSi (GARDNER et al., 2020).



**Figura 10** (a) Primeira ponte de metal impressa em 3D, (b) teste físico e (c) simulação numérica (adaptado de GARDNER et al., 2020).

## 2.2 MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO PARA MANUFATURA ADITIVA

Entre os sete processos utilizados em MA, os mais utilizados são PBF e DED (MADHAVADAS et al., 2022). E de acordo com WOHLERS et al. (2018), a indústria da impressão 3D cresceu 21% e a venda de sistemas de MA que utilizam metal teve um aumento de 80%. Cada processo apresentado possui diferentes aplicações e vantagens. Na Figura 11, pode-se observar as técnicas e processos de MA.



**Figura 11** Técnicas e processos de MA (adaptado de RAJAN et al., 2022).

O jato de aglutinante (BJ) é uma tecnologia de MA que abrange uma ampla quantidade de materiais. Nesse processo, um aglutinante é depositado em direção a um leito de pó na área da superfície desejada unindo as partículas de pó, logo após, toda a superfície do leito de pó é exposta a uma certa quantidade de energia térmica através de lâmpadas de aquecimento, com a finalidade de introduzir resistência mecânica adequada para a estrutura suportar as devidas forças ao longo do processo de impressão. Essas etapas ocorrem camada por camada até que a peça seja impressa por completo, como pode-se observar na Figura 12a. E na Figura 13a, tem-se uma peça impressa por BJ em aço inoxidável 316L. Durante o processo, a interação entre o aglutinante e o pó são os fatores que determinam a qualidade geométrica e a resistência estrutural das partes (MIYANAJI; ZHANG; YANG, 2018).

No processo DED pode-se utilizar diferentes fontes de calor, como por exemplo, o laser, feixe de elétrons, arco elétrico com plasma e arco elétrico com gás de proteção. Caso seja utilizado feixe de elétrons para obter a poça de fusão, uma câmara de vácuo deve fornecer um ambiente ideal com processamento de alta pureza durante a fabricação. Onde a alimentação ocorre pela adição de arame (DEBROY et al., 2018). O princípio de funcionamento dos processos são semelhantes, mas também se diferem pela matéria prima utilizada. No processo MADA, Figura 12b, um arame metálico é alimentado

na poça de fusão produzida por um arco formado entre o arame e a superfície. Na Figura 13b, pode-se observar uma peça impressa pelo processo MADA. Esse processo é uma automatização da soldagem MIG (*Metal Inert Gás*). No processo de deposição utilizando o laser como fonte de calor, um pó é injetado no ponto desejado na superfície, onde o laser concentra sua energia. A poça de fusão formada nesse ponto permite que o material de adição seja fundido com a peça que está sendo fabricada (YANG et al., 2017, p.23-24).

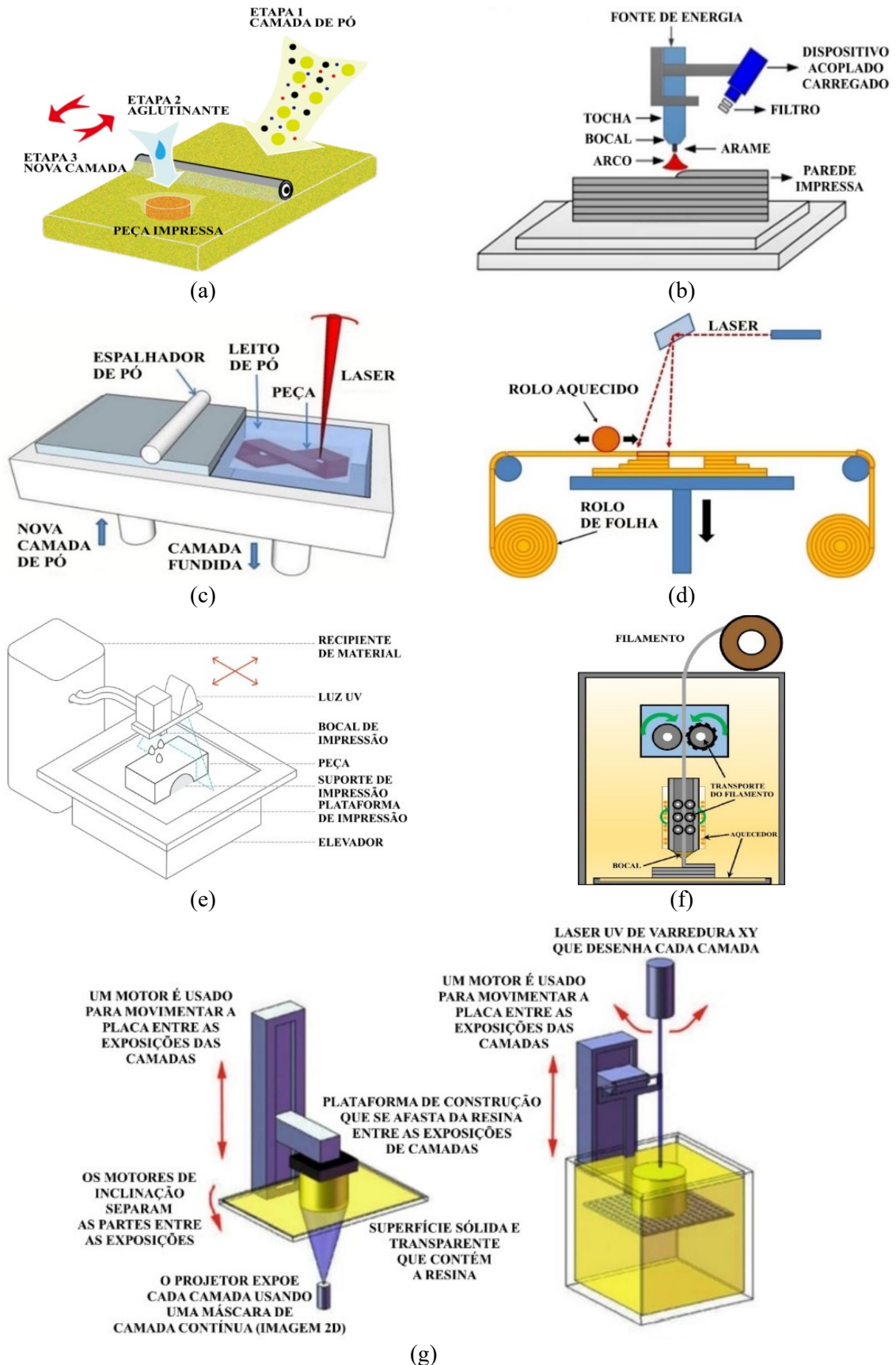
Segundo Yang et al. (2017, p.21), a PBF ocorre através de uma placa que alimenta a camada com a matéria-prima, logo após, um feixe de energia (laser ou elétrons) é apontado no pó com a finalidade de preencher a área definida pela fatia no modelo 3D. O feixe de energia é ajustado de modo que uma certa profundidade da camada anterior também seja fundida, permitindo a fusão total de todas as camadas, esse processo pode ser observado na Figura 12c. E na Figura 13c, pode-se observar uma peça de titânio 6Al-4V impressa por PBF. Já o processo de laminação de folha (SL), de acordo com Pilipović (2022, p.127-136), é um processo onde camadas de folhas processadas são unidas por algum procedimento, como por exemplo, colagem, aquecimento ou soldagem, dependendo do material. Como pode ser observado na Figura 12d e Figura 13d, segundo Yang et al. (2017, p.19-20), o processo ocorre alternadamente entre duas etapas: união das folhas e o corte desejado em uma determinada camada ou pilha de camadas.

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2018), a fotopolimerização em cuba (VP) é um processo que ocorre em uma cuba, no qual o fotopolímero líquido é seletivamente curado por polimerização ativada por luz. Segundo Lovo et al. (2020), utilizando uma matéria-prima líquida, o processo de VP permite a fabricação micrométrica camada por camada ou continuamente sem camadas. Através do projeto 3D em CAD, é definido os padrões de luz que serão aplicados na resina, solidificando camada por camada até que a fabricação da peça seja concluída. E dependendo da resina utilizada, essa luz pode ser visível ou UV.

Segundo Yang et al. (2017, p.15-16), existem dois processos que podem ser utilizados: em um dos processos, a resina está contida em uma bandeja e a placa afasta da bandeja ao longo da fabricação, e no outro processo, a placa onde será realizada a impressão é submersa em um tanque de resina ao longo da fabricação. No primeiro processo, a luz é projetada para cima na cuba, e a resina que está em uma superfície abaixo da placa é polimerizada camada por camada. A cada camada a placa se desloca para cima permitindo um novo preenchimento de resina no espaço formado, e o processo se repete a cada polimerização. Já no segundo processo, uma cuba contém toda a resina que será utilizada. A placa fica posicionada a centenas de microns abaixo da superfície livre que não contém resina, onde tem-se o início da impressão. Quando toda a camada é polimerizada, a placa se desloca para baixo para que outra camada de resina fresca seja polimerizada, o processo se repete camada por camada até que toda peça seja impressa, como pode-se observar na Figura 12g e Figura 13g.

De acordo com Turner, Strong e Gold (2014), o processo de extrusão de material (ME) utiliza um filamento que é aquecido até que fique flácido e possa ser extrudado por um bocal de impressão, permitindo a impressão de peças à medida que o material sai do bocal e solidifica, como pode ser observado na Figura 12f. Na Figura 13f, tem-se uma peça impressa por ME onde foi utilizado PLA. O processo de alimentação do filamento ocorre através de rolos de pressão e o bocal se move nos planos x-y conforme o material é depositado. Esse material é depositado em uma mesa de impressão que é aquecida com o objetivo de aumentar a adesão entre as camadas impressas e a mesa. O processo de extrusão ocorre camada por camada, seguindo o modelo CAD, até que toda a peça seja concluída. Segundo Suwanpreecha e Manonukul (2022), esse processo permite também a fabricação de peças multimateriais quando a impressora possui mais de um sistema de alimentação.

E o processo de jateamento de material (MJ), segundo Elkaseer et al. (2022), permite a fabricação de peças com base em duas etapas: impressão/jateamento e cura. No jateamento, gotas de tinta no estado líquido são ejetadas por vários bicos em um substrato, onde essas gotas depositadas na área selecionada se aglutinam. Em seguida, a camada é curada utilizando luz UV, como pode ser observado na Figura 12e e Figura 13e. De acordo com Shah et al. (2021), essa tecnologia permite a impressão a jato de tinta contínuo ou em forma de onda de sinal, controlando a ejeção em alta frequência, ao longo da impressão, de acordo com a necessidade.



**Figura 12** Etapas do processo de impressão 3D por: (a) BJJ (adaptado de WANG; MÜLLERTZ; RANTANEN, 2022), (b) DED (adaptado de XIONG et al., 2017), (c) PBF (adaptado de DEBROY et al., 2018), (d) SL (adaptado de TOPMAXTECH, 2015), (e) MJ (adaptado de HUBS, 2022), (f) ME (adaptado de SUWANPREECHA e MANONUKUL, 2022) e (g) VP (adaptado de WALLACE et al., 2014).





**Figura 13** Peças fabricadas por: (a) BJ (SCULPTEO, 2022), (b) DED (FITNIK, 2022), (c) PBF (SCULPTEO, 2022), (d) SL, créditos da *Impossible Objects* (ENGINEERING PRODUCT DESIGN, 2022), (e) MJ (3D SYSTEMS, 2017), (f) ME (SCULPTEO, 2022) e (g) VP (FORMLABS, 2020).

### 2.2.1 MANUFATURA ADITIVA DE POLÍMEROS/CERÂMICA

A tecnologia de deposição por ME é uma das mais utilizadas na MA de polímeros, dentro dessa categoria os processos mais populares são: fabricação de filamentos fundidos (*Fused Filament Fabrication – FFF*), FDM e DIW (*Direct Ink Writing*). A primeira patente dessa técnica foi desenvolvida e introduzida no mercado por Scott Crump, que desde sua expiração, muitas empresas buscam desenvolver impressoras 3D que utilizam esse processo. Atualmente, vários materiais podem ser impressos utilizando a tecnologia por extrusão, desde concreto até hidrogéis biomédicos macios que contém células vivas (SAFAEE et al., 2022).

Carneiro, Silva e Gomes (2015), analisaram o polímero polipropileno (*polypropylene – PP*) na extrusão de material por FDM em comparação com peças fabricadas por moldagem por compressão. Toda a cadeia produtiva foi avaliada, começando pelos pellets de PP de alta qualidade, logo após, a fabricação do filamento e por fim, a impressão das amostras. Nesse estudo, conclui-se que: utilizando diferentes orientações de impressão, as amostras mais rígidas foram obtidas com impressão na direção

do filamento, a espessura das camadas não influencia no desempenho mecânico, o grau de enchimento tem um efeito linear nas propriedades mecânicas e a perda do desempenho é de 20% a 30% dependendo dos parâmetros utilizados. Portanto, há espaço para estudos com a finalidade de melhorar ainda mais o desempenho das amostras, tornando essa técnica competitiva em comparação aos métodos convencionais.

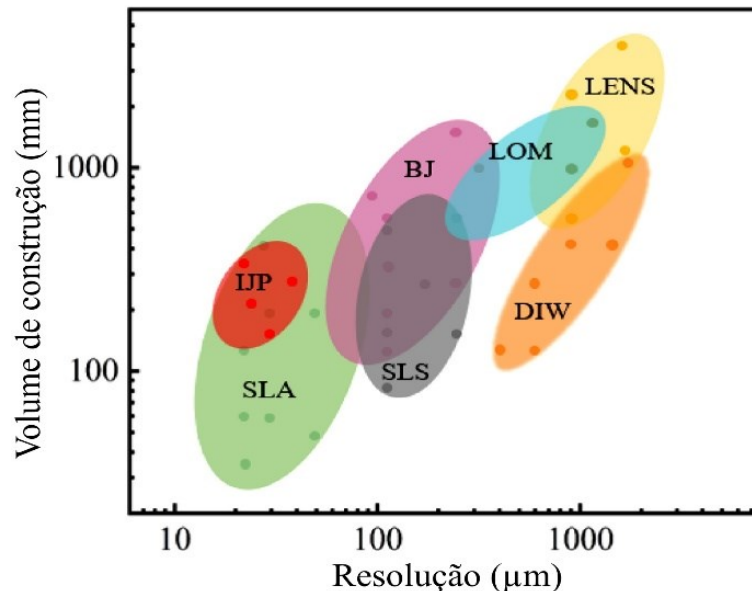
Segundo Wang et al. (2017), várias técnicas são utilizadas para impressão de materiais poliméricos. Atualmente, algumas técnicas já estão bem desenvolvidas, como por exemplo, FDM, SLA, SLS, jato de tinta e plotagem 3D, e outras ainda estão em desenvolvimento sendo utilizadas apenas por um grupo seleto de pesquisadores. Para selecionar a melhor técnica para impressão de uma determinada peça, deve-se analisar as vantagens e limitações de cada processo, como por exemplo, os materiais utilizados, velocidade de processamento, custos e condições para atingir os requisitos de desempenho. Como pode-se observar na Tabela 2, as técnicas de impressão e os materiais mais comuns utilizados em cada processo, bem como, suas vantagens e desvantagens.

**Tabela 2** Resumo das técnicas de impressão 3D (adaptado de WANG et al., 2017).

<b>Tecnologia</b>	<b>Estado inicial do material</b>	<b>Material polimérico</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
FDM	Filamento	Termoplástico como PC, ABS, PLA e nylon.	Baixo custo, boa resistência e capacidade de utilizar multimateriais	Anisotropia e entupimento do bocal
SLA	Fotopolímero líquido	Resina foto-curável (resina a base de epóxi ou acrilato)	Alta resolução de impressão	Limitação de material, citotoxicidade, alto custo
SLS	Pó	PCL (Policaprolactona) e pó de poliamida	Boa resistência, fácil remoção do suporte	Alto custo, superfície em pó
Jato de tinta	Pó	Qualquer material pode ser fornecido como pó, necessita de aglutinante	Baixo custo, capacidade de multimaterial, fácil remoção do suporte	Entupimento do jato de aglutinante, contaminação do aglutinante
Plotagem 3D	Líquido ou pastoso	PCL, PLA, hidrogel	Alta resolução de impressão, capacidade de materiais macios	Baixa resistência mecânica, processo lento

Segundo Sun et al. (2023), os materiais cerâmicos podem ser utilizados na MA por diversas técnicas, como por exemplo, SLA, SLS, fabricação de objetos laminados (*Laminated Object Manufacturing - LOM*), BJ, IJP (*Inket printing*), LENS (*Laser Engineered Net Shaping*) e DIW. De acordo com Chaput e Chartier (2007), o método de deposição por SLA está limitado a materiais cerâmicos que não absorvem a luz UV, uma vez que, a polimerização ocorre com a penetração da luz UV na resina. Já o processo SLS, segundo Chen et al. (2017), só é apropriado se a fabricação ocorrer de forma indireta. Ou seja, os pós cerâmicos são misturados com aglutinantes poliméricos com baixo ponto de fusão, dessa forma é mais viável, em comparação com o SLS direto, por conta do alto ponto de fusão dos pós cerâmicos.

Não existe uma técnica ideal para a MA de materiais cerâmicos, cada processo possui suas vantagens e limitações que devem ser levadas em conta na seleção do melhor método de deposição. Na Figura 14, pode-se observar a relação entre volume de construção e resolução. Como pode-se observar, a fabricação de peças com alta resolução estão em uma faixa limitada de volume de construção. Os métodos com o maior espectro de seleção de materiais que podem ser impressos é o DIW, IJP e BJ (SUN et al., 2023).



**Figura 14** Comparação da resolução de impressão e volume de construção de diferentes técnicas de MA, dados adotados por empresas de MA (adaptado de SUN et al., 2023).

Gonzalez et al. (2016), utilizaram pó de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) para fabricar peças por BJ com densidade próxima de 96%. Foram usados grãos com tamanho de partícula de 53  $\mu m$ , 45  $\mu m$  e 30  $\mu m$ . As peças foram sinterizadas à pressão atmosférica com permanência no forno de 2h e 16h, com taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}C$  por minuto. Foi concluído que, utilizando diferentes espessuras da camada, tamanho da partícula e perfil de sinterização, foi possível obter peças com densidade relativa próxima de 96%. Onde os melhores resultados foram obtidos com uma melhor distribuição do pó, menor espessura da camada e maior tempo de sinterização. Esses resultados são importantes para fabricação de peças de alta densidade que serão utilizados ambientes hostis e permitir a fabricação de peças que não podem ser obtidas por métodos tradicionais.

### 2.2.2 MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

A MA de materiais metálicos pode ser realizada de forma indireta pelo método BJ, FFF, manufatura aditiva por pulverização a frio e *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM). A MA baseada em fusão é caracterizada pelos métodos PBF e DED. No PBF um feixe de elétrons ou laser é utilizado para fundir o pó metálico, podendo ser utilizado os processos SLM e *Electron Beam Welding* (EBM). Já no DED a matéria-prima é utilizada em forma de pó ou arame alimentado de forma contínua em um feixe de laser ou um arco elétrico. Os processos mais utilizados no DED são o LENS e o MADA. Cada processo resulta em diferentes características, como pode-se observar na Tabela 3 (LIU et al., 2022).

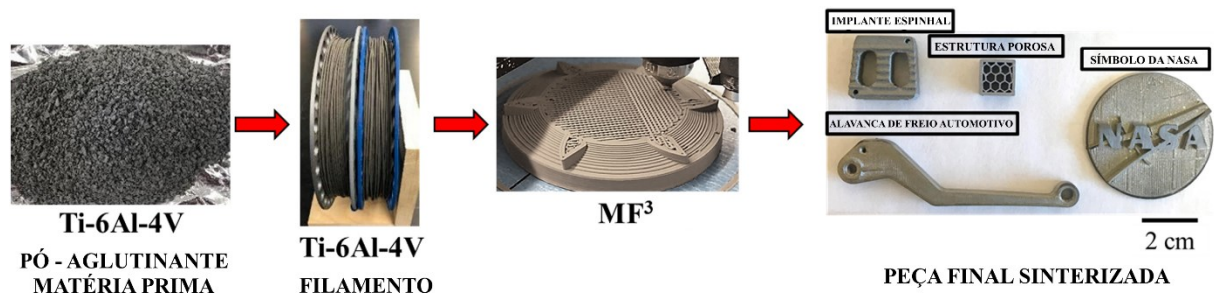
Hooper (2018), analisou a temperatura da poça de fusão e a taxa de resfriamento no processo SLM. Dependendo do campo de temperatura tem-se a ocorrência de defeitos e o ponto de feixe pequeno permite a criação de componentes metálicos com maior precisão. Al-Bermani et al. (2010), discutiram a microestrutura, textura e propriedades mecânicas do Ti-6Al-4V fabricado por EBM, onde foi utilizado uma plataforma de aquecimento visando diminuir as tensões residuais acumuladas.

A tecnologia LENS permite reduzir o tempo e o custo de fabricação de peças metálicas além de ser o processo mais adequado para impressão graduada de multimateriais, sendo possível a fabricação de componentes internos complexos que não são eficazes por outros métodos (GRIFFITH et al., 2000). E o processo MADA possui altas taxas de deposição e vantagens na fabricação de grandes componentes (SHAMSAEI et al., 2015).

**Tabela 3** Características das técnicas de MA (adaptado de LIU et al., 2022).

MA	PBF		DED	
Processo	SLM	EBM	LENS	MADA
Potência de saída típica (W)	100 - 600	500 - 3000	1000 - 3000	1000 - 5000
Tamanho da poça de fusão (mm)	~ 0,1	~ 0,1	~ 0,1	~ 1
Gradiente de temperatura (K/mm)	$10^3 - 10^4$	$10^2 - 10^3$	$10^2 - 10^4$	10 - 200
Taxa de resfriamento (K/s)	$10^5 - 10^7$	$10^3 - 10^5$	$10^3 - 10^4$	$10^2 - 10^3$
Características	Alta precisão e ampla aplicabilidade	Baixa tensão residual	Impressão multimateriais e capacidade de fabricação de grandes peças	Altas taxas de deposição e capacidade de fabricação de grandes peças
Referências	HOOPER, 2018	AL-BERMANI et al., 2010	GRIFFITH et al., 200	SHAMSAEI et al., 2015

Vários materiais metálicos podem ser utilizados no processo FDM, como liga de tungstênio, liga de titânio e alumínio. Nesse processo a matéria-prima consiste em um pó e um aglutinante. O pó consiste em um metal de alta consistência e o aglutinante é um multicomponente orgânico, os dois são misturados formando o filamento (NURHUDAN et al., 2021). Singh et al. (2020), realizaram um estudo da impressão por *metal-fused filament fabrication* (MF<sup>3</sup>), semelhante ao processo FFF, utilizando filamento com 59% de volume de pó de Ti-6Al-4V e aglutinante. O aglutinante é composto por vários componentes poliméricos e tem como objetivo garantir uma alimentação uniforme e união das camadas durante o processo, esse aglutinante deve ser removido sem deixar nenhum resíduo para sinterização, com a finalidade de melhorar a densidade da peça. A capacidade de impressão é definida através da força necessária para superar a pressão do bocal e a tensão máxima que o filamento pode suportar antes da ruptura. Considerando a mistura realizada, as melhores taxas de impressão obtidas foram de 2 mm/s e 8 mm/s, respectivamente para filamentos finos e grossos. Concluiu-se que, os resultados foram satisfatórios para o desenvolvimento da técnica na produção de novos materiais para impressão por MF<sup>3</sup>. Na Figura 15, pode-se observar o esquema desde a produção até a peça final desse processo.



**Figura 15** Esquema do MF<sup>3</sup> para Ti-6Al-4V (adaptado de SINGH et al., 2020).

Em 2014, a EOS e o *Airbus Group Innovations* realizaram um estudo referente a otimização do método de fabricação de uma dobradiça do Airbus A320. O método de deposição DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) mostrou-se mais eficaz que o método de fundição convencional, por conta da economia de peso, gerando uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> em 40%, além de proporcionar otimização topológica, como pode-se observar na Figura 16 (MENG et al., 2019). O novo design possui uma massa de 326g, uma redução de 64% em comparação com o original que tem 918g de massa (TOMLIN E MEYER, 2011).



**Figura 16** Dobradiça do Airbus A320 (TOMLIN e MEYER, 2011).

De acordo com Sacramento (2014), NASA e Aerojet Rocketdyne realizaram uma série de testes de fogo em um motor de foguete fabricado por SLM. O diretor do programa de lançamento da Aerojet, Jay Littles, disse que o trabalho é um marco importante no desenvolvimento dos processos de fabricação e tecnologias necessárias para implementar o SLM para os componentes críticos de motores de foguetes. A tecnologia também está sendo implementada no sistema de propulsão, que tem por objetivo a fabricação de componentes de baixo custo e mais eficientes. Os resultados mostraram que a câmara de combustão de liga de cobre fabricada por SLM teve um aumento significativo no desempenho em comparação com a câmara de combustão tradicional.

Segundo Harbaugh (2015), a NASA imprimiu a primeira peça de motor de foguete de cobre para a missão de exploração em Marte. Steve Jurczyk, administrador do diretório de missões de tecnologia espacial na sede da NASA, disse que a MA está sendo adotada para auxiliar nessa jornada. A MA está permitindo a fabricação de peças complexas com diferentes materiais para fazer o motor que irá impulsionar os foguetes. A queima dentro da câmara de combustão chega a 2760 °C, para não fundir, é utilizado hidrogênio que circula nos canais de resfriamento. A câmara, como pode-se observar na Figura 17, foi fabricada em 10 dias e 18 horas por SLM, onde 8255 camadas de pó de cobre foram fundidas.



**Figura 17** Câmara de combustão fabricada por SLM, a varredura de luz vista na tela do computador, ajudou a verificar se a peça foi construída conforme projetada, créditos da NASA/MSFC/Emmett Given (adaptado de HARBAUGH, 2015).

### 2.3 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2018), o processo MADA se encaixa na categoria DED. Segundo Rodrigues et al. (2019b), o processo possui uma precisão menor em comparação com métodos de deposição que utilizam leito de pó, porém possui altas taxas de deposição e utiliza-se como fonte de calor o arco elétrico e o arame como matéria-prima. Esse processo está sendo adotado tanto por estudos acadêmicos quanto na indústria por conta das vantagens técnicas oferecidas,



sendo uma automatização dos processos de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gás*), soldagem a plasma e MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*).

De acordo com Huang et al. (2023), o MADA tornou-se um processo promissor com a utilização de várias matérias primas, como por exemplo, ligas de alumínio, ligas de titânio, ligas de magnésio e aço. Sendo um desafio a fabricação de camadas com alta qualidade e desempenho, podendo variar dependendo dos parâmetros do processo e material, que podem afetar a qualidade da microestrutura e do acabamento. Segundo Ermakova et al. (2021), um arame muito utilizado em soldagem automatizada é o arame de aço revestido com cobre ER70S-6, possuindo excelentes propriedades, como por exemplo, estabilidade do arco, altas taxas de deposição e pouco respingo em comparação com outros materiais.

### **2.3.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Segundo a AWS (2004), soldagem é a “operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”. A solda é o resultado desse processo. De acordo com Jeffus (2015, p.5), no processo de soldagem as técnicas se diferem pela pressão e calor que são aplicados e no equipamento utilizado. A soldagem é utilizada amplamente na fabricação de automóveis, eletrodomésticos, equipamentos de mineração, componentes de computadores, fornos, equipamentos ferroviários, entre outras várias aplicações.

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011, p.21-22), os processos de soldagem podem ser classificados em dois grupos: soldagem por pressão e soldagem por fusão. Na soldagem por pressão, têm-se a soldagem por ultrassom, fricção, forjamento, resistência elétrica, entre outros. E a soldagem por fusão possui diversas tecnologias que são diferenciadas de acordo com o tipo de fonte de energia, tipo de polaridade e corrente, agente protetor, entre outras características. Como por exemplo, soldagem ao arco submerso, soldagem com eletrodo revestido e soldagem com arame tubular, utilizam como fonte de calor o arco elétrico. Soldagem por eletroescória utiliza aquecimento por resistência, no processo de soldagem a laser tem-se um feixe de luz como fonte de calor e na soldagem a gás é utilizado chama oxiacetilênica.

O processo de soldagem TIG, também conhecido como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio. O arco elétrico é aberto quando o eletrodo encosta no metal de base, e o metal de adição é depositado de forma manual ou automática na poça de fusão. Nesse processo, para proteção da poça de fusão, é utilizado um gás de proteção que flui através do bocal da tocha. Para não contaminar a solda, os óxidos e impurezas na superfície do metal de base, devem ser removidos. Em comparação com outros processos de soldagem manual, esse processo requer um nível de habilidade maior e o resultado da solda é de alta qualidade em aplicações onde requer um nível crítico de integridade da solda, onde tem-se ligas específicas que podem ser utilizadas apenas nesse processo (JEFFUS, 2015, p.8-9).

Na soldagem a plasma, ou PAW (*Plasma arc welding*), o gás é aquecido pelo calor gerado no arco elétrico formado entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de fusão, e se ioniza formando o plasma, que é considerado como o quarto estado da matéria. Esse processo também utiliza gás de proteção e pode ou não ser utilizado material de adição para a fusão. Dependendo da corrente utilizada e do grau de ionização do gás, a temperatura do plasma pode variar de 1000 a 30000 K. O plasma não é composto apenas por gás ionizado, mas também por vapores metálicos e átomos gasosos não ionizados (REIS e SCOTTI, 2007).

#### **2.3.1.1 SOLDAGEM MIG/MAG**

O processo MIG/MAG, também conhecido como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), utiliza um arame consumível como material de adição que é alimentado continuamente e flui através de um bocal. E para proteger a poça de fusão dos gases atmosféricos é utilizado um gás de proteção que flui através de um bocal externo (JEFFUS, 2015, p.9). No modo de operação semiautomático o operador é necessário para controlar apenas a velocidade de deslocamento, direção da solda e a posição da pistola. A velocidade de alimentação do arame ocorre de forma automática (WAHAB, 2014, p.63).

A união permanente dos materiais é estabelecida através de um arco elétrico entre o material de adição e a poça de fusão. Através do calor do arco elétrico ocorre a fundição do arame consumível, à medida que é alimentado na poça de fusão, e do material de base, logo após, conforme ocorre a solidificação da poça de fusão tem-se a formação do cordão de solda. Esse processo é muito utilizado

em indústrias que tem por objetivo a união de materiais em larga escala. A qualidade do cordão de solda é avaliada por diversas características, como por exemplo, penetração, largura e altura. Para obter um bom cordão de solda deve-se definir os parâmetros adequados do processo (CORREIA et al., 2004).

Esse processo possui diversas vantagens, como por exemplo, eficiência na soldagem de chapas finas, evitando a ocorrência de deformação por conta da dilatação da chapa, melhor produtividade, soldagem de uma ampla gama de materiais e permite soldar em todas as posições. Uma limitação é a aplicação limitada ao ar livre, por conta da influência de correntes de ar no gás de proteção. A alimentação utilizada é a corrente contínua e o comprimento do arco se ajusta sem nenhum tipo de controle eletrônico da seguinte forma, se a fonte de alimentação é do tipo tensão constante o comprimento do arco se manterá estável caso a velocidade do arame for constante. Caso ocorra alguma alteração no comprimento do arco, ocorre uma queda de tensão resultando em uma alteração da taxa de fundição do arame de tal forma o comprimento do arco se estabilizará novamente (WEMAN, 2012, p.75-80).

### 2.3.1.1.1 SOLDAGEM MIG/MAG PULSADO

O processo de soldagem MIG/MAG é o único que possui seis modos de transferência do metal de adição para a poça de fusão. Esse modo de transferência corresponde a forma que o material de adição fundido se transfere através do arco elétrico para a poça de fusão, dentre esses modos, tem-se o MIG/MAG pulsado ou GMAW-P (*Pulsed-arc transfer*). A corrente produzida é uma corrente de pulso duplo, sendo uma de alta corrente para transferência spray axial, e outra de baixa corrente que não transfere nenhum material, como pode-se observar na Figura 18. Alta corrente no modo spray permite uma boa fusão e penetração do material, e a baixa corrente facilita o resfriamento, tendo como vantagem controle da poça de fusão. Esse processo atende a uma ampla variedade de materiais, como por exemplo, titânio, inconel e cobre. Podendo ser realizado em chapas finas e grossas (JEFFUS, 2015, p.242-246).

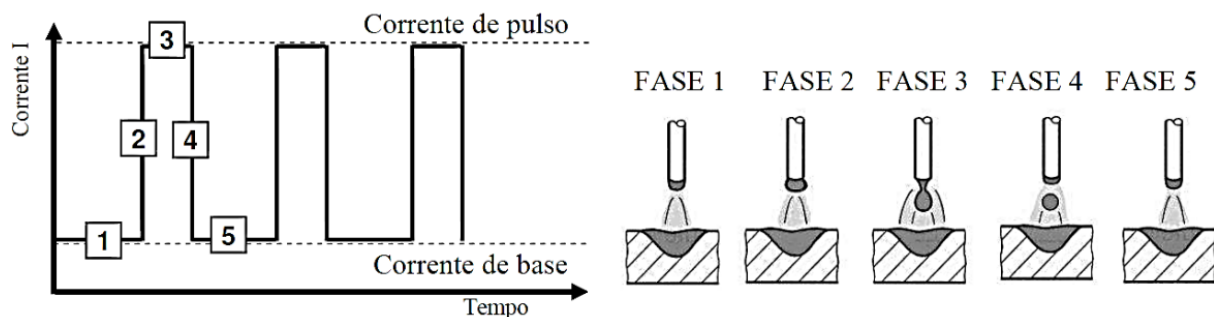
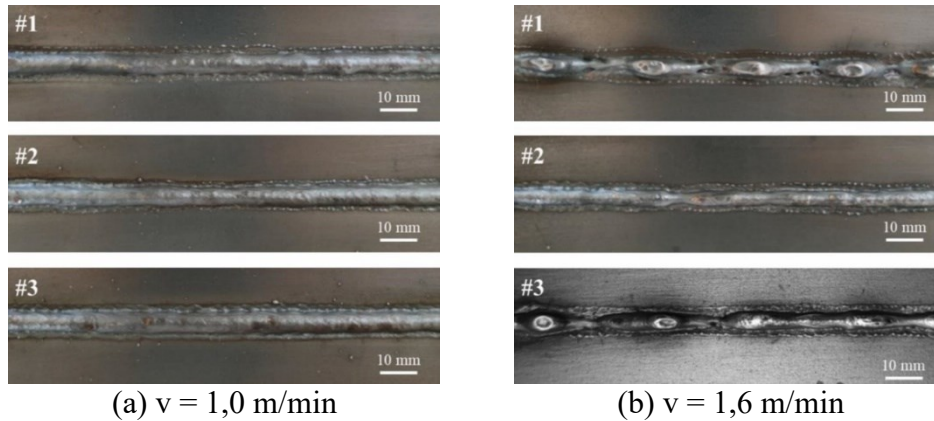


Figura 18 Diagrama do MIG/MAG pulsado (BAUM e FICHTER, 1999).

Segundo Palani e Murugan (2006), a tecnologia do MIG/MAG pulsado foi desenvolvida com a finalidade de tornar o processo de soldagem MIG/MAG convencional mais eficiente, porém o processo possui algumas limitações, como a seleção dos parâmetros adequados de pulso, uma vez que, cada material de base, diâmetro do arame e gás de proteção utilizado, requer uma combinação ideal. A automatização também exige uma maior qualidade no processo, que requer um estudo sobre a variação dos parâmetros no resultado do cordão de solda e durante a fusão. Os parâmetros principais são: corrente de pico ( $I_p$ ), corrente de fundo ( $I_b$ ), tempo de corrente de pico ( $T_p$ ) e tempo de corrente de fundo ( $T_b$ ).

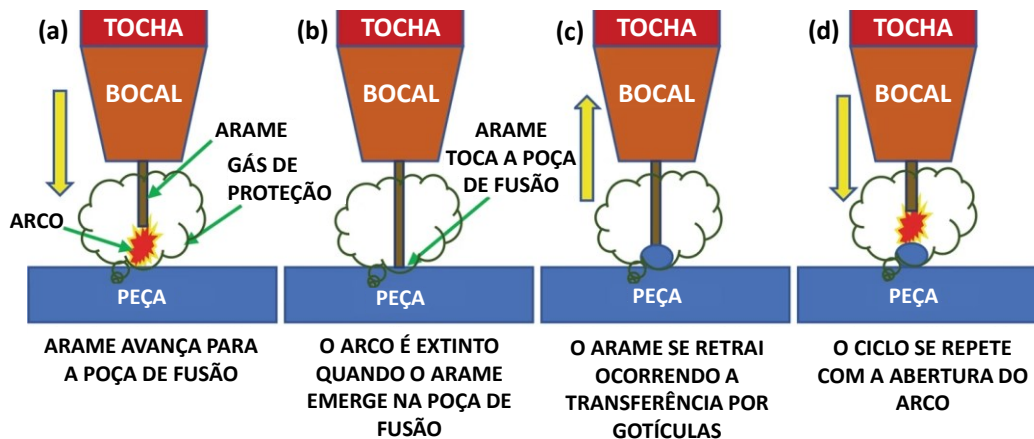
Xu et al. (2022), estudaram a influência de diferentes valores de correntes no cordão de solda pelo processo MIG/MAG pulsado. A solda foi realizada em um substrato de aço Q235 e o material de adição utilizado foi o arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, a distância bico de contato peça e a superfície da peça foi de 17 mm. O gás de proteção utilizado foi o argônio com vazão de 20 L/min. O mesmo ciclo de onda foi empregado em todas as variações de corrente: 80 A de corrente de fundo, 490 A de corrente de pico, tempo de corrente de pico de 0,9 ms, tempo de corrente de base de 2,9 ms e o tempo de subida de 0,6 ms. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que, a forma de onda com uma corrente média de 140 A na queda de corrente possui melhor aparência com uma maior velocidade de soldagem, porém, o aumento da corrente promove um desprendimento precoce do material de adição fundido devido a força eletromagnética, como pode-se observar na Figura 19.



**Figura 19** Aparência do cordão de solda para diferentes formas de onda de corrente (#1 sem corrente média, #2  $I_m = 140$  A e #3  $I_m = 250$  A) (adaptado de XU et al., 2022).

### 2.3.1.1.2 SOLDAGEM CMT

O processo de soldagem *Cold Metal Transfer* (CMT) é uma variação do processo MIG/MAG desenvolvido pela Fronius, na Áustria, em 2004. O processo de transferência ocorre por curto-circuito, onde a ponta do arame entra em contato e emerge na poça de fusão, isso faz com que o arame se retraia ocorrendo a transferência por gotículas, através do desprendimento da gota do arame. Durante a transferência a corrente cai para aproximadamente zero, evitando a geração de respingos, após a conclusão da transferência, ocorre novamente a abertura do arco e a alimentação do arame com o fluxo de corrente, como pode-se observar na Figura 20. O CMT permitiu a soldagem de chapas ultrafinas, e soldagem e brasagem de metais dissimilares, que antes eram impossíveis. Fornecendo também um bom preenchimento para juntas soldadas com grandes lacunas. Os resultados são soldas com bom acabamento e sem defeitos, reduzindo os custos de fabricação e casos de pós-processamento, onde deve-se realizar o acabamento ou a remoção da solda por conta de defeitos. No MIG/MAG convencional, o controle do comprimento do arco ocorre eletronicamente, já no CMT é incorporado no controle do processo, de forma mecânica, ou seja, o arco é extremamente estável, não respondendo às flutuações de tensão, caso ocorra alguma variação no metal base, nas condições da superfície da peça, velocidade de soldagem ou mudança do comprimento do arame (FURUKAWA, 2006).



**Figura 20** Esquema da soldagem CMT (adaptado de KUMARAN et al., 2020).

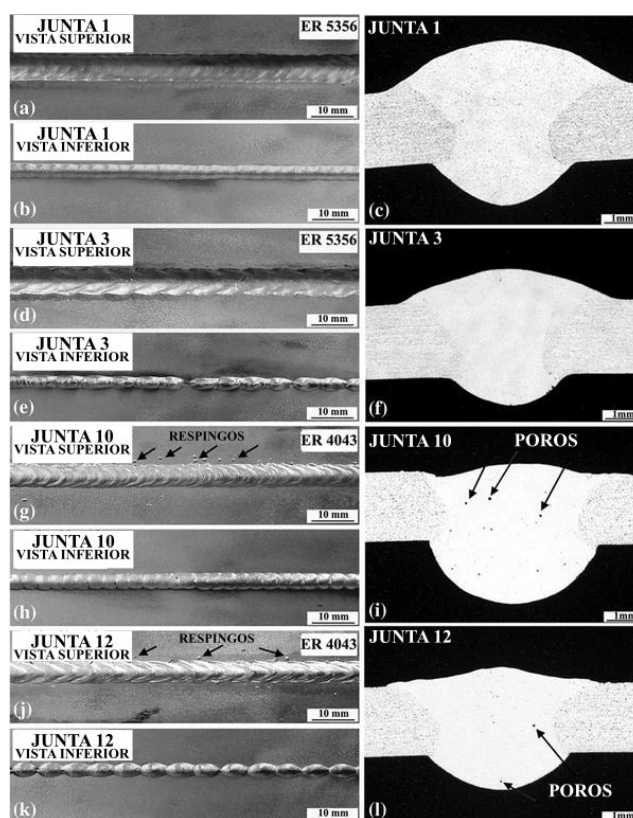
As duas características principais desse processo estão no momento do curto-circuito, onde tem-se uma baixa corrente, ou seja, pouca entrada de calor, ou o controle do curto-circuito de maneira controlada. Esse ciclo é dividido em três fases: corrente de pico, corrente de fundo e curto-circuito. Na corrente de pico, tem-se a abertura do arco e o aquecimento do arame para formação da gotícula. A corrente de fundo é a fase em que é obtido uma corrente mais baixa, a corrente é baixada para evitar a transferência da gotícula líquida formada na ponta do arame, essa fase ocorre até o curto-circuito, onde, a tensão do arco é próxima de zero e ao mesmo tempo tem-se o sinal de retorno no alimentador de arame,



ocorrendo a retração do arame. Nessa fase, ocorre o desprendimento da gotícula da ponta do arame e a transferência para a poça de fusão (SELVI; VISHVASKENAN; RAJASEKARB, 2018).

Esse processo é um novo método que satisfaz algumas exigências na soldagem de chapas específicas, como chapas finas, sendo considerado um processo estável, com alta reprodutividade e bom custo-benefício. O CMT é baseado no controle da corrente e tensão de soldagem pulsada, como visto anteriormente, uma derivação do processo MIG/MAG. Para uma transferência controlada os dois requisitos básicos a serem obtidos são: controle preciso e alta frequência. A retração do arame com precisão facilita o desprendimento controlado da gotícula, evitando respingos e esse movimento repetitivo do arame deve acontecer com alta frequência, aproximadamente 70 gotas por segundos (TALALAEVA et al., 2012).

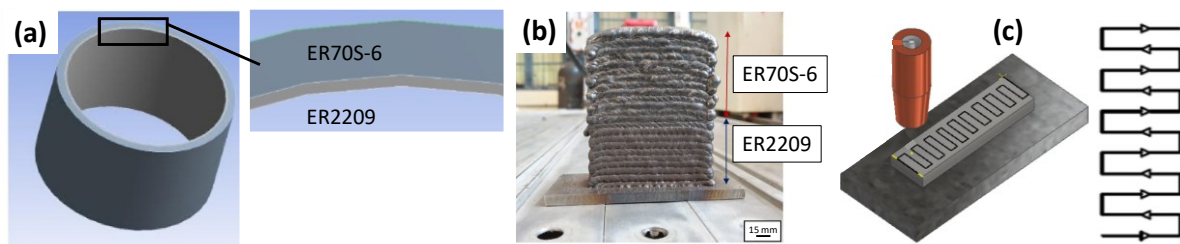
Elrefaey e Ross (2015), estudaram a microestrutura e as propriedades mecânicas da solda em ligas de alumínio similares e dissimilares utilizando o processo de soldagem CMT convencional. Os materiais utilizados foram folhas de liga de alumínio 5182-O e 6082-T4 com espessura de 2 mm, que foram cortadas com dimensões de 250 x 100 mm e colocadas em configuração de junta de topo sem folga. Foi adotado um ângulo de tocha de 10° e o gás de proteção utilizado foi o argônio com uma vazão de 15 L/min. Os arames utilizados foram o ER5356 e o ER4043, e a solda foi realizada em todas as combinações possíveis de metal de base (6082/6082, 6082/5182 e 5182/5182). Para cada combinação foi utilizado diferentes parâmetros de tensão, corrente (55 A, 69 A, 82 A, 90 A, 93 A e 104 A), velocidade de soldagem (10 mm/s, 15 mm/s e 20 mm/s) e taxa de alimentação do arame (4,3 m/min, 5,5 m/min e 6,2 m/min). Na Figura 21, pode-se observar os resultados obtidos, onde o tamanho do cordão de solda é influenciado pela entrada de calor, que deve ser escolhida para se obter a penetração total e fusão suficiente, mas também não pode ser muito alta, para diminuir a distorção da solda e a transformação de fase nas zonas termicamente afetadas. A penetração total e contínua está presente nas juntas com alto aporte de calor (Figura 21b e h) e a penetração foi interrompida nas juntas com aporte de calor baixo (Figura 21e e k). Os autores concluíram que, o uso do material de adição ER5356 na soldagem da chapa de liga 5182 é melhor do que o ER4043, por conta da baixa produção de Mg e Si na solda. As juntas possuem alta dureza, ductilidade e resistência. Para a liga 6082, ambos os materiais de adição foram compatíveis.



**Figura 21** Perfis do cordão e macroestruturas transversais de juntas representativas das amostras 6082/6082 com parâmetros variados (adaptado de ELREFAEY e ROSS, 2015).

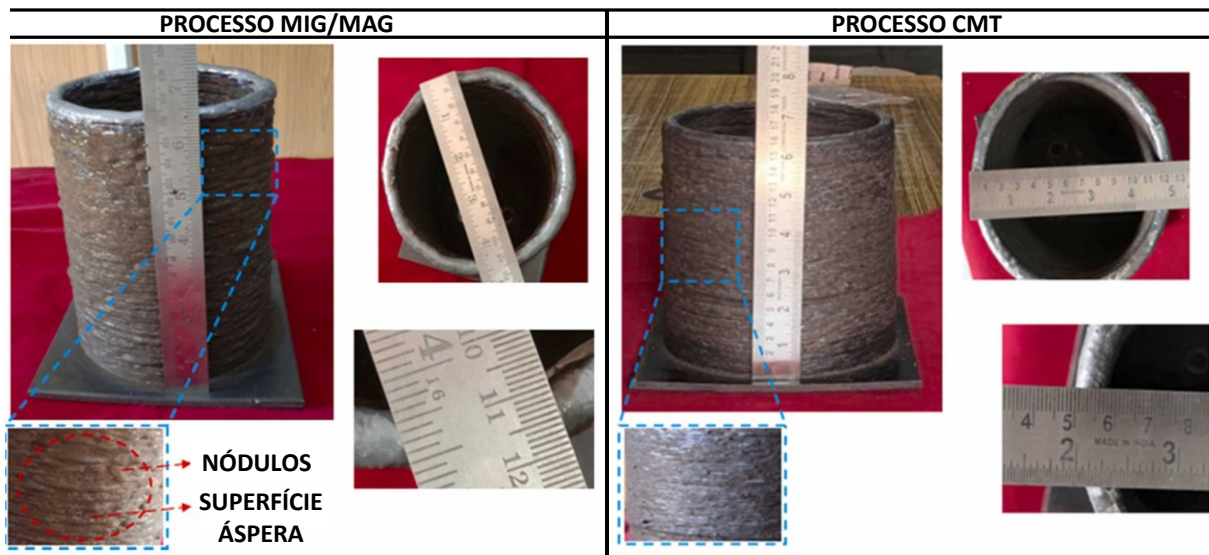
### 2.3.2 PROCESSO CMT NA MANUFATURA ADITIVA

Chandrasekaran, Hari e Amirthalingam (2020), realizaram um estudo de um FGM (*Functionally Graded Materials*) fabricado pelo processo CMT convencional e compararam com o FGM utilizado atualmente de aço carbono manganês X-52. O FGM é uma parte tubular conhecida como *riser*, utilizado na indústria naval, que tem como funcionalidade o transporte de petróleo e gás da boca do poço até a superfície do mar. A falha deste componente resulta em impactos ambientais severos, portanto, deve ser projetado para desempenhar a função pretendida. O presente estudo modifica o material do FGM e utiliza uma combinação dos arames ER70S-6 e ER2209 com diâmetro de 1,2 mm, e os parâmetros de deposição foram otimizados de acordo com o material. Na Figura 22, pode-se observar a combinação proposta para o FGM, a peça obtida e a estratégia de deposição utilizada. Os autores concluíram que a partir dos testes de tração, a resistência ao escoamento e o alongamento são comparáveis aos do material X-52, enquanto há um aumento de 6% na resistência mecânica do FGM. O FGM proposto possui diversas vantagens, tanto na resistência quanto na durabilidade, portanto, é considerado um candidato promissor para aplicação desejada.



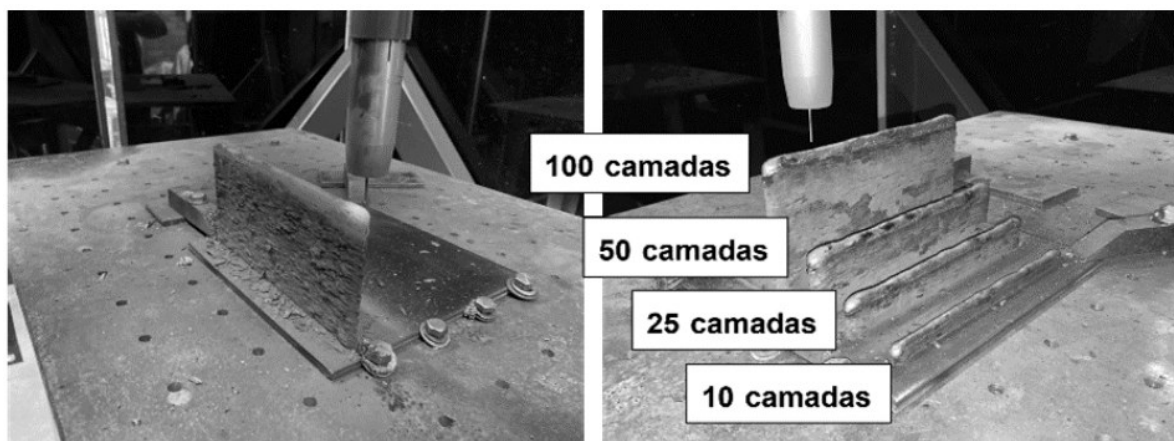
**Figura 22** FGM fabricado pelo processo CMT convencional (adaptado de CHANDRASEKARAN; HARI; AMIRTHALINGAMC, 2020).

Nagasai, Malarvizhi e Balasubramanian (2022), realizaram o estudo do efeito da entrada de calor nas propriedades mecânicas de peças cilíndricas fabricadas pelo processo MIG/MAG convencional e CMT convencional. O material utilizado foi o ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. Devido à alta entrada de calor (0,502 kJ/mm) no processo MIG/MAG convencional, a penetração foi aumentada e observou-se que o componente apresentou menor altura média de camada. No processo CMT convencional, a entrada de calor foi de 0,384 kJ/mm, portanto a superfície do componente é mais consistente devido ao menor aporte térmico e dispersão térmica. Os autores confeccionaram 6 corpos de prova (3 da região inferior e 3 da região superior), no processo MIG/MAG convencional, os resultados mostraram que a região superior possui maior resistência e menor ductilidade (dureza de  $166 \pm 5$  HV<sub>0,5</sub>) do que a inferior (dureza de  $156 \pm 5$  HV<sub>0,5</sub>). E no processo CMT convencional, a região superior possui maior resistência e menor ductilidade (dureza de  $181 \pm 3$  HV<sub>0,5</sub>) em relação a inferior (dureza de  $169 \pm 2$  HV<sub>0,5</sub>). Portanto, a dureza da região superior do componente CMT convencional é 9,03% maior do que o componente MIG/MAG convencional. Da mesma forma, a dureza da região inferior do componente CMT convencional é 8,33% maior do que o componente MIG/MAG convencional. O componente fabricado por CMT convencional possui resistência de 14,68% maior na região inferior e 21,70% maior na região superior, em comparação com o componente fabricado por MIG/MAG convencional. Os autores concluíram que, essas propriedades foram superiores no processo CMT convencional, através da análise microestrutural, por conta da redução do tamanho do grão, e devido a retração do arame que reduziu a entrada de calor e aumentou a taxa de resfriamento. Na Figura 23, pode-se observar os componentes cilíndricos fabricados, a superfície do componente fabricado por MIG/MAG convencional apresenta superfície áspera e nódulos evidentes, e a superfície do componente confeccionado pelo método CMT convencional apresenta-se clara e homogênea, sem desenvolvimento de nódulos.



**Figura 23** Fotografias dos componentes cilíndricos de aço carbono fabricados (adaptado de NAGASAI; MALARVIZHI; BALASUBRAMANIAN, 2020).

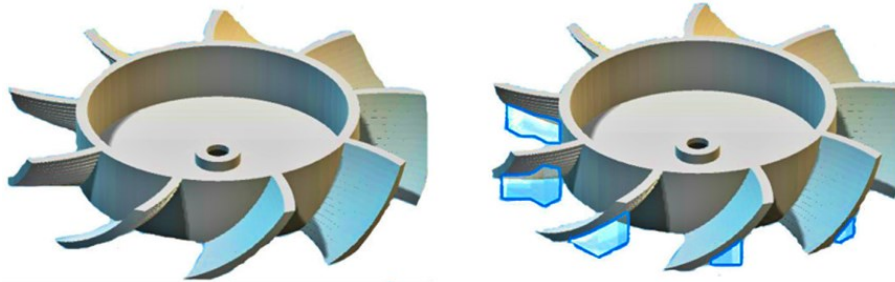
Liskevych et al. (2023), realizaram um estudo da análise experimental de tensões residuais em peças fabricadas por MADA via CMT convencional. Neste estudo, os autores realizaram a deposição de paredes de 10, 25, 50 e 100 camadas, como pode-se observar na Figura 24, com o arame ER70S-6 de 1,20 mm de diâmetro utilizando a estratégia de deposição bidirecional e arco contínuo. Para realizar a medição das tensões residuais foi utilizada a técnica semidestrutiva *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). Em cada amostra, furos de 0,8 mm de diâmetro e 0,4 mm de profundidade eram abertos a cada 8,5 mm na superfície do material, com isso o software do equipamento fornece as tensões longitudinais e transversais. A partir dos resultados obtidos, os autores afirmaram que independentemente da quantidade de camadas, a magnitude das tensões residuais tende a diminuir com a profundidade da medição. Também foi observado que as tensões no substrato são dependentes da quantidade de camadas depositada, ocorrendo tensões trativas na parede de 10 camadas e compressivas para as demais, também foi relatado a tendência de tensões trativas nas camadas intermediárias e compressivas nas camadas superficiais, exceto para a parede de 10 camadas. Os autores concluíram que, esse estudo é importante para indicar nas tensões trativas eventual fadiga do material, e onde ocorre a incidência de tensões compressivas podem ocorrer deformações dos componentes.



**Figura 24** Paredes fabricadas por MADA (LISKEVYCH et al., 2023).

## 2.4 ESTRATÉGIAS DE DEPOSIÇÃO PARA MANUFATURA ADITIVA

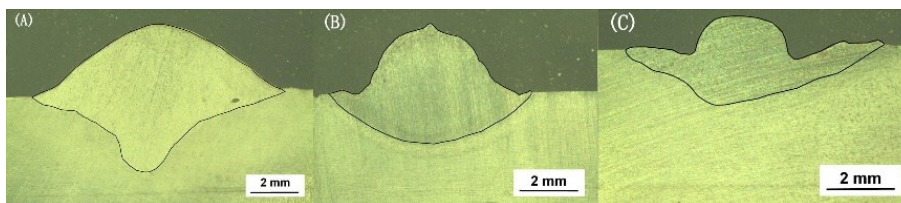
Alinhado com o desenvolvimento das técnicas de MA, em particular a fabricação de peças metálicas, surge a possibilidade de usar essas técnicas como processo de fabricação na substituição dos meios convencionais. O método de deposição ocorre camada por camada, e isso pode levar a alguns problemas quando uma nova camada possui uma geometria diferente da camada anterior. Na Figura 25, pode-se observar esse problema, onde foi necessário a utilização de suportes para a impressão. Esses suportes precisam ser retirados por um processo alternativo, gerando custo e desperdício de material. À medida que esses problemas surgem, uma nova demanda de estratégias é necessária para viabilizar a MA de componentes complexos (JIANG; XU; STRINGER, 2018).



**Figura 25** Utilização de suportes (adaptado de JIANG; XU; STRINGER, 2018).

A MA multidirecional surge com o potencial de deposição em saliências sem a utilização de suporte, aumentando a eficiência do processo (YUAN et al., 2021). Yang et al. (2003), analisaram um novo método de deposição que minimiza a necessidade da utilização de estrutura de suporte. Esse método consiste em um bocal acoplado em um robô com graus de liberdade que permite a deposição em um ângulo de inclinação máximo de 45°, o método proposto permitiu a fabricação multidirecional de polímeros, e foi demonstrado que a qualidade da superfície da peça e a eficiência foram aprimoradas. Segundo os autores, os polímeros foram utilizados por conta da baixa densidade e alta tensão superficial. Em alguns processos, como SLS e LOM, as peças estão submersas pelo material bruto ao longo da fabricação, que servem de apoio da estrutura, eliminando a necessidade de suporte.

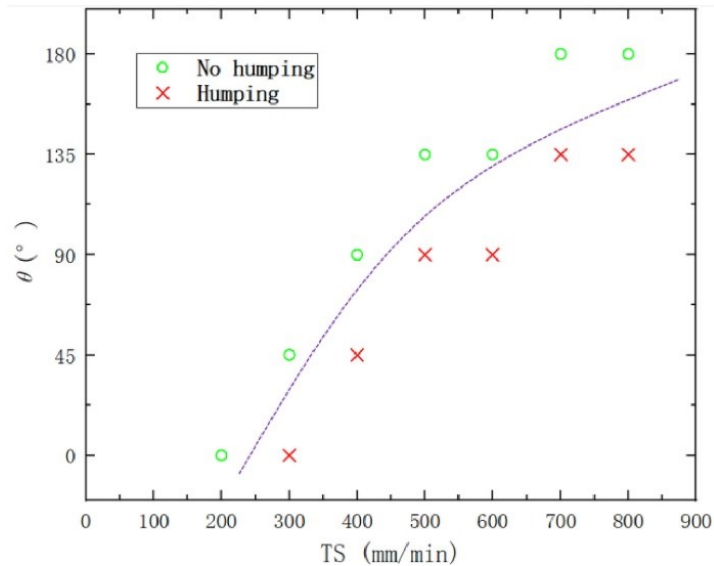
Em alguns processos multidirecionais, como o processo MADA, a qualidade da geometria das camadas nas partes salientes pode deteriorar-se por conta do efeito *humping*. Esse efeito ocorre em processos de soldagem por fusão quando é utilizada altas taxas de velocidade de deslocamento, sendo caracterizado, como ondulações periódicas no cordão de solda, que pode ser observado na Figura 26. Esse efeito limita a velocidade de soldagem, afetando a eficiência do processo (WU et al., 2017).



**Figura 26** Seções transversais das soldas: (a) Processo MIG/MAG de velocidade normal, (b) *hump* no processo MIG/MAG de alta velocidade, (c) Rebaixo no processo MIG/MAG de alta velocidade (WU et al., 2017).

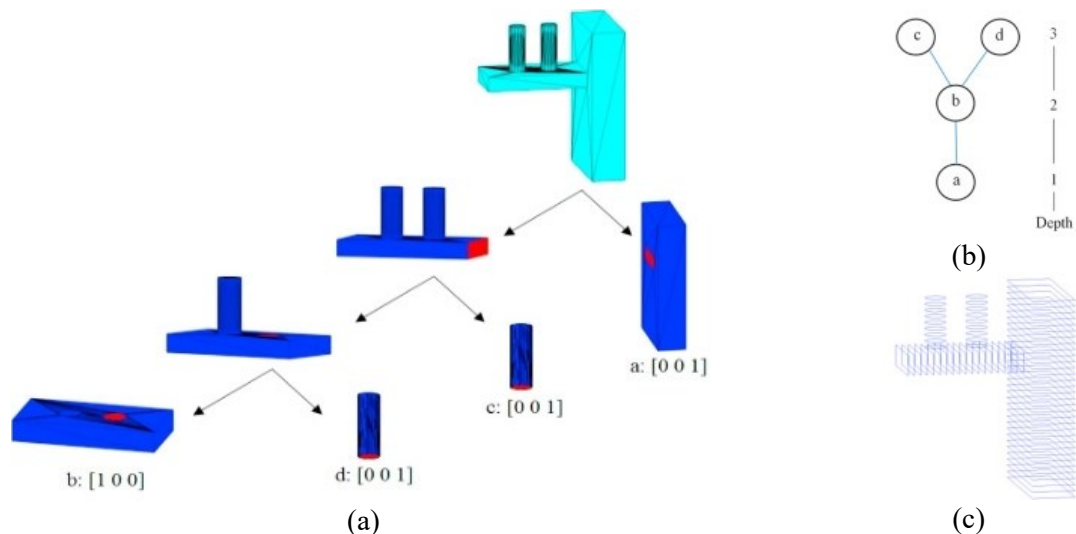
Yuan et al. (2020), estudaram o efeito *humping* no processo CMT na deposição multidirecional. Além da análise dos efeitos, os autores forneceram algumas diretrizes em relação a seleção de parâmetros adequados. Para evitar o *humping* a escolha da velocidade de deslocamento e a posição angular de deposição são parâmetros críticos, na Figura 27, pode-se observar o mapa de *humping*, que descreve a ocorrência desse efeito com base nos resultados experimentais. Pode-se observar que, a velocidade de deslocamento máxima aumenta com o aumento do ângulo. Adebayo, Mehnen e Tonnellier (2012), investigaram o *humping* utilizando o processo CMT, e nas condições utilizadas foi identificado a ocorrência desse efeito a partir de uma velocidade de 600 mm/min.





**Figura 27** Mapa de *humping* proposto da velocidade de deslocamento (TS) em função da posição angular de deposição ( $\theta$ ) (YUAN et al., 2020).

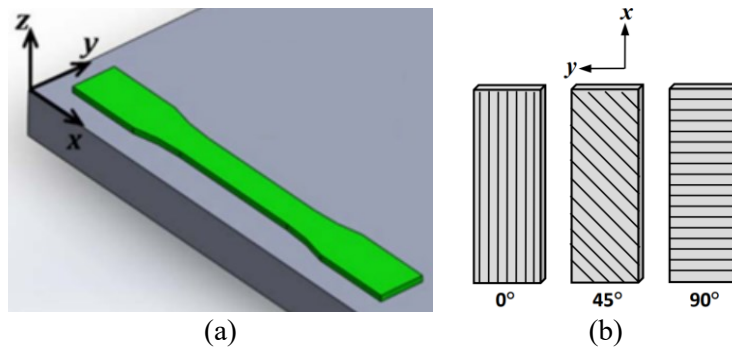
Segundo Ding et al. (2016), um dos desafios principais na MA multidirecional é o desenvolvimento de algoritmos que são capazes de realizar o fatiamento de um modelo 3D em camadas, que vão satisfazer a deposição sem suporte e sem colisão. Os autores apresentam um modelo diferente dos existentes atualmente, onde, o modelo CAD é dividido em subvolumes através de um método simples de decomposição em curvaturas. Em seguida, é utilizada as informações de topologia para mesclá-los em grupos. Ding et al. (2016) concluíram que a estratégia proposta é simples e eficiente, principalmente em peças com geometria que possui grandes quantidades de furos.



**Figura 28** Etapas do processo proposto: (a) Decomposição progressiva de um exemplo em subvolumes com suas próprias direções de construção, (b) agrupamento de subvolumes com estrutura em árvore de profundidade e (c) divisão do modelo ao longo de várias direções de construção (adaptado de DING et al., 2016).

Ziemian et al. (2014), realizaram um estudo de fadiga do ABS depositado em diferentes direções por FDM, como pode-se observar na Figura 29. Os autores concluíram que as amostras possuem comportamento anisotrópico. Os limites máximos de resistência à tração foram encontrados para as amostras depositadas na orientação  $0^\circ$  de forma unidirecional. A tração começa a diminuir à medida que o ângulo aumenta e o comportamento torna-se mais dependente das ligações entre as fibras. Os corpos de prova fabricados usando um padrão de hachura de  $+45^\circ/-45^\circ$  em relação à direção de carregamento, tiveram uma vida em fadiga mais alta. E para amostras unidirecionais, foi obtido uma fadiga menor quando a tensão é aplicada perpendicularmente a direção de deposição e maior quando aplicada na

direção de deposição. Portanto, o estudo é importante para mostrar que a direção de deposição afeta de forma significativa as propriedades mecânicas da peça fabricada.

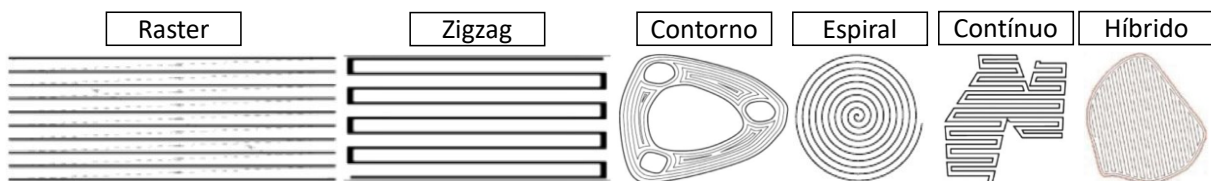


**Figura 29** Estratégias de deposição para o estudo de fadiga: (a) Orientação de construção por FDM e (b) direções de deposição (ZIEMIAN et al., 2014).

Wu et al. (2015), investigaram a influência da espessura da camada e do ângulo da direção de deposição nas propriedades mecânicas de amostras fabricadas por MA. Os ângulos foram variados em: 0°, 30° e 45°. E a espessura foi variada em 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ . Os resultados mostraram que, as melhores propriedades mecânicas foram obtidas em amostras com espessura de camada de 300  $\mu\text{m}$  e com ângulo de deposição de 0° e 90°. Wu et al. (2015), afirmam que a espessura da camada tem grande influência na resistência a tração e pouca influência nas resistências a compressão e flexão. Como esperado, as amostras com cargas paralelas à direção de deposição possuem maiores resistências. A resistência a compressão em amostras impressas é menor do que amostras fabricadas por métodos convencionais, pois as amostras impressas estão sujeitas a descontinuidades e fraca ligação entre as camadas. Essa ligação é responsável pela baixa resistência a flexão, causando delaminação das camadas. À medida que ocorre o aumento da espessura da camada, tem-se uma diminuição na precisão geométrica, uma vez que, a impressão de uma nova camada ocorre na superfície da camada anterior antes da solidificação, o que leva ao encolhimento da camada anterior.

#### 2.4.1 MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

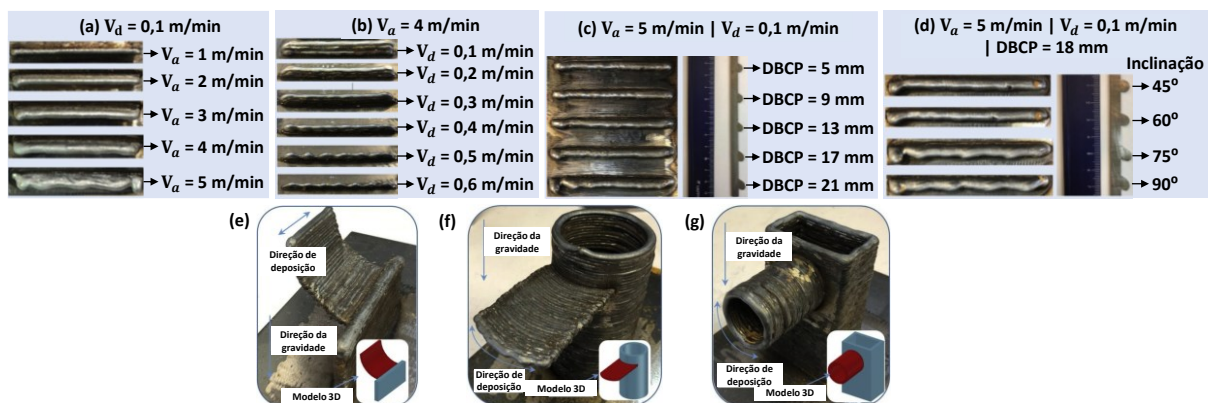
Para preencher as camadas no processo MADA, muitos padrões de caminhos foram desenvolvidos, como pode-se observar na Figura 30, esses padrões devem ser selecionados de acordo com o limite da geometria da peça e os padrões de contorno. Esses caminhos podem ser combinados ou variados ao longo da impressão. O contorno é muito utilizado em peças metálicas por conta da preocupação com as propriedades mecânicas e para evitar os problemas anisotrópicos, já o padrão *raster* exige que a peça seja girada ao longo da impressão por conta da construção unidirecional (DING et al., 2015).



**Figura 30** Resumo dos métodos de geração de caminho das camadas: (a) *raster*, (b) zigzag, (c) contorno, (d) espiral, (e) contínuo e (f) híbrido (adaptado de DING et al., 2015).

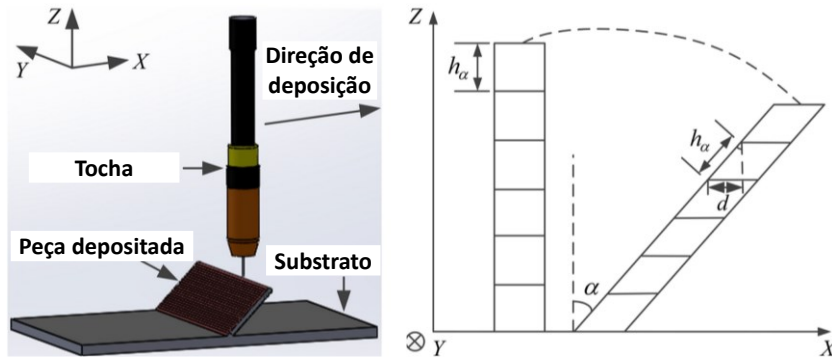
Yuan et al. (2021), estudaram a fabricação de peças metálicas com estruturas salientes através do processo CMT *advanced*. O material utilizado foi o arame ER70S-6, com diâmetro de 0,9 mm, e o gás de proteção utilizado foi Ar+20CO<sub>2</sub> com uma vazão 18 l/min. Os parâmetros investigados no processo foram os seguintes: Velocidade de Alimentação do Arame ( $V_a$ ), Velocidade de Deslocamento da Tocha ( $V_d$ ), Distância Bico de Contato Peça (DBCP) e inclinação da tocha. Para garantir uma variação controlada na altura do cordão ao longo do percurso, foi empregada a deposição bidirecional. Na análise do deslocamento da tocha, como pode ser observado na Figura 31a, os autores variaram a  $V_a$  de 1,0 e 5,0 m/min, mantendo a  $V_d$  constante em 0,1 m/min. Resultados favoráveis foram obtidos para baixos valores de  $V_a$  enquanto geometrias irregulares foram observadas em 5 m/min. Isso ocorre devido à

diminuição da tensão superficial causada pelo aumento da temperatura, o que compromete a estabilidade da poça de fusão. Ao analisar o efeito da velocidade de alimentação do arame, como pode-se observar na Figura 31b, os autores variaram a velocidade de deslocamento da tocha de 0,1 m/min a 0,6 m/min, com a  $V_a$  mantida constante em 4 m/min. Segundo os autores, o aumento do  $V_d$  resulta em uma redução do volume depositado e da entrada de calor, contribuindo para o aumento da tensão superficial. Entretanto, quando o  $V_d$  atinge 0,4 m/min, o cordão se deteriora. Na análise da DBCP, como ilustrado na Figura 31c, onde a distância bico de contato peça foi variada de 5 mm a 21 mm, os resultados revelaram que o aumento do DBCP resulta em cordões irregulares, por conta do aumento da entrada de calor. E por fim, os autores estudaram os efeitos da variação da inclinação da tocha de 45° até 90°, conforme ilustrado na Figura 31. O metal fundido cede à medida que o ângulo aumenta, indicando que uma geometria mais precisa é alcançada com ângulos menores. Para avaliar o melhor desempenho dos parâmetros propostos, três cenários foram empregados na fabricação de peças complexas com saliências. O primeiro cenário, como ilustrado na Figura 31e, envolve uma parede com curvatura depositada inclinadamente sobre outra parede. No segundo cenário, como pode-se observar na Figura 31f, uma parede horizontal curvada é depositada em um cilindro. No terceiro cenário, como ilustrado na Figura 31g, um cilindro é depositado sobre um cubo.

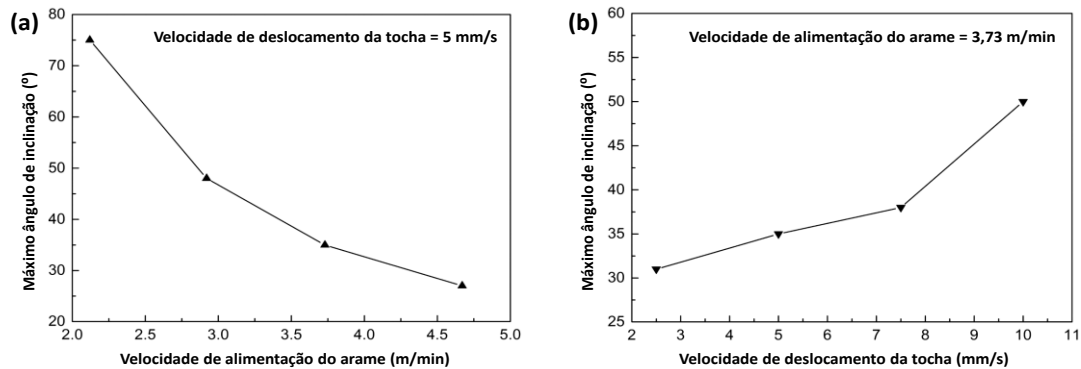


**Figura 31** Resultado da geometria das camadas depositadas com variações de parâmetros e os três cenários propostos (adaptado de YUAN et al., 2021).

Xiong et al. (2017), realizaram um estudo referente a fabricação de peças inclinadas pelo processo GMAW. Ao longo do processo, a tocha foi mantida de forma perpendicular da mesa e foram discutidos alguns parâmetros, sendo eles, a distância de deslocamento, taxa de alimentação do arame e velocidade de deslocamento. O arame utilizado foi o H08Mn2Si com 1,2 mm de diâmetro. Na Figura 32, pode-se observar um diagrama esquemático de deposição em uma peça inclinada, o eixo Z corresponde à altura de deposição, o eixo X é a distância de deslocamento da tocha e o eixo Y é o comprimento de deposição. Analisando o efeito da distância de deslocamento, os autores variaram em 0 mm, 0,5 mm e 1,0 mm a distância e a taxa de alimentação do arame foi mantida em 3,73 m/min e a velocidade de deslocamento em 5 mm/s. Nesse caso, com o aumento da distância de deslocamento é possível obter maiores ângulos de inclinação, para uma distância de 1,0 mm o ângulo máximo de inclinação é de 35°, como pode-se observar na Figura 33. Na análise da taxa de alimentação do arame foi mantida a velocidade de deslocamento em 5 mm/s e a alimentação do arame variada de 2,12 m/min para 4,67 m/min. Os autores concluíram que, com o aumento da taxa de alimentação tem-se uma diminuição do ângulo máximo de inclinação, variando de 75° a 27°, nesse experimento. A velocidade de deslocamento foi variada entre 2,5 mm/s e 10 mm/s e a taxa de alimentação foi fixada em 3,73 m/min, nesse caso, os autores concluíram que o ângulo de inclinação é diretamente proporcional com a velocidade de deslocamento, variando de 31° a 50°. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 33.

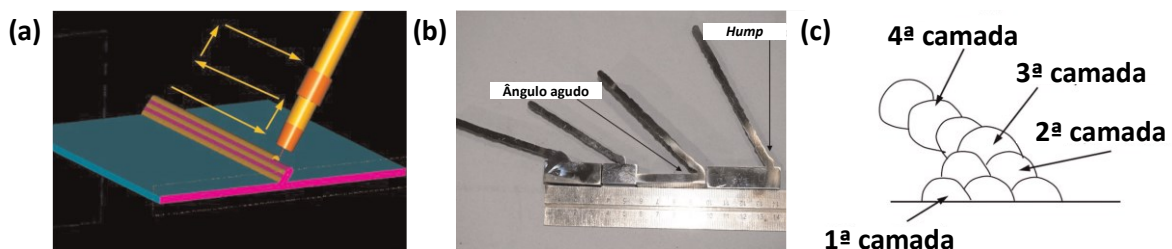


**Figura 32** Diagrama esquemático de deposição da peça inclinada, onde  $\alpha$  é o ângulo de inclinação,  $d$  é a distância de deslocamento e  $h_\alpha$  é a altura da camada da parede inclinada (XIONG et al., 2017).



**Figura 33** Variação do ângulo máximo de inclinação em função da (a) velocidade de alimentação do arame e (b) velocidade de deslocamento da tocha (XIONG et al., 2017).

O processo MADA permite a deposição em camadas de uma estrutura inclinada sem a necessidade de manipulação da peça, como foi descrito por Kazanas et al. (2012), onde foi realizada a impressão de paredes em diversos ângulos utilizando a tocha na posição inclinada, como pode-se observar na Figura 34a. Kazanas et al. (2012), utilizaram o arame ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm. Foram produzidas 4 paredes com tamanhos de 200 mm de comprimento, 60 mm de altura e espessura variando entre 4 mm e 5 mm, com ângulos de inclinação de 15°, 30°, 45° e 60°. Na deposição de ângulos menores ocorre a formação de protuberâncias por conta da distância da base e da parede, além disso o ângulo agudo atua como um gerador de tensões. Para resolver esse problema, os autores depositaram a primeira camada com 3 cordões, a segunda com 2 cordões e a terceira em diante com apenas 1 cordão, como pode-se observar na Figura 34c. Com essa técnica, foi possível eliminar o efeito hump, criar um raio no lugar do ângulo agudo e aumentar a possibilidade de usinagem no acabamento. Kazanas et al. (2012) concluíram que, a técnica CMT permite a deposição de paredes inclinadas na faixa de 15° até 90°.



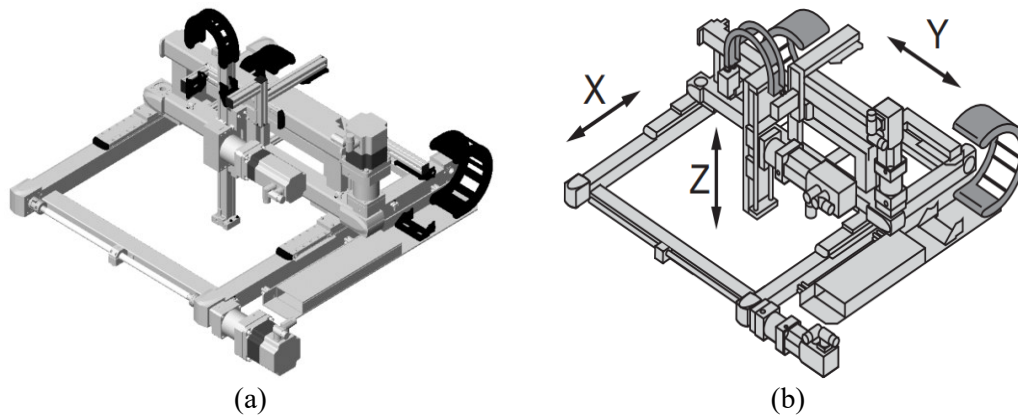
**Figura 34** Estratégia de deposição de paredes inclinadas (KAZANAS et al., 2012).



## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

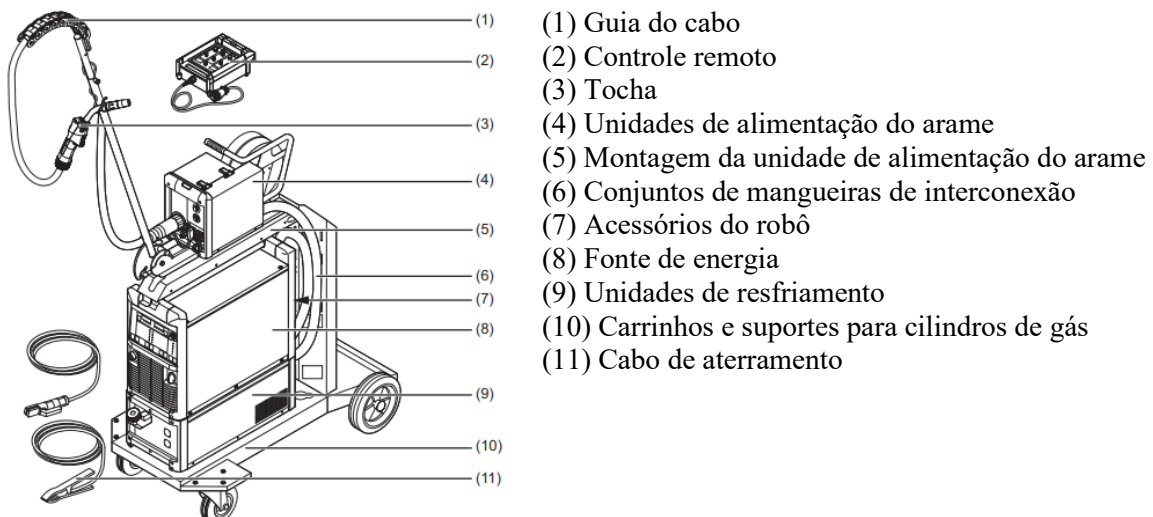
### 3.1 EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

Para realizar as deposições foi utilizado o robô cartesiano MAXR23-S42-H42-C42 da Schneider Electric, como pode ser observado na Figura 35a, que possui 3 graus de liberdade linear (eixos X, Y e Z), conforme ilustrado na Figura 35b, e é operado por motores independentes. Esse robô possui limitações de trabalho de 800 mm nos eixos X e Y, e 500 mm no eixo Z, com uma resolução de 0,1 mm (FERNANDES, 2016; NETO, 2018 e MENDES, 2019).



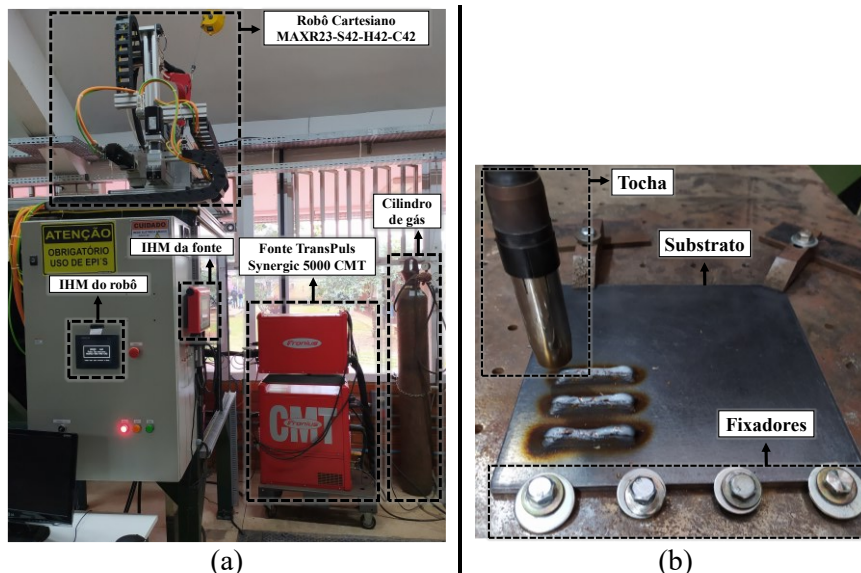
**Figura 35** Robô cartesiano MAXR23-S42-H42-C42 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2021).

Na Figura 36, tem-se a fonte TransPuls Synergic 5000 CMT da Fronius, a qual foi utilizada. Ao longo de todo o experimento, foi importante a utilização de todos os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), e para monitorar a temperatura de interpasse, utilizou-se um termômetro digital infravermelho com mira a laser da KLX, que possui resolução de 0,10 °C e faixa de temperatura de -50°C até 380°C.



**Figura 36** Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (FRONIUS, 2020).

O quadro de comando do robô possui sinaleiros (indicando o estado ligado/desligado e movimentação do robô) e uma Interface Homem Máquina (IHM) da fonte e do robô, que podem ser observados na Figura 37a. A programação do caminho que a tocha vai percorrer ao longo das deposições foi realizada por meio de código G, que podem ser verificados no APÊNDICE A, e o software SoMachine V4.3 é o responsável por copilar o código para o controlador do robô. As amostras foram depositadas pela tocha no substrato, como ilustrado na Figura 37b, sendo necessário o uso de fixadores para prender o substrato na mesa de trabalho.



**Figura 37** Local de realização do experimento: (a) Equipamentos utilizados e (b) substrato onde as deposições foram realizadas.

O consumível utilizado foi o arame ER70S-6 com 1,20 mm de diâmetro, cuja classificação é definida pela *American Welding Society* (AWS) na norma A5.18. Na Tabela 4, podem-se observar as propriedades mecânicas e a composição química do arame, as quais foram retiradas do catálogo da Bohler Welding, conforme consta no ANEXO A. Também foi utilizado um substrato de aço carbono 1020 com espessura de 6,35 mm e dimensões de 200x200 mm. O gás de proteção recomendado para o processo MIG/MAG é o Argônio (Ar), sendo utilizada a mistura Ar+18% CO<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min. O gás carbônico é utilizado para auxiliar na estabilização do arco, preserva as propriedades químicas e mecânicas do material e melhorar a penetração.

**Tabela 4** Propriedades do arame ER70S-6 (BOHLER WELDING, 2023).

Composição química do arame (wt.-%)		
C	Si	Mn
0,07	0,85	1,5
Propriedades mecânicas do arame		
Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
450 (≥ 420)	575 (500 – 640)	30 (≥ 22)

### 3.2 ETAPAS EXPERIMENTAIS

A preparação do experimento iniciou-se com a limpeza do substrato, o que é importante para eliminar os óxidos da superfície que podem reagir com a poça de fusão e causar defeitos na camada. Logo após, realizou-se o lixamento e a fixação do substrato na mesa de trabalho para garantir que não ocorresse deslocamento durante a deposição. Antes de iniciar qualquer operação no robô, o computador e a fonte (com o arame ajustado) devem estar ligados, e o gás deve estar aberto.

No IHM do robô, os drivers foram adicionados, conforme mostrado na Figura 38a, e posteriormente deve-se acionar a opção *Auto-Homing*, que faz o robô buscar as posições zero de cada eixo. No IHM da fonte, como pode ser visualizado na Figura 38b, o processo CMT foi selecionado, e a velocidade de alimentação foi ajustada para o valor desejado, com uma correção de arco de 5% ao longo do processo. A tocha pode ser posicionada no local de início de cada deposição através da opção “ajustar posição” no *Setup* de soldagem. A Distância Bico De Contato Peça (DBCP) foi ajustada utilizando um molde, e posteriormente, a opção *Touch Sensing* foi selecionada para deslocar a tocha lentamente até que o arame atingisse o substrato. Por fim, através do software SoMachine V4.3, o código G foi carregado para o controlador e a deposição pôde ser iniciada através do IHM do robô. Ao final de cada deposição, o software da Fronius forneceu os parâmetros médios de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e o tempo de deposição.

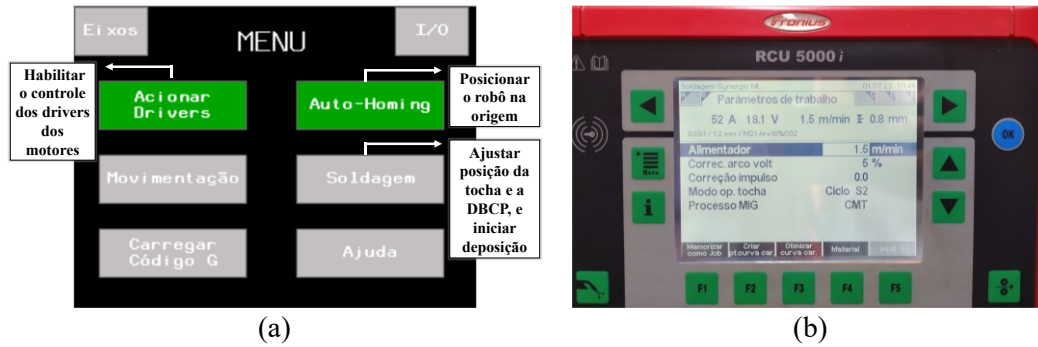


Figura 38 Preparação do experimento: (a) IHM do robô e (b) IHM da fonte RCU5000i.

### 3.3 METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO PRÉ-TESTE E TESTE

O processo utilizado é o CMT convencional. Segundo Furukawa (2006), esse processo possui arco extremamente estável, não respondendo às flutuações de tensão, superfície da peça, velocidade do deslocamento da tocha ou mudança no comprimento do arame. Em comparação com o processo MIG/MAG convencional, o CMT convencional possui maior precisão e menor geração de respingos, devido à retração do arame que resulta no resfriamento da camada em cada ciclo durante a transferência por gotículas.

O método de deposição utilizado é a deposição bidirecional, como pode ser observado na Figura 39a. Essa alternância de direção foi escolhida para evitar grandes variações ao longo do comprimento da camada, resultando em uma superfície mais uniforme, conforme relatado por Novelino, Carvalho e Ziberov (2022). Os autores compararam paredes depositadas de forma bidirecional e unidirecional, concluindo que as paredes na deposição bidirecional possuem uma geometria homogênea de altura e largura, devido à uniformidade na entrada de calor ao longo de toda a camada. Na Figura 39a, podem ser observados os parâmetros utilizados como objeto de estudo nas deposições, tais como o passo fixo, que representa a distância de subida da tocha na direção vertical, DBCP, a Velocidade de Deslocamento da Tocha ( $V_d$ ) na horizontal e na vertical, a Velocidade de Alimentação do Arame ( $V_a$ ), o avanço da tocha na horizontal, como ilustrado na Figura 39b.

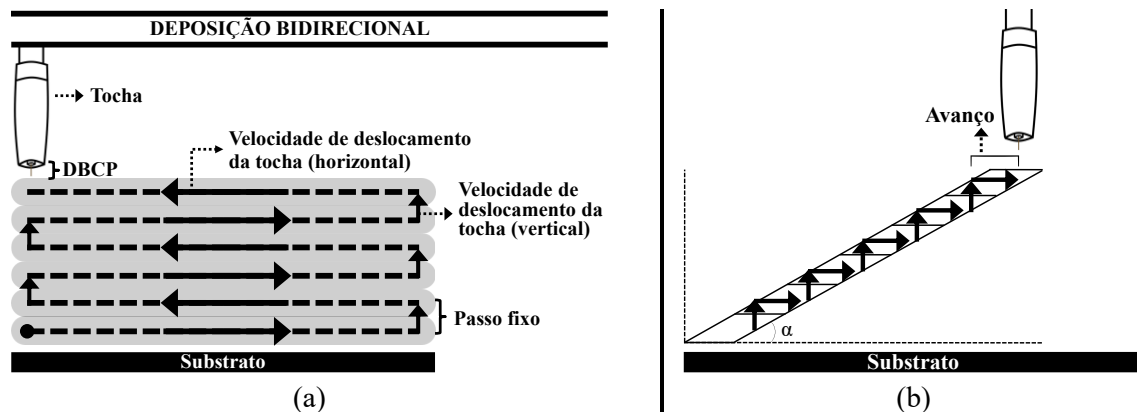
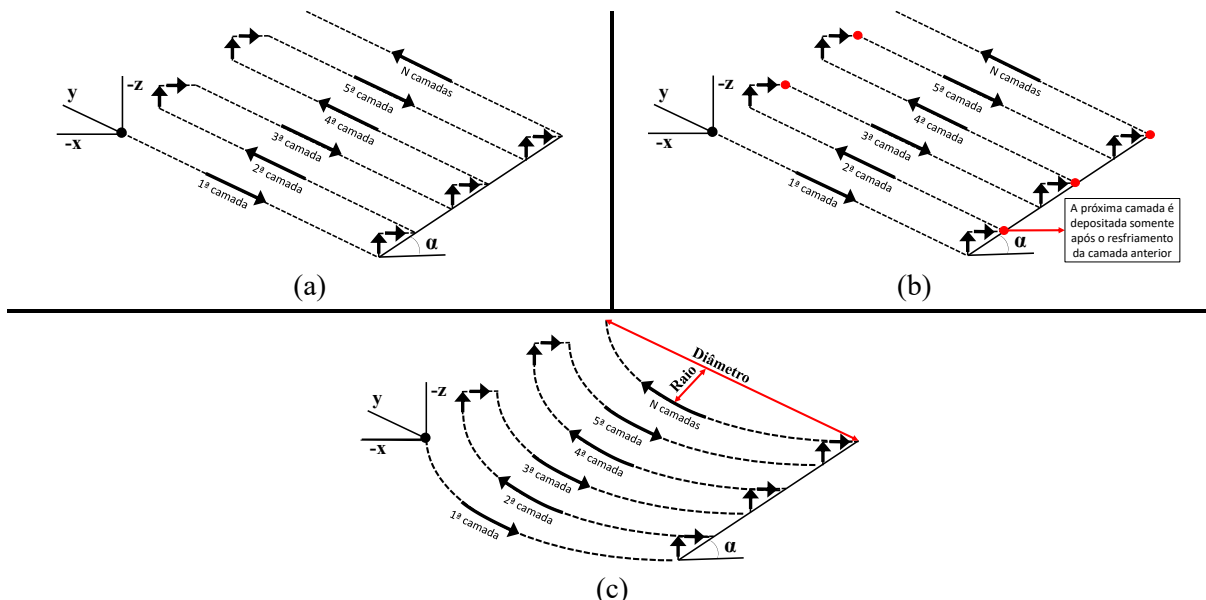


Figura 39 Esquema da metodologia de deposição: Vistas (a) frontal e (b) lateral.

O arco pode ser contínuo ou interrompido. No arco contínuo, a deposição ocorre de forma ininterrupta ao longo de todo o processo, como pode ser visualizado na Figura 40a, enquanto no arco interrompido, a deposição é interrompida em cada camada, sendo retomada somente após o resfriamento até atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 30°C). Isso é feito para evitar o sobreaquecimento durante a deposição da próxima camada, conforme demonstrado na Figura 40b. A temperatura de interpasse foi medida no centro da camada no final e no início de cada deposição. O equipamento utilizado possui o eixo Z com orientação negativa para cima. Portanto, o avanço (eixo X) é um dos responsáveis por definir o ângulo de inclinação da peça. Na Figura 40c, observa-se que a parede curva foi depositada utilizando a mesma metodologia da parede plana com arco contínuo, porém, a geometria é a metade de uma circunferência.



**Figura 40** Vista isométrica do modelo esquemático da metodologia de deposição: Parede inclinada plana com (a) arco contínuo, (b) arco interrompido e (c) parede inclinada curva.

Este trabalho é uma continuação do trabalho de Novelino (2021), que realizou o estudo da geometria de cordões e paredes fabricadas via processo CMT convencional. Em seu trabalho, foram realizados ensaios e análises de paredes de 10, 20 e 100 camadas com comprimento de 160 mm. A parede de 100 camadas foi depositada utilizando os melhores parâmetros obtidos nos ensaios anteriores, os quais serão utilizados como base neste estudo. Os parâmetros médios utilizados pelo autor para a deposição da parede podem ser visualizados na Tabela 5.

**Tabela 5** Parâmetros médios utilizados na deposição da peça (NOVELINO, 2021).

Corrente (A)	Tensão (V)	$V_a$ (m/min)	$V_d$ (mm/s)	Passo fixo (mm)	Deposição	Arco
62	20,6	2,6	8,0 (horizontal) 24,0 (vertical)	1,2	Bidirecional	Contínuo

A partir desses parâmetros médios, foram realizadas deposições pré-teste de 11 paredes inclinadas planas de 10 camadas e 50 mm de comprimento. Com isso, foi determinado os parâmetros adequados para depositar uma parede inclinada plana de 71 camadas e 150 mm de comprimento e duas paredes inclinadas curvas de 57 e 45 camadas, 150 mm de comprimento e raio de 47,75 mm.

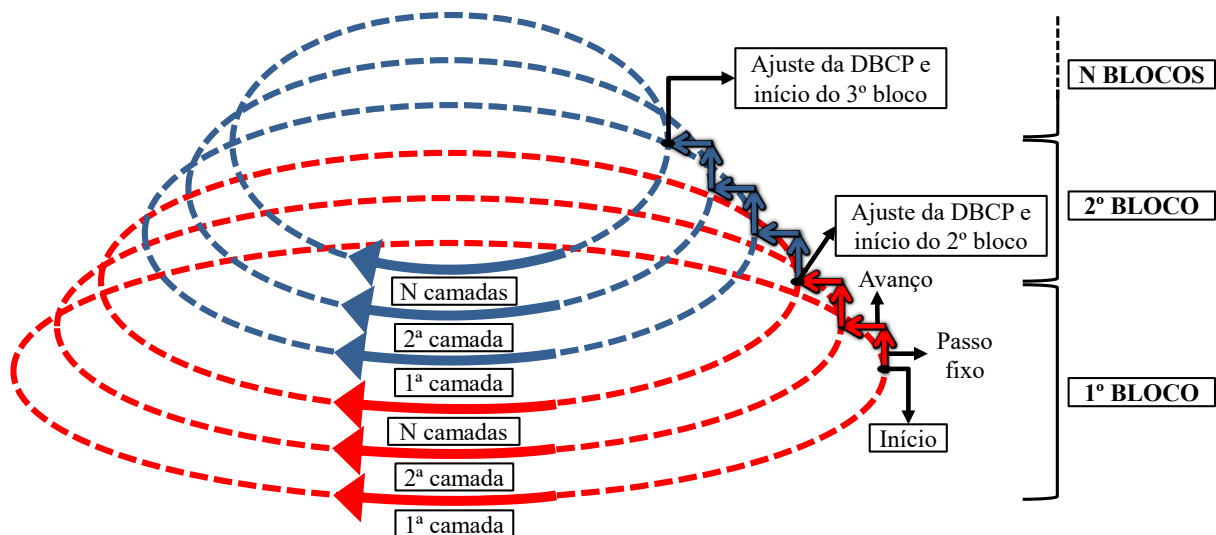
Conforme pode ser observado na Tabela 6, os parâmetros utilizados em todas as deposições foram: DBCP de 12 mm, deposição bidirecional, passo fixo de 1,2 mm e  $V_d$  na vertical de 24,0 mm/s. Os parâmetros que foram objetos de estudo são: avanço, tipo de arco (contínuo ou interrompido),  $V_a$  e  $V_d$  na horizontal. Diferentes valores de DBCP podem afetar a geometria da camada, portanto, esse valor deve ser selecionado levando em consideração o comprimento do arco (distância do substrato até a extremidade do arame) e o comprimento do arame (a partir do bico até o arco). Conforme analisado por Yuan et al. (2021), maiores valores de DBCP podem resultar em geometrias irregulares devido ao aumento da entrada de calor.

**Tabela 6** Parâmetros utilizados nas deposições pré-teste e teste.

PARÂMETROS FIXOS			
DBCP (mm)	Deposição	Passo fixo (mm)	Velocidade de deslocamento da tocha na vertical (mm/s)
12	Bidirecional	1,2	24
PARÂMETROS UTILIZADOS COMO OBJETOS DE ESTUDO			
Avanço (mm)	Arco (contínuo e interrompido)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de deslocamento da tocha na horizontal (mm/s)

### 3.4 METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DO CONE

Nas paredes depositadas no ensaio teste, foi constatado que a DBCP afeta de forma significativa a qualidade superficial ao longo da deposição. À medida que a peça é depositada, a DBCP aumenta, ocorrendo maior entrada de calor e resultando na interrupção do arco. As paredes curvas depositadas possuem aproximadamente 20 camadas com boa qualidade superficial e, em sequência, apresentam maior largura, menor altura e alguns defeitos. Por conta disso, a estratégia utilizada para deposição do cone é a deposição por blocos a cada 20 camadas, o que pode ser visualizado na Figura 41. Esse processo consiste na deposição de um bloco de 20 camadas e, em sequência, é realizado o ajuste da DBCP em 12 mm. O processo continua na deposição do bloco seguinte, realizando o ajuste da DBCP no final da deposição.



**Figura 41** Esquema da metodologia de deposição do cone.

Conforme é possível visualizar na Tabela 7, foi utilizado o avanço de 0,5 mm a cada camada, com um passo fixo de 1,2 mm, e a DBCP era ajustada em 12 mm após a deposição de cada bloco. A direção de deposição foi unidirecional. O arco era interrompido a cada bloco, e a velocidade de deslocamento da tocha foi de 8,0 mm/s na horizontal e 24,0 mm/s na vertical.

**Tabela 7** Parâmetros utilizados na deposição do cone.

Avanço (mm)	Passo fixo (mm)	DBCP (mm)	Deposição	Arco	V <sub>d</sub> (mm/s)
0,5	1,2	12	Unidirecional	Interrompido a cada bloco	8,0 (horizontal) 24,0 (vertical)

Utilizando as mesmas medidas da parede curva anteriormente depositada, o cone possui 96 camadas, com um raio de 47,75 mm na primeira camada e 0,25 mm na última camada, conforme é evidenciado na Tabela 8.

**Tabela 8** Medidas utilizadas na deposição do cone.

Bloco	Camadas	Raio da primeira camada (mm)	Raio da última camada (mm)
1º	20	47,75	38,25
2º	20	37,75	28,25
3º	20	27,75	18,25
4º	20	17,75	8,25
5º	16	7,75	0,25



### 3.5 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

Na Figura 42, pode-se observar um fluxograma de todas as etapas seguidas ao longo do experimento, desde a preparação do experimento até a análise dos resultados. Pode-se observar na deposição pré-teste, os passos seguidos para deposição de 11 paredes inclinadas até chegar no parâmetro adequado para deposição de uma parede inclinada plana de 71 camadas, duas paredes inclinadas curvas de 57 e 45 camadas e um cone de 96 camadas.

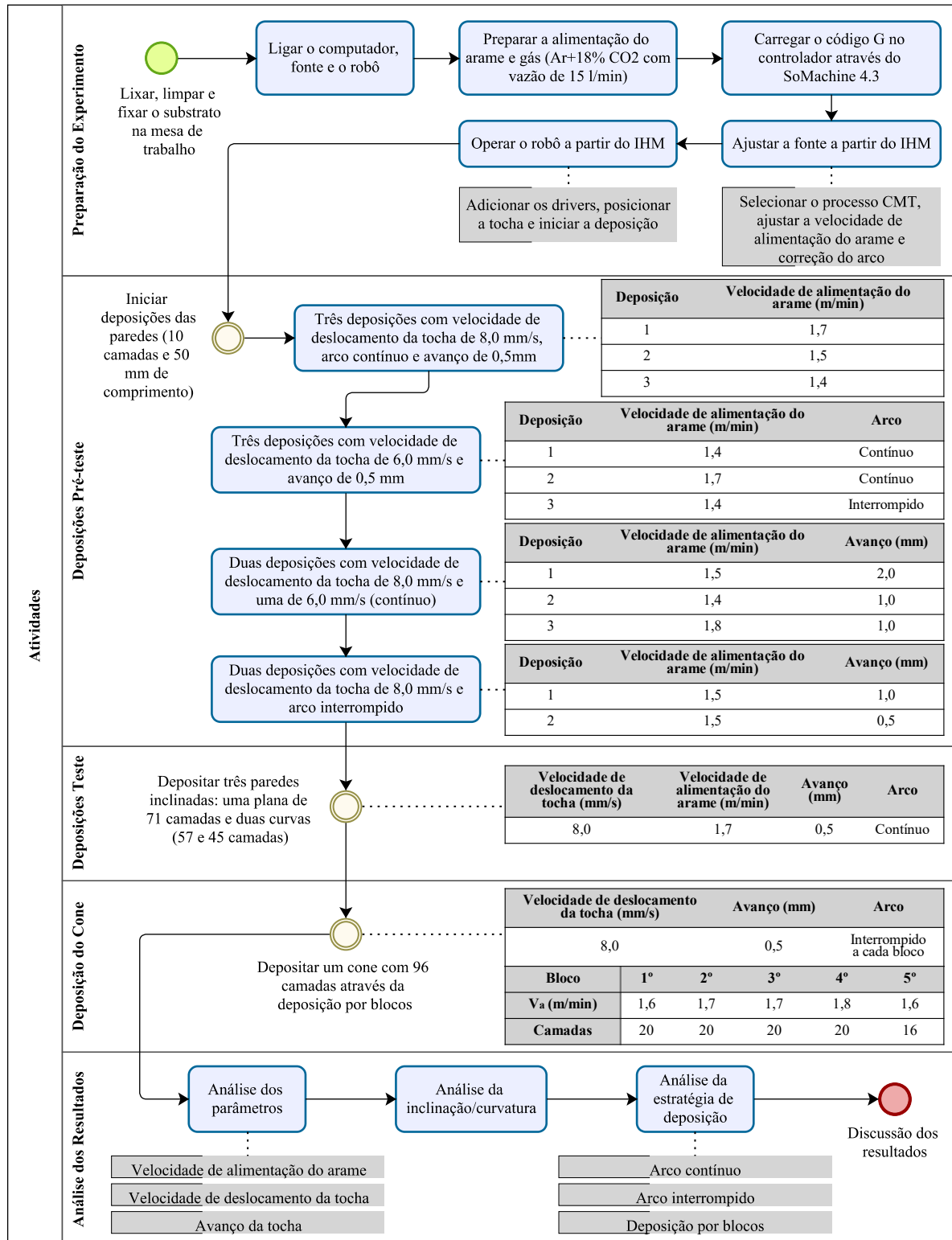


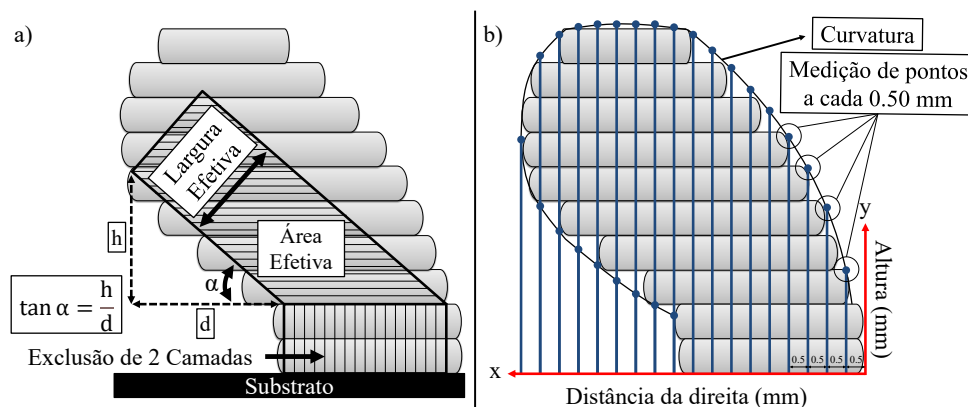
Figura 42 Fluxograma de atividades.

### 3.6 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Não foi encontrada nenhuma norma para realizar a medição de ângulos de peças fabricadas por MADA, na posição plana. Alguns autores realizaram essa medição utilizando diferentes métodos, como relatado por Xiong et al. (2017), que efetuaram a medição levando em conta exclusivamente a largura efetiva da peça, enquanto o ângulo de inclinação da seção transversal é calculado como a média dos ângulos inferiores e superiores da área efetiva. Yan et al. (2021) excluíram as primeiras cinco camadas depositadas e, ao focar apenas na região efetiva, determinaram o ângulo com base nas dimensões da largura e altura da parede. Kazanas et al. (2012) utilizaram a tocha inclinada para depositar paredes com o ângulo desejado. No entanto, para pequenos ângulos, ocorre a formação de rebarbas e a geração de um ângulo agudo que atua como gerador de tensões. Para resolver esse problema, foi realizada a deposição de duas camadas na posição plana antes da inclinação da tocha. Li et al. (2020) também empregaram a tocha na posição inclinada para depositar paredes com o ângulo desejado. Inicialmente, procedeu-se à fabricação de uma parede vertical para servir como base, seguida pela inclinação da tocha para a deposição da peça. A utilização da base revelou-se necessária na deposição de peças com inclinação acentuada, uma vez que a abertura direta do arco no substrato não era possível.

A metodologia proposta para medir a inclinação, consiste em considerar apenas a área efetiva, como pode ser observado no modelo esquemático da Figura 43a. A área efetiva é levada em conta, considerando que, caso a peça passe por um pós-processamento, seja obtido o menor ângulo possível e uma maior área efetiva. No início da deposição, a distribuição de calor ao longo da chapa resulta em camadas com uma pequena inclinação. Realizar o pré-aquecimento da chapa possibilita a formação de camadas mais uniformes. À medida que o aporte térmico aumenta, a viscosidade diminui, permitindo o escorrimento do material e gerando camadas com inclinação mais homogênea.

Para realizar a medição da inclinação, a área efetiva é considerada a partir da exclusão de duas camadas depositadas inicialmente que não possuem inclinação uniforme. Como relatado por Yan et al. (2021), que desconsideraram as cinco primeiras camadas, e Kazanas et al. (2012), que depositaram duas camadas sem inclinação antes da deposição de uma parede com ângulo de 15°. A largura da parede é definida como a largura efetiva, onde são desconsideradas as ondulações da superfície. De acordo com a relação geométrica ilustrada na Figura 43a, o ângulo  $\alpha$  pode ser definido pelo arco tangente da razão entre a altura  $h$  e a distância  $d$ . Para medição da curvatura, é definida a origem do gráfico a partir da primeira camada depositada, como ilustrado na Figura 43b. A partir da origem, a cada 0,50 mm na direção horizontal, utilizando o software imageJ, é realizada a medição da altura em pontos na superfície da curvatura. Como resultado, tem-se um gráfico com a variação da altura a cada 0,50 mm.



**Figura 43** Metodologia proposta para medição da (a) inclinação e (b) curvatura.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

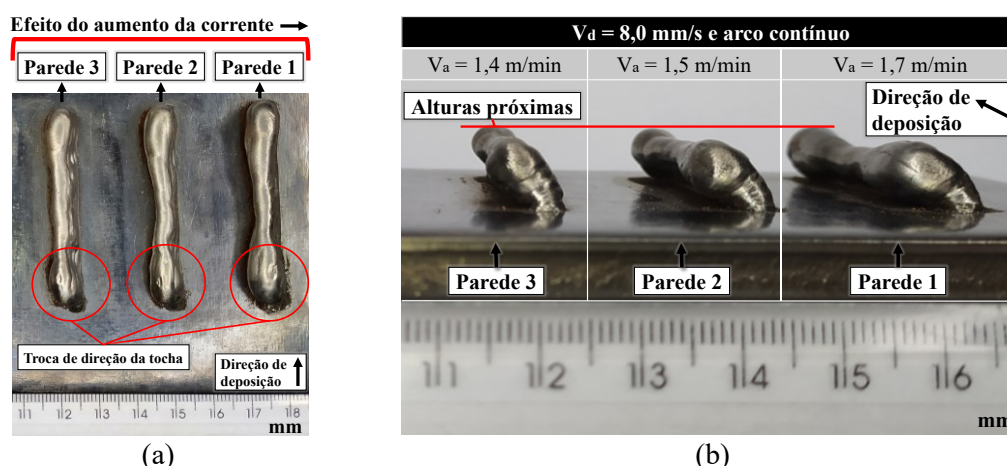
### 4.1 ANÁLISE DAS DEPOSIÇÕES PRÉ-TESTE

Os parâmetros médios utilizados no primeiro grupo de deposição podem ser verificados na Tabela 9. As deposições realizadas consistem em seis paredes inclinadas de 10 camadas, cada uma com 50 mm de comprimento, utilizando avanço de 0,5 mm. A ordem cronológica de deposição é da direita (primeira parede depositada) para a esquerda, onde se verificou o efeito da  $V_a$ ,  $V_d$  e tipo de arco.

**Tabela 9** Parâmetros médios de deposição utilizados na fonte e no robô.

Parede	6	5	4	3	2	1
Corrente (A)	80	82	69	70	75	82
Tensão (V)	14,2	13,1	12,4	12,5	12,8	13,2
$V_a$ (m/min)	1,40	1,70	1,40	1,40	1,50	1,70
$V_d$ (mm/s)	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0
Entrada de calor (J/mm)	189	179	143	109	120	135
Arco	Interrompido	Contínuo	Contínuo	Contínuo	Contínuo	Contínuo

Na geometria das paredes nas três primeiras deposições (1, 2 e 3), que podem ser visualizadas na Figura 44a, pode-se observar que o aumento da  $V_a$  está associado ao aumento da corrente e, portanto, uma maior entrada de calor. Essa entrada de calor excessiva estende o tempo de solidificação, ocasionando o escorrimento do material devido à força gravitacional e a geração de camadas com maior volume, massa e largura, como pode ser observado na Figura 44b. Isso também foi observado por Yuan et al. (2021), que analisaram o efeito da  $V_a$  de cordões depositados na posição horizontal pelo processo CMT *advanced* utilizando o arame ER70S-6, onde o aumento da velocidade de 1 m/min para 5 m/min, resultou na deterioração da camada e numa geometria irregular. Segundo os autores, a alta taxa de deposição também pode apresentar algumas vantagens, como uma melhoraria na penetração e profundidade de fusão, resultando em uma melhor qualidade superficial em cordões. Nagasai, Malarvizhi e Balasubramanian (2022) afirmam que essa vantagem é somente para cordões, pois quando a deposição é feita camada por camada, a alta profundidade de penetração funde as camadas anteriores e diminui a altura da camada previamente depositada, resultando no aumento da largura do cordão. Também é possível observar na Figura 44b que o aumento da corrente não resultou em grandes variações na altura, sendo assim, determinando a velocidade de alimentação correta pode-se obter uma melhora na uniformidade da camada. Um fator comum em todas as deposições é a largura maior nas extremidades, como pode-se observar na Figura 44a, devido à maior quantidade de material depositado ocasionada pelo tempo de deslocamento da tocha na subida e no avanço, nessa região.



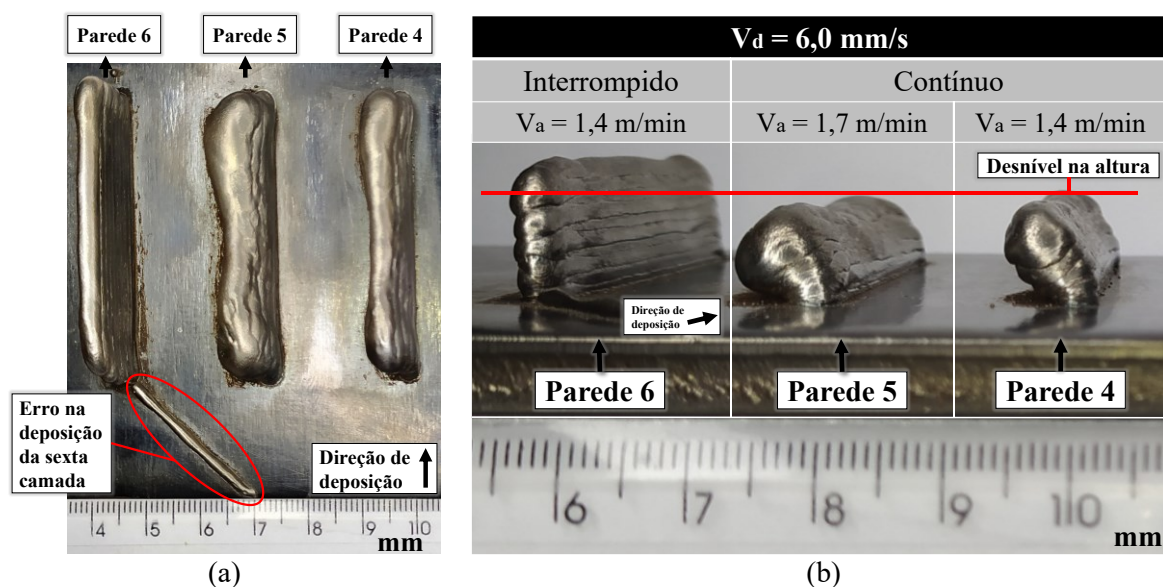
**Figura 44** Paredes compostas por 10 camadas, cada uma com 50 mm de comprimento e um avanço de 0,5 mm: (a) Vista superior e (b) vista frontal.

As paredes 6 e 4 foram depositadas utilizando os mesmos parâmetros, variando apenas o tipo de arco. Conforme pode ser observado na Tabela 9, apesar do ciclo térmico ser maior quando se utiliza arco contínuo, a parede depositada com arco contínuo possui corrente média menor (69A) em comparação com a parede depositada utilizando arco interrompido (80A). A fonte está ajustada para correção de comprimento do arco voltaico em 5% e está trabalhando no padrão sinérgico. Sendo assim, ocorre o ajuste da corrente ao longo da deposição para se obter uma estabilidade do arco. Quando se utiliza arco contínuo, a corrente varia e resulta em uma corrente média menor por conta do ajuste do comprimento do arco. A DBCP também influencia o valor da corrente. Na deposição contínua, observa-se um aumento progressivo da DBCP, enquanto no arco interrompido, a DBCP é constante, não ocorrendo grandes variações na corrente por conta da correção do comprimento do arco.

Na Figura 45a e Figura 45b pode-se observar um erro na deposição da sexta camada da parede 6, que ocorreu devido a uma falha no momento de zerar as coordenadas de origem do robô no início da deposição da camada, resultando no deslocamento da tocha para uma posição indesejada. Esse erro foi resolvido posicionando novamente a tocha no local correto e reiniciando a deposição da camada.

Ao analisar o efeito da velocidade de deslocamento da tocha, percebe-se que, ao diminuir a velocidade de 8,0 mm/s, Figura 44b, para 6,0 mm/s, Figura 45b, considerando  $V_a$  de 1,4 m/min, não ocorre grandes variações na corrente (de 70A para 69A). Portanto, a diminuição de 2 mm/s reduz a entrada de calor e pode resultar em camadas com menor volume, massa e largura, porém, sem grandes variações. Em seu estudo, Yuan et al. (2021) verificaram a variação da velocidade de deslocamento da tocha de 1,66 mm/s para 10 mm/s e observaram que o aumento da velocidade a partir de 5 mm/s resulta em camadas intermitentes conhecidas como *humping*. Isso não foi observado nas deposições realizadas devido à pequena variação de velocidade. Além disso, na Figura 45a, é possível observar que o aumento da velocidade de alimentação do arame resulta em menor ondulação superficial ao longo da camada. Esse efeito também foi mencionado por Rodrigues et al. (2019a), que realizaram a deposição de paredes com arco interrompido utilizando o arame ER110S-G. Na parede depositada com uma velocidade de deslocamento da tocha de 3,9 mm/s (entrada de calor de 511 J/mm), houve uma maior quantidade de material depositado em comparação com a parede depositada com velocidade 9,0 mm/s (entrada de calor de 211 J/mm), resultando em menor ondulação superficial devido às condições de dissipação de calor. Segundo os autores, a menor ondulação é explicada pelo maior aporte de calor utilizado para depositar o arame, o que aumenta a temperatura da intercamada, melhorando a molhabilidade das camadas subsequentes.

Na parede depositada utilizando arco interrompido, cada camada era depositada após o centro da camada resfriar até a temperatura ambiente (aproximadamente 30°) e a DBCP era ajustada em 12 mm em cada deposição. Pode-se observar na Figura 45b, que ocorreu um desnível na altura, em comparação com a parede depositada com arco contínuo, resultando em um maior ângulo de inclinação e menor largura ao longo da camada, devido aos menores ciclos de entrada de calor.



**Figura 45** Paredes de 10 camadas, com 50 mm de comprimento e avanço de 0,5 mm: (a) Vista superior e (b) vista frontal.

Na Tabela 10, é possível observar os parâmetros médios utilizados na deposição do segundo grupo. As deposições realizadas consistem em cinco deposições de 10 camadas e 50 mm de comprimento, utilizando diferentes valores de avanço. A ordem cronológica de deposição é da direita (primeira parede depositada) para a esquerda. O objetivo dessas deposições é analisar o efeito do avanço, utilizando diferentes velocidades de alimentação do arame, velocidade de deslocamento de tocha e tipo de arco.

Ao analisar o efeito da entrada de calor ao utilizar avanço de 0,50 mm, conforme demonstrado na Tabela 9 e Tabela 10, nota-se uma diminuição de 23,30% na entrada de calor conforme  $V_d$  aumenta de 6,0 mm/s para 8,0 mm/s, ao empregar uma  $V_a$  de 1,40 m/min. Essa redução é bem próxima, atingindo 24,40%, quando  $V_a$  é ajustada para 1,70 m/min. É importante ressaltar que essas comparações foram realizadas com a deposição utilizando arco contínua. Ao elevar  $V_a$  de 1,40 m/min para 1,70 m/min, mantendo  $V_d$  em 6,0 mm/s durante o processo de deposição contínua, observa-se um aumento de 25,50% na entrada de calor. Ao empregar a  $V_d$  de 8,0 mm/s, o aumento é de 23,70%. Esse aumento influencia a inclinação da peça devido à diminuição da viscosidade da poça de fusão. Também ocorre um aumento de 32,70% na entrada de calor ao utilizar a deposição com arco interrompido, em comparação com a deposição contínua, com  $V_a$  de 1,40 m/min e  $V_d$  de 6,0 mm/s. Ao aumentar  $V_d$  para 8,0 mm/s e  $V_a$  para 1,50 m/min, observa-se um aumento de 13,90% na entrada de calor ao utilizar arco interrompido em comparação com a deposição contínua. No entanto, apesar do aumento no aporte térmico quando se utiliza arco interrompido, o ciclo térmico durante o processo é menor em comparação com a deposição contínua, devido ao resfriamento das camadas.

**Tabela 10** Parâmetros médios de deposição utilizados na fonte e no robô.

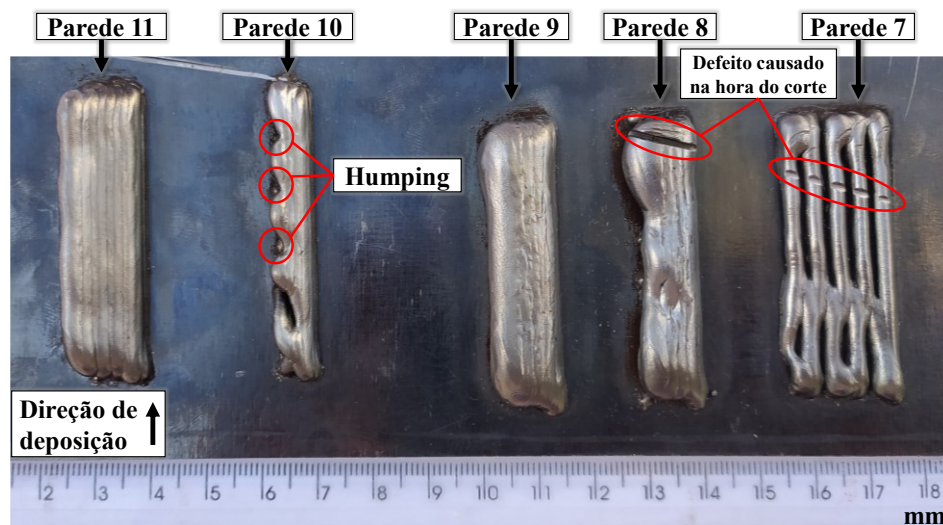
Parede	11	10	9	8	7
Corrente (A)	81	86	82	69	70
Tensão (V)	13,5	14,1	13,0	12,0	12,4
$V_a$ (m/min)	1,50	1,50	1,80	1,40	1,50
$V_d$ (mm/s)	8,0	8,0	6,0	8,0	8,0
Avanço (mm)	0,50	1,0	1,0	1,0	2,0
Entrada de calor (J/mm)	137	152	178	104	109
Arco	Interrompido	Interrompido	Contínuo	Contínuo	Contínuo

Na Figura 46a, pode-se observar um defeito causado na manipulação da esmerilhadeira para realizar o corte da chapa, com o intuito melhorar a visualização das paredes depositadas. No entanto, esse problema não afetou na análise das deposições. Ao aumentar o avanço para 2 mm, como pode ser visto na parede 7 da Figura 46b, não foi obtida uma parede com ângulo de inclinação devido à distância de avanço ser superior à largura mínima necessária da camada. Isso resultou em camadas subsequentes na forma horizontal, em vez de vertical ou diagonal, como também ocorreu ao diminuir o avanço para 1 mm, como pode ser visualizado na parede 8 da Figura 46b.

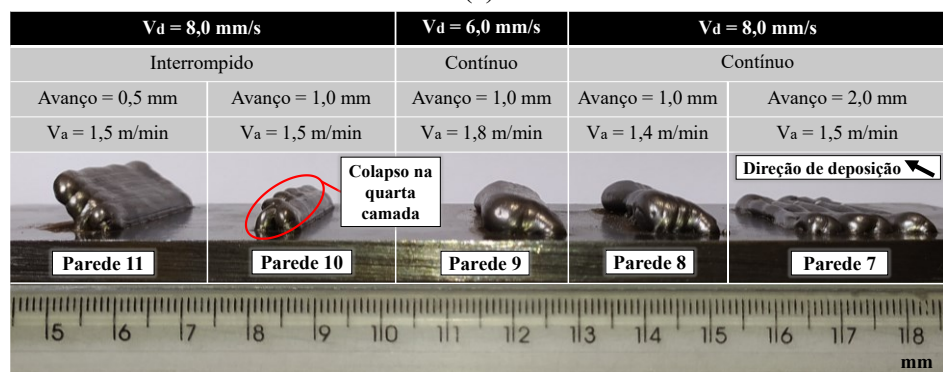
O próximo passo foi diminuir a velocidade de deslocamento da tocha e aumentar a velocidade de alimentação do arame, resultando em uma maior quantidade de material depositado e maior largura da camada. No entanto, como pode ser observado na parede 9 da Figura 46b, também resultou no escorrimento da poça de fusão. Ao aumentar a velocidade de deslocamento da tocha para 8,0 mm/s e utilizar arco interrompido (parede 10 da Figura 46b), ocorreu o colapso da poça de fusão na quarta camada. De acordo com a teoria do equilíbrio das forças, a poça de fusão permanecerá equilibrada na camada enquanto a força da gravidade não superar a tensão superficial, que tende a causar o desprendimento da poça de fusão. Segundo Toropchin et al. (2014), através da representação da tensão superficial do aço S235 em função da temperatura pela equação de Marangoni, observa-se que o coeficiente de tensão superficial é inversamente proporcional à temperatura do material. Portanto, deve-se diminuir o aporte térmico para aumentar a tensão superficial e, assim, evitar o desprendimento da poça de fusão.

Na Figura 46a, também é possível observar a formação de *humping* na parede 10, o que também foi um dos fatores que influenciaram no colapso da poça de fusão. Como descrito por Shah et al. (2023), esse defeito é muito comum no processo MADA, apresentando uma geometria formada por picos e vales, ou seja, uma sequência de ondulações ao longo da camada. Para resolver esse problema, deve-se utilizar uma relação adequada entre a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de deslocamento da tocha. Portanto, o próximo passo foi diminuir a distância de avanço para 0,5 mm, como

pode ser observado na Figura 46b, parede 11, obtendo-se resultados melhores na deposição das 10 camadas com temperatura de interpasse, em comparação com a deposição utilizando avanço de 1,0 mm. Sendo assim, utilizando avanços de 1 e 2 mm não foi possível obter paredes inclinadas com velocidades de deslocamento da tocha de 6,0 e 8,0 mm/s e velocidades de alimentação do arame de 1,4 até 1,8 m/min, utilizando arco contínuo e interrompido. Para os testes realizados com avanço de 0,5 mm, foi possível obter paredes inclinadas com todas as variações de parâmetros mencionadas anteriormente.



(a)



(b)

**Figura 46** Paredes de 10 camadas: Vistas (a) superior e (b) frontal.

Na Figura 47a e Figura 47b, é possível visualizar o ângulo obtido para as amostras utilizando o avanço de 0,50 mm. Ao utilizar a deposição contínua, a largura da camada não era suficiente para permitir a deposição ao avançar 1,0 mm e 2,0 mm. Portanto, não foi possível obter peças inclinadas com os parâmetros utilizados, como pode ser observado na Figura 47c, Figura 47d e Figura 47e. Já ao empregar a deposição com arco interrompido, houve o colapso na quarta camada, como pode ser visualizado na Figura 47c. Ao analisar o efeito da  $V_a$  na deposição contínua, nota-se que, à medida que a  $V_a$  aumenta de 1,40 m/min para 1,70 m/min, o ângulo de inclinação diminui 12,0% ao utilizar  $V_d$  de 6,0 mm/s e 39,60% ao utilizar  $V_d$  de 8,0 mm/s, conforme evidenciado de forma mais clara na Figura 47a e Figura 47b. Mantendo a  $V_a$  constante e variando a  $V_d$  de 6,0 mm/s para 8,0 mm/s, os ângulos obtidos para  $V_a$  de 1,40 m/min foram próximos ( $44,80^\circ$  e  $43,60^\circ$ ), e utilizando  $V_a$  de 1,70 m/min foi observada uma redução no ângulo de 33,20%. A amostra depositada com arco interrompido e  $V_d$  de 6,0 mm/s apresentou um aumento de 71,00% no ângulo, quando comparada com a deposição contínua. No entanto, quando se utiliza  $V_d$  de 8,0 mm/s, essa estratégia não se tornou eficaz, apresentando ângulos próximos ( $37,50^\circ$  e  $35,90^\circ$ ). Assim, ao manter  $V_a$  constante, a entrada de calor diminui à medida que  $V_d$  aumenta, promovendo uma solidificação mais rápida, aumento na tensão superficial e peças com menor inclinação. Quando  $V_d$  é mantido constante, o aumento de  $V_a$  está associado a um aumento na entrada de calor, resultando na redução da tensão superficial, diminuição da viscosidade da poça de fusão e peças com menor inclinação.



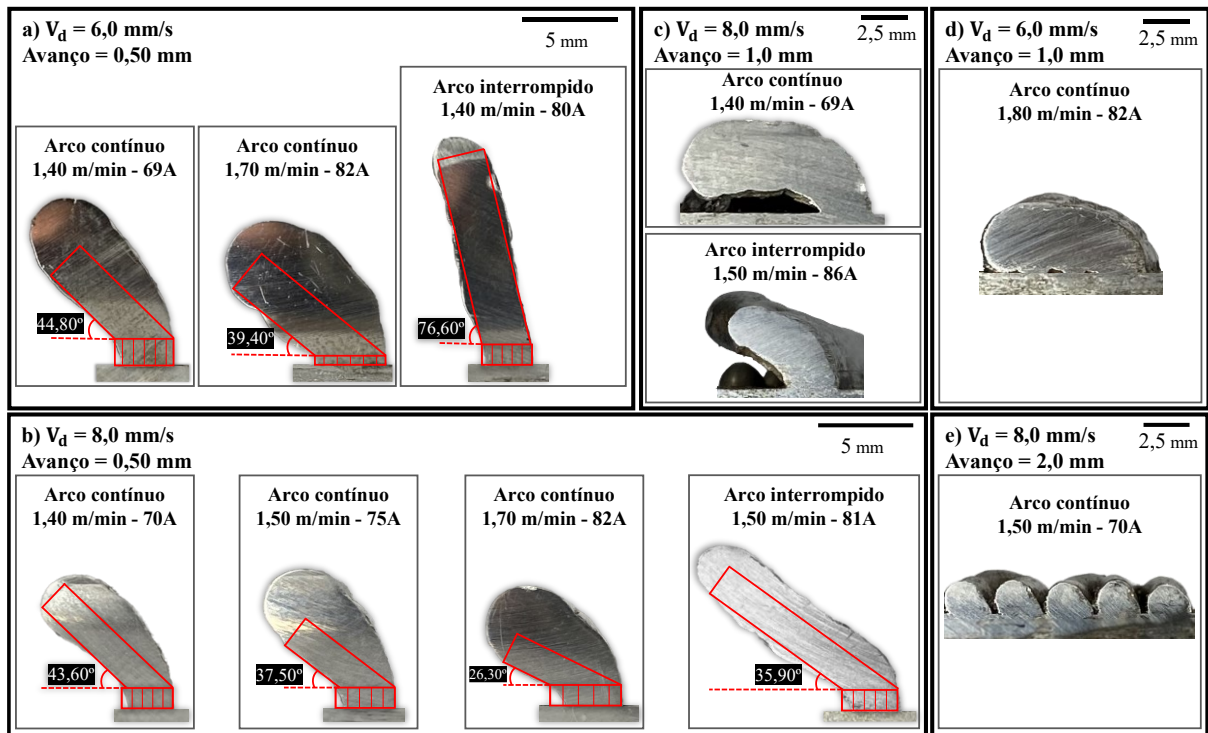


Figura 47 Seções transversais das paredes depositadas.

Através da medição da altura a cada 0,50 mm de deslocamento na horizontal, observa-se na Figura 48a e Figura 48b a curvatura na parte inferior e superior de cada peça. Na Figura 48a, nota-se um crescimento de 9,20 mm e 7,60 mm na curvatura superior, e 6,10 mm e 4,30 mm na inferior, ao utilizar  $V_a$  de 1,40 m/min e 1,70 m/min, respectivamente. Com o uso do arco interrompido, esse aumento é de 14,10 mm na parte superior e 11,70 mm na inferior, representando um acréscimo de 53,60% e 90,30%, respectivamente, em comparação com a deposição contínua. Ao aumentar  $V_d$  para 8,0 mm/s, o acréscimo na curvatura superior e inferior foi de 6,40 mm e 4,90 mm ( $V_a = 1,40$  m/min), 6,90 mm e 4,80 mm ( $V_a = 1,50$  m/min), 5,60 mm e 3,30 mm ( $V_a = 1,70$  m/min) e 10,60 mm e 7,80 mm ( $V_a = 1,50$  m/min com arco interrompido). Portanto, ao utilizar o arco interrompido ocorre um aumento de 54,40% e 59,50% na curvatura superior e inferior, comparado com a deposição contínua.

Resultados semelhantes foram encontrados por Soares, Novelino e Ziberov (2024) na deposição de duas paredes com 30 camadas, uma por deposição contínua e outra com arco interrompido utilizando resfriamento natural na faixa de 45°C até 55°C, com os mesmos parâmetros. Como resultado, a parede depositada com arco interrompido teve um aumento de 20% em sua altura em comparação com a deposição contínua. Ao analisar o efeito da  $V_d$ , observa-se que o aumento de 6,0 mm/s para 8,0 mm/s resulta em uma redução na curvatura superior e inferior de 30,40% e 20,50% ( $V_a = 1,40$  m/min) e 26,80% e 23,40% ( $V_a = 1,70$  m/min).

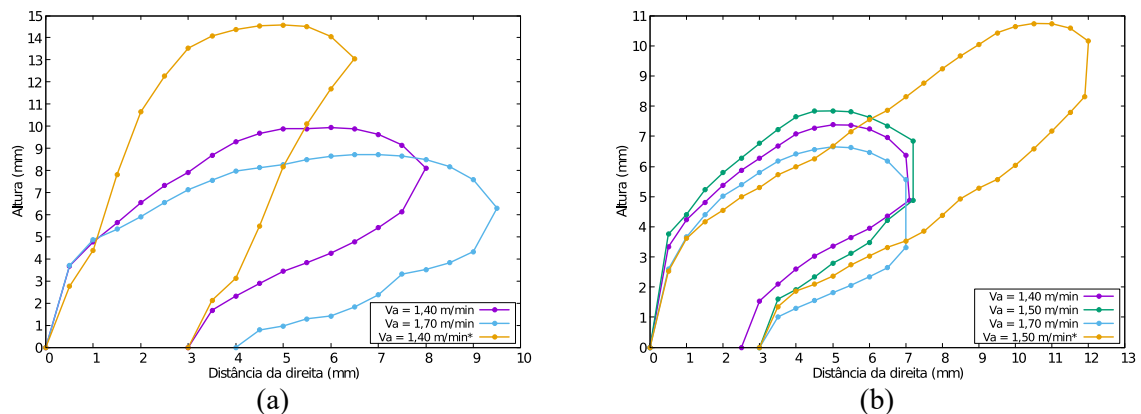


Figura 48 Variação na altura das peças depositadas com: (a)  $V_d = 6,0$  mm/s e (b)  $V_d = 8,0$  mm/s (Observação: \*Deposição com arco interrompido).

## 4.2 ANÁLISE DAS DEPOSIÇÕES TESTE

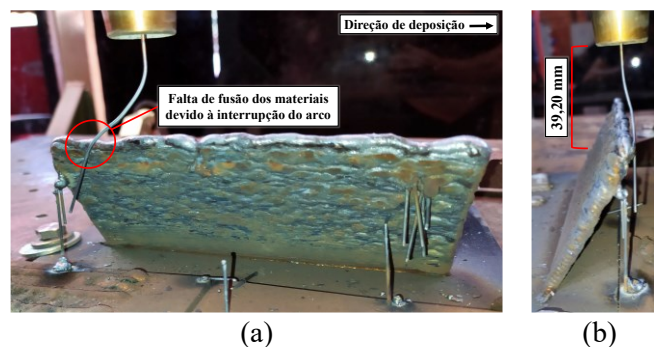
### 4.2.1 PAREDE INCLINADA PLANA

A partir das deposições de 10 camadas e 50 mm de comprimento que obtiveram bons resultados, foram selecionados os parâmetros da amostra que obteve o menor ângulo ao utilizar a velocidade de deslocamento da tocha de 8,0 mm/s e arco contínuo. O objetivo era depositar uma parede inclinada plana com 100 camadas e 150 mm de comprimento, a fim de analisar a qualidade superficial da parede e o ângulo de inclinação. No entanto, devido a um defeito ocorrido, houve a interrupção do arco e a parede possui apenas 71 camadas. Os parâmetros médios utilizados na deposição podem ser observados na Tabela 11.

**Tabela 11** Parâmetros médios de deposição da parede plana.

Corrente (A)	Tensão (V)	V <sub>a</sub> (m/min)	V <sub>d</sub> (mm/s)	Avanço (mm)	Arco
69	13,2	1,70	8,0	0,50	Contínuo

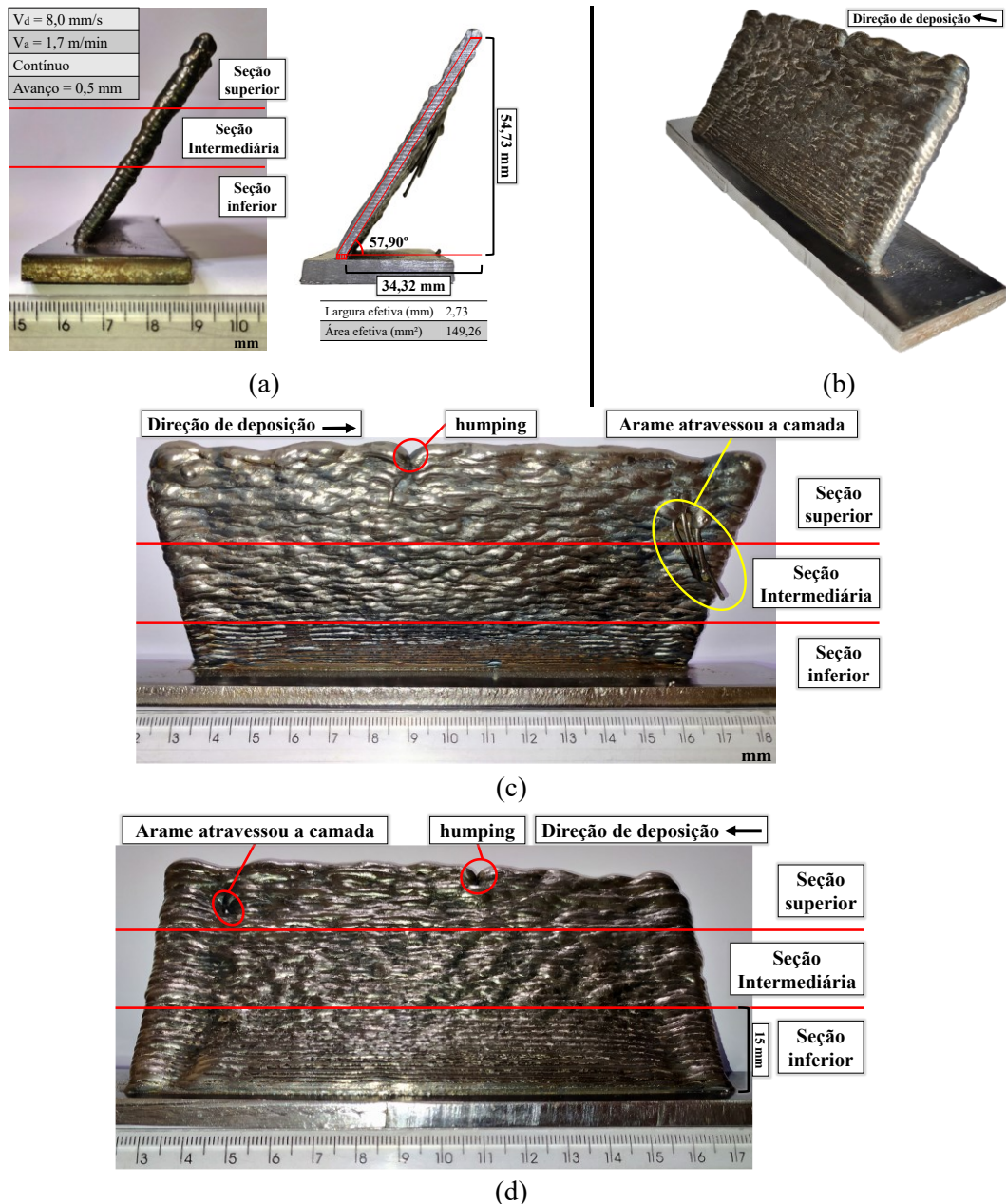
Como pode-se observar na Figura 49a, o arco foi extinto na septuagésima primeira camada, e o processo precisou ser interrompido devido à falta de fusão dos materiais. A DBCP deveria ser de 12 mm, no entanto, como pode-se notar na Figura 49b, na septuagésima primeira camada essa distância era de aproximadamente 39,20 mm. A DBCP foi ajustada no início do processo e programada com passo fixo de 1,2 mm. No entanto, devido à inclinação da parede e à ineficiência do resfriamento natural, a DBCP se torna crescente ao longo do processo. Esse problema também foi relatado por Novelino, Carvalho e Ziberov (2022) na deposição de uma parede vertical de 100 camadas e 160 mm de comprimento, pelo processo CMT convencional, utilizando o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Os autores relataram que após a quinquagésima camada, o resfriamento natural se tornou ineficiente, ocorrendo o superaquecimento das camadas. Como consequência, há um aumento da poça de fusão, reduzindo a altura e aumentando a largura efetiva das camadas a partir desse ponto, resultando no crescimento da DBCP ao longo da deposição e, como consequência, na eliminação dos benefícios do gás de proteção. Yuan et al. (2021) analisaram o aumento da DBCP, variando de 5 até 21 mm, de cordões depositados na direção horizontal pelo processo CMT *advanced*, utilizando arame ER70S-6. Foi observado que o material cedeu com DBCP de 21 mm, a corrente permaneceu constante em todas as deposições, porém, a tensão cresce com o aumento da DBCP, resultando em maior entrada de calor e diminuição da tensão superficial, levando ao escorrimento do material.



**Figura 49** Processo parado na septuagésima primeira camada por conta da DBCP.

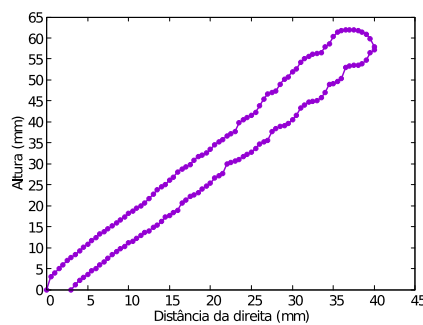
Portanto, foi possível obter uma parede inclinada com um ângulo aproximado de 57,90°, largura efetiva de 2,73 mm e área efetiva de 149,26 mm<sup>2</sup>, como pode ser observado na Figura 50a e Figura 50b. A seção inferior da parede apresentou o melhor acabamento superficial em comparação com as outras seções, como pode-se observar na Figura 50c e Figura 50d, possuindo uma uniformidade na largura e altura. Na seção intermediária, a partir da vigésima camada, aproximadamente, observou-se um aumento na rugosidade na superfície. Portanto, as camadas ficaram com maior largura e altura, devido à ineficiência do resfriamento natural. Na seção superior, foi observada a presença de *humping*, como pode ser visto na Figura 50c e Figura 50d, e ao longo da deposição de algumas camadas, esse defeito resultou na interrupção do arco por alguns segundos, ocasionando a falta de fusão do arame que atravessou a camada e fundiu em seguida, deixando pedaços do arame nesses pontos.





**Figura 50** Parede de 71 camadas e 150 mm de comprimento: (a) Vista lateral, (b) vista isométrica, (c) vista frontal e (d) vista posterior.

Na análise da curvatura da peça de 71 camadas, como pode ser visualizado na Figura 51, observa-se que altura máxima obtida foi de 62 mm, com uma altura média de 0,90 mm por camada, representando um aumento de 23,80% na altura por camada em comparação com a peça depositada de 10 camadas utilizando a mesma estratégia e os mesmos parâmetros.



**Figura 51** Variação na altura da peça depositada com  $V_d$  de 8,0 mm/s.

Nas diferentes seções, também ocorrem variações na microestrutura, como relatado por Oliveira (2022) que conduziu um estudo sobre a microestrutura de paredes de 10, 20 e 100 camadas, cada uma com 160mm de comprimento, depositadas com o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro por MADA via CMT convencional. Foi observado que as paredes com diferentes quantidades de camadas apresentam microestruturas distintas em regiões semelhantes, o que pode afetar as propriedades mecânicas. Segundo a autora, a parede de 100 camadas apresenta grãos refinados na parte inferior em comparação com o restante da amostra, o que também é perceptível no topo da última camada. Comparando com as amostras de 10 e 20 camadas, ocorreu um aumento de poros e inclusões na parte inferior, por conta do menor tempo de resfriamento e à corrente mais alta. Das três amostras, a de 100 camadas foi a que apresentou a menor microdureza e a maior variação da microestrutura ao longo de toda seção em relação ao tamanho de grão, devido à variação do aporte térmico.

Sendo assim, por meio da análise dos autores mencionados e dos resultados obtidos na deposição da parede de 71 camadas, nota-se que o controle do aporte térmico é um fator importante na deposição. Para obter a parede de 100 camadas, podem ser utilizadas algumas estratégias, como, por exemplo, a interrupção do arco a cada 20 camadas para realizar o ajuste da DBCP e aguardar o resfriamento da parede até a temperatura ambiente. No entanto, esse processo torna-se menos produtivo na deposição de peças maiores ou em larga escala. Para depositar a parede de 100 camadas com ângulos menores, deve-se aumentar o avanço da tocha, mas com menor velocidade de deslocamento e maior corrente.

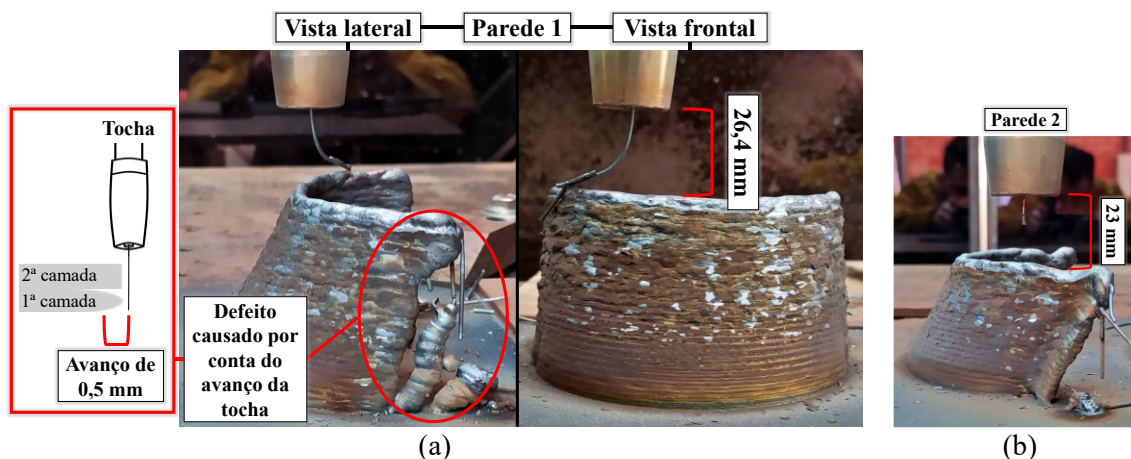
#### 4.2.2 PAREDE INCLINADA CURVA

Utilizando os mesmos parâmetros iniciais da deposição da parede plana inclinada de 71 camadas relatada anteriormente, foi realizada a deposição de duas paredes curvas inclinadas. As paredes curvas são semicircunferências com comprimento de 150 mm e raio de 47,75 mm. Os parâmetros médios obtidos ao final de cada deposição podem ser visualizados na Tabela 12.

**Tabela 12** Parâmetros médios de deposição das paredes curvas.

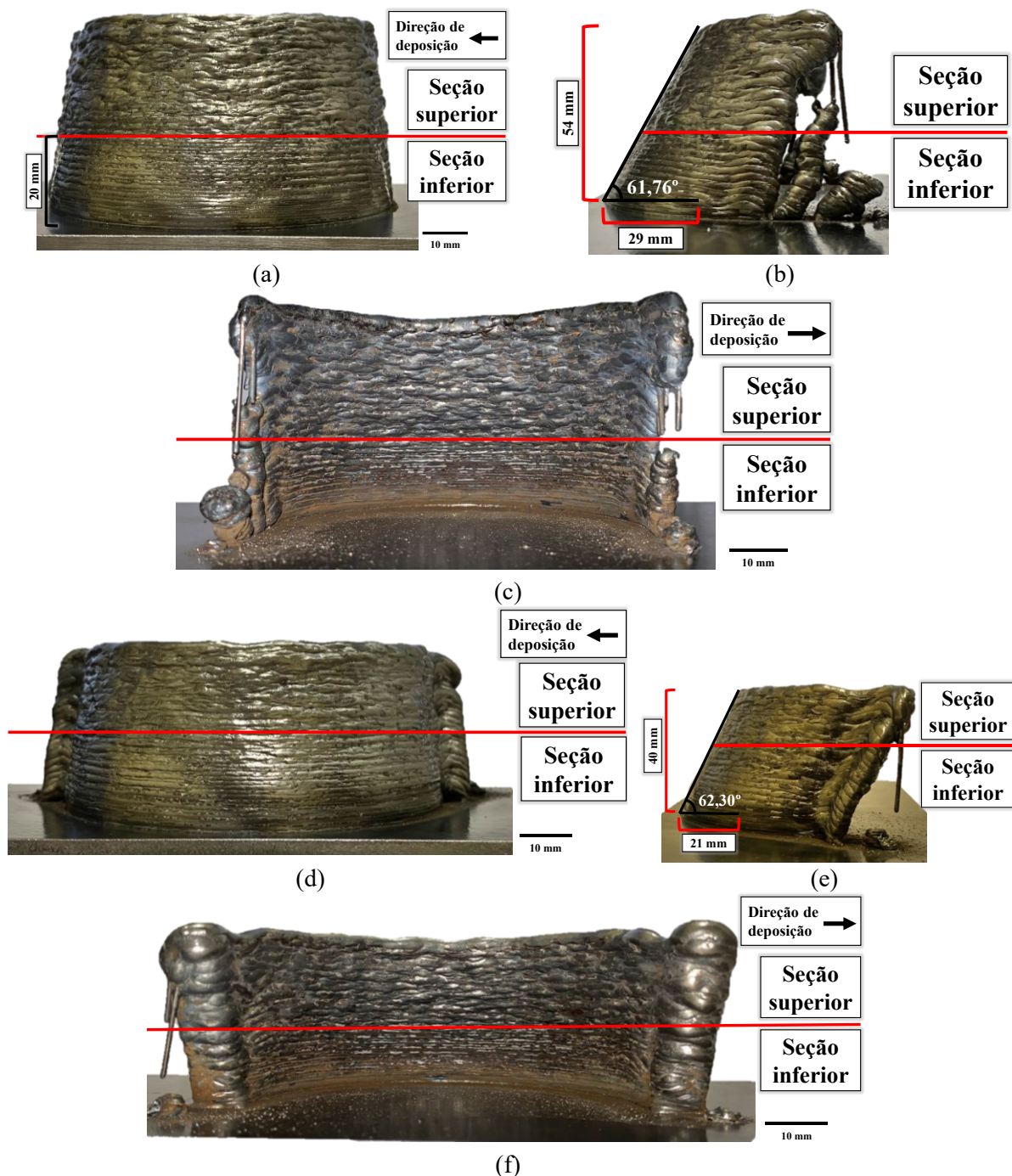
Parede	Corrente (A)	Tensão (V)	V <sub>a</sub> (m/min)	V <sub>d</sub> (mm/s)	Avanço (mm)	Arco
1	68	13,3	1,60	8,0	0,50	Contínuo
2	69	12,6	1,50	8,0	0,50	Contínuo

O objetivo era depositar a parede curva com 100 camadas. No entanto, a primeira parede depositada, que pode ser observada na Figura 52a, apresentou diversos defeitos no final da circunferência, causados pelo avanço de 0,5 mm da tocha ao final de cada camada, resultando no deslocamento do arame até o substrato e na interrupção do arco por curtos períodos várias vezes. Como resultado, na quinquagésima sétima camada, o arco foi interrompido, e a fusão do arame não ocorreu, resultando em uma DBCP de 26,40 mm. Na tentativa de resolver o problema, foi realizada a deposição da mesma peça curva, mas com uma parede de 10 mm nas laterais, como pode-se visualizar na Figura 52b. Nesse caso, sempre haveria material para depositar a próxima camada, mas o mesmo problema ocorreu, e o arco foi interrompido na quadragésima quinta camada, com uma DBCP de 23 mm.



**Figura 52** Interrupção do arco após (a) 57 camadas e (b) 45 camadas depositadas.

Como se pode observar na Figura 53b e Figura 53e, os ângulos de inclinação obtidos foram de  $61,76^\circ$  e  $62,30^\circ$ , para as paredes 1 e 2, respectivamente. Esses valores estão próximos ao ângulo de inclinação da parede plana inclinada ( $57,90^\circ$ ). As paredes curvas possuem uma seção inferior com melhor qualidade superficial em um maior número de camadas, a uma altura de aproximadamente 20 mm, como pode ser observado na Figura 53(a, c, d e f), em comparação com a seção inferior da parede plana de 71 camadas, que possui uma altura de aproximadamente 15 mm, conforme pode ser visto na Figura 50d. Isso ocorre porque a geometria da parede curva é favorável à estabilidade do arco e à fluidez da poça de fusão, o que leva a um comprimento reduzido na altura e largura. Outro fator que diferencia a deposição de peças curvas e planas é a dissipação térmica, como relatado por Vivanco, Carvalho e Ziberov (2023). Os autores afirmam que a diminuição da área de dissipação térmica, tanto por condução, convecção e radiação, resulta em maior concentração de calor. Com isso, tem-se menor taxa de resfriamento, diminuição da viscosidade da poça de fusão, menor altura e maior largura das camadas.



**Figura 53** Paredes curvas inclinadas: Parede 1 vista (a) frontal, (b) lateral e (c) posterior e parede 2 vista (d) frontal, (e) lateral e (f) posterior.



### 4.3 ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DO CONE

Utilizando os mesmos parâmetros iniciais de deposição da parede plana e das paredes curvas relatadas anteriormente, foi realizada a deposição de um cone com 96 camadas, através da deposição por blocos. Na Tabela 13, podem ser observados os valores médios de corrente, tensão,  $V_a$  e a quantidade de camadas depositadas em cada bloco.

**Tabela 13** Parâmetros médios de deposição do cone.

Bloco	Corrente (A)	Tensão (V)	$V_a$ (m/min)	Camadas
1º	69	13,5	1,60	20
2º	69	13,8	1,70	20
3º	69	13,7	1,70	20
4º	70	13,9	1,80	20
5º	70	13,1	1,60	16

Antes da deposição de cada bloco, a DBCP era ajustada em 12 mm. No entanto, como pode ser observado na Figura 54a, ao final da deposição do primeiro bloco, a DBCP estava em aproximadamente 15 mm. Durante a deposição da primeira camada, houve incidência de *humping*, o que resultou na interrupção do arco por um curto período quando a tocha percorria uma área sem material. Para solucionar esse problema e evitar a interrupção do processo, ao longo da deposição, quando a tocha passava pela região afetada, a  $V_a$  foi aumentada para 2,5 m/min. Isso provocou um aumento na corrente e permitiu depositar uma maior quantidade de material para preencher a área com defeito. Como relatado por Yan et al. (2021), que analisaram o efeito da  $V_a$  na forma e tamanho da poça de fusão. Os autores concluíram que a  $V_a$  determina o aporte térmico e a taxa de deposição, com a largura da poça de fusão aumentando de 6,34 mm para 9,27 mm quando a  $V_a$  foi aumentada de 3 m/min para 5 m/min.

Este defeito se propagou até o início da deposição do segundo bloco. Uma forma de solucionar esse problema é depositar as primeiras camadas com uma corrente maior, o que melhora a transferência de material quando o substrato ainda está frio e evita a interrupção do arco. Na Figura 54b, pode ser visualizada a DBCP após a deposição do segundo bloco, que foi de aproximadamente 15 mm. Neste bloco, ocorreu a interrupção do defeito e as outras camadas foram depositadas com sucesso. O terceiro bloco, como pode-se observar na Figura 54c, também foi depositado sem nenhum defeito, e a DBCP no final do processo foi de aproximadamente 18 mm. A partir deste bloco, a DBCP aumentou devido ao acúmulo de calor no interior da peça, resultado da falta de dissipação térmica, e à entrada elevada de calor devido à redução da circunferência, afetando a viscosidade da poça de fusão.

Na deposição do quarto bloco, ocorreu a incidência de *humping* na sexta camada, que se propagou até a décima camada, como pode ser visualizado na Figura 54d. Neste caso, também foi necessário aumentar a  $V_a$  até 2,5 m/min quando a tocha passava pela região afetada. A DBCP foi de aproximadamente 20 mm e, como previsto, está crescente a cada bloco. Na deposição do quinto bloco não ocorreu nenhum defeito, e a DBCP também foi de aproximadamente 20 mm, como ilustrado na Figura 54e. Por fim, conforme a Figura 54f, foi possível a deposição de um cone com 96 camadas, seguindo a estratégia proposta.

Panchagnula e Simhambhatla (2018) utilizaram uma mesa com eixos rotativos e inclináveis para depositar cones com ângulos de 10°, 15°, 20°, 25°, 30° e 35° via CMT convencional, utilizando o arame ER70S-6. Para depositar esses componentes, a tocha foi mantida na posição plana e o substrato foi inclinado em um ângulo igual ao ângulo da parede do cone. Após a inclinação da mesa, o componente é então submetido a um movimento giratório (de 0° a 360°) para depositar cada camada. Os autores concluíram que esta técnica é eficiente para a fabricação de peças complexas que possuem inclinação sem a necessidade de estruturas de suporte.

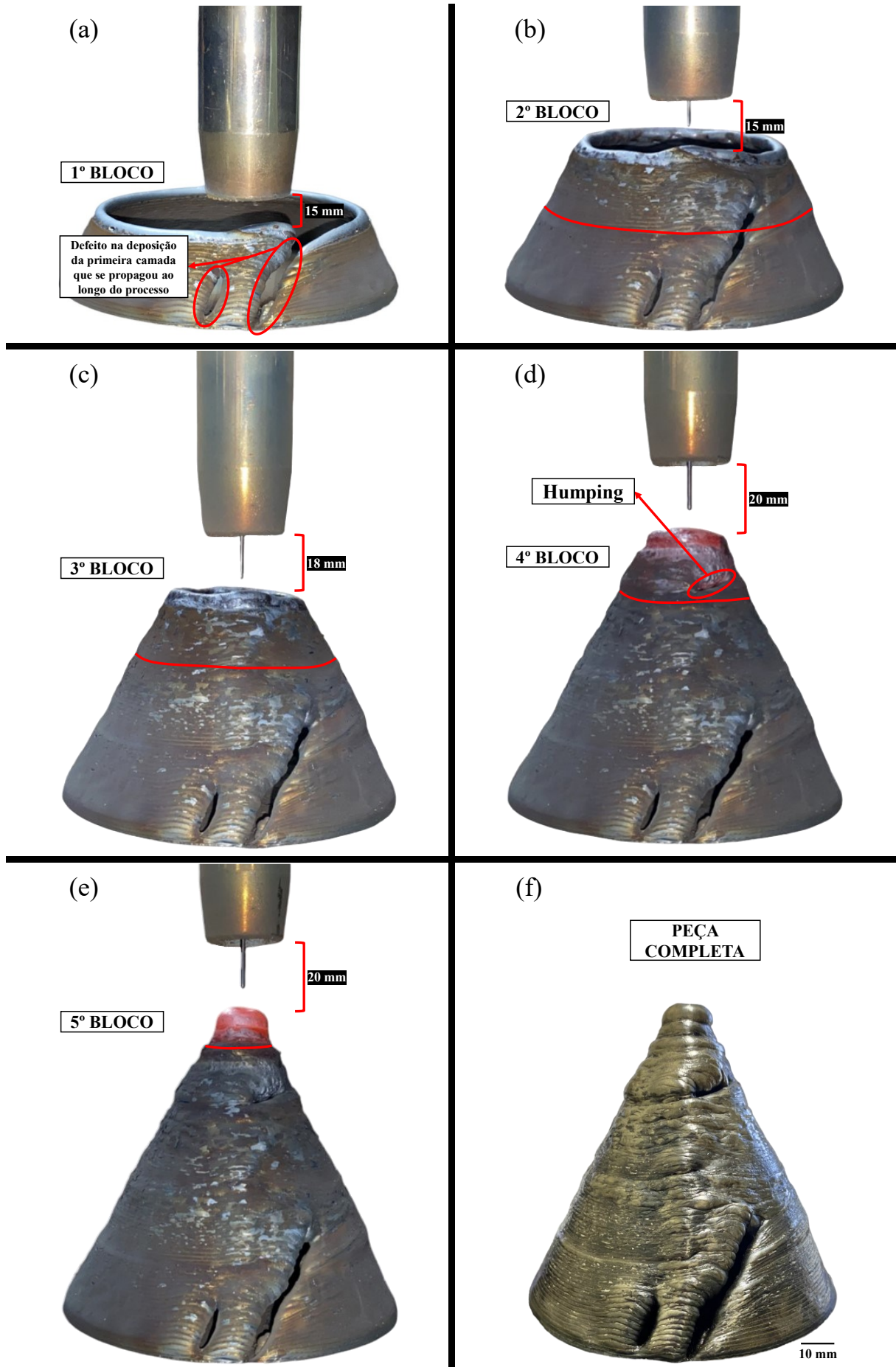


Figura 54 Peça fabricada através da deposição por blocos.

Uma aplicação comum da estratégia de deposição por blocos ocorre quando se deseja utilizar diferentes materiais em uma única peça, como mencionado por Chandrasekaran, Hari e Amirthalingam (2020) em seu estudo de uma peça tubular usada na indústria naval para o transporte de petróleo e gás do fundo do poço até a superfície do mar. Para conduzir os testes, os autores fabricaram uma parede via CMT convencional, composta por dois blocos. O primeiro bloco tinha dez camadas feitas com o arame ER 2209, enquanto o segundo tinha treze camadas feitas com o arame ER70S-6. Em comparação com o tubo de aço manganês (X52) atualmente utilizado, a peça proposta apresentou uma resistência à tração superior em cerca de 6%. O objetivo é usar o arame ER 2209 na parte interna da tubulação e o arame ER70S-6 na parte externa, resultando em uma melhoria de 12 vezes na taxa de corrosão em comparação com o aço manganês.

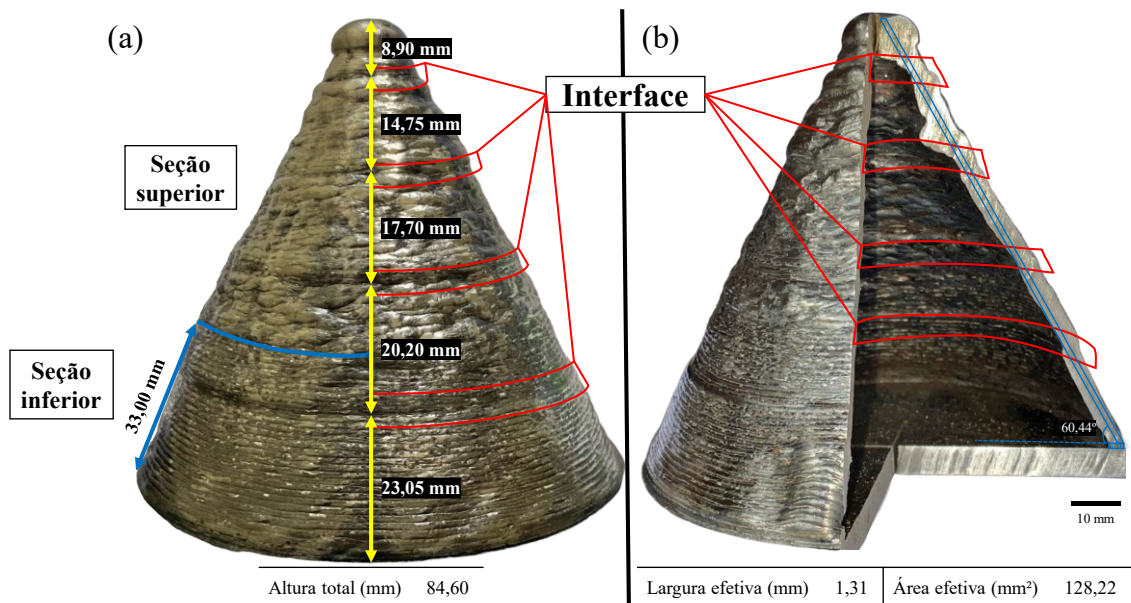
De acordo com Motwani et al. (2022), a necessidade de propriedades específicas em locais determinados de uma peça favorece a utilização dessa estratégia, que envolve a combinação de diferentes materiais, possibilitando a redução dos custos de fabricação em comparação com a utilização de apenas um material de alto custo. Motwani et al. (2022) conduziram uma análise microestrutural em uma parede fabricada em dois blocos por meio da técnica CMT convencional. O primeiro bloco era composto por 30 camadas do arame ER316LSi, enquanto o segundo bloco continha 30 camadas do arame ERNiCrMo-3. Os resultados da análise da macroestrutura e da microestrutura na interface dos dois blocos revelaram uma conexão sólida, sem apresentar quaisquer defeitos visíveis, demonstrando a viabilidade da fabricação de uma peça utilizando diferentes ligas. O teste realizado na interface resultou em uma falha na amostra de ER316LSi, com uma resistência à tração média de 660 MPa, limite de escoamento de 412 MPa e alongamento de 49,3%. Esses resultados estavam em conformidade com o esperado, dado que o material tinha propriedades mecânicas inferiores, e os valores se aproximaram das propriedades do arame ER316LSi.

Na análise da qualidade superficial, como ilustrado na Figura 55a, é nítido a interface a cada bloco depositado. O corte da seção transversal apresenta uma geometria com uma menor largura na interface, quando comparado com o resto do bloco, que pode ser visualizado na Figura 55b. Isso ocorre por conta da diferença do aporte térmico da última camada para a primeira camada do bloco subsequente. Esse resultado também foi observado por Soares, Novelino e Ziberov (2024) na deposição de uma parede com dois blocos de 15 camadas cada, utilizando o arame ER410NiMo e o processo CMT convencional. A seção transversal da peça depositada apresenta uma camada com menor largura na interface entre os dois blocos, em comparação com o restante da peça. Os autores também relataram que a parede resultou em uma altura 1,6% maior e largura efetiva reduzida devido ao resfriamento, em comparação com uma parede depositada de 30 camadas de forma contínua.

Para avaliar melhor a qualidade superficial, a peça foi dividida em duas seções, como pode ser observado na Figura 55a. A seção inferior apresenta uma melhor qualidade superficial em comparação com a seção superior, devido à maior entrada de calor na seção superior por conta da ineficiência do resfriamento. Esse resultado é semelhante ao encontrado nas paredes depositadas anteriormente. Com isso, a altura do cone com melhor qualidade superficial (33,00 mm) é aproximadamente 39,40% maior do que a parede curva (20,00 mm) e 54,55% maior do que a parede plana (15,00 mm). A altura do primeiro, segundo, terceiro, quarto e quinto bloco, é de 23,05 mm, 20,20 mm, 17,70 mm, 14,75 mm e 8,90 mm, respectivamente, totalizando uma altura de 84,60 mm. O ângulo de inclinação do cone é de 60,44°, valor próximo ao ângulo de inclinação da parede plana (57,90°) e das paredes curvas (61,76° e 62,30°). No entanto, o cone possui uma área efetiva 14,10% menor e uma largura efetiva 52,01% menor em comparação com a parede plana. A área efetiva foi consideravelmente reduzida devido à menor largura na intercamada dos blocos causada pelo resfriamento, como discutido anteriormente.

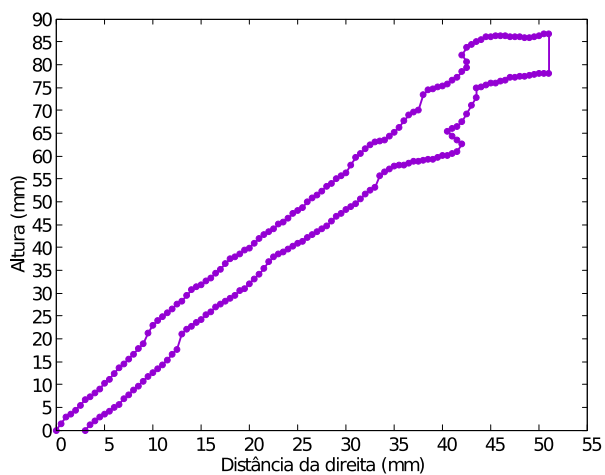
O processo de resfriamento natural não se mostra eficiente quando ocorre a diminuição do raio do cone. Como alternativa, métodos de resfriamento ativo devem ser aplicados, como relatado por Silva et al. (2020), que desenvolveram um método de resfriamento utilizando um tanque com água. O processo consiste em elevar o nível de água à medida que as camadas são depositadas. Como resultado, a técnica permitiu a deposição de uma parede com maior altura e largura constante ao longo de toda a sua seção, em comparação com a parede depositada com resfriamento natural. No entanto, devido às limitações do equipamento e dos recursos disponíveis, só é possível utilizar o resfriamento passivo na deposição do cone.





**Figura 55** Cone fabricado em 5 blocos (20+20+20+20+16 camadas).

Na análise da curvatura do cone, que pode ser visualizada na Figura 56, observa-se que a altura máxima obtida foi de aproximadamente 85 mm, e a distância máxima na horizontal a partir da origem é de aproximadamente 51 mm. A curvatura da parte superior e inferior apresenta geometrias semelhantes até o 3º bloco (61 mm de altura). A partir desse ponto, a parte inferior apresenta ondulação com maior largura, que reduziram progressivamente até o final da deposição do bloco. O último bloco, com uma altura variando de 75 até 85 mm, possui curvatura com uma altura máxima na parte inferior de 78 mm.



**Figura 56** Variação na altura da seção do cone.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou a deposição de peças inclinadas por MADA via CMT convencional, utilizando diferentes estratégias e parâmetros. Foram fabricadas peças com diferentes quantidades de camadas, comprimentos e geometrias. As estratégias empregadas foram a deposição com arco contínuo, arco interrompido e por blocos. Os efeitos dos parâmetros, tais como velocidade de alimentação do arame, velocidade de deslocamento da tocha e avanço, também foram estudados devido aos impactos no aporte térmico e na viscosidade da poça de fusão. Diante do exposto, apresentam-se as seguintes conclusões:

- Peças planas com 10 camadas e 50 mm de comprimento:
  1. Efeito da velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ):
    - a) Ao elevar  $V_a$  de 1,40 m/min para 1,70 m/min com  $V_d$  de 6,0 mm/s, há aumento de 25,50% na entrada de calor. Com  $V_d$  de 8,0 mm/s, o aumento é de 23,70%;
    - b) Ao aumentar  $V_a$  de 1,40 m/min para 1,70 m/min, o ângulo de inclinação reduz 12,0% com  $V_d$  de 6,0 mm/s e 39,60% com  $V_d$  de 8,0 mm/s;
    - c) O aumento da  $V_a$  influencia a inclinação da peça devido à diminuição da viscosidade da poça de fusão, resultando em peças com menor inclinação.
  2. Efeito da velocidade de deslocamento da tocha ( $V_d$ ):
    - a) Nota-se uma diminuição de 23,30% na entrada de calor conforme  $V_d$  aumenta de 6,0 mm/s para 8,0 mm/s, ao empregar  $V_a$  de 1,40 m/min. Essa redução é bem próxima, atingindo 24,40%, quando  $V_a$  é ajustada para 1,70 m/min;
    - b) Ao aumentar  $V_d$  de 6,0 mm/s para 8,0 mm/s, os ângulos obtidos utilizando  $V_a$  de 1,40 m/min foram próximos (44,80° e 43,60°), e utilizando  $V_a$  de 1,70 m/min foi observada uma redução no ângulo de 33,20%;
    - c) O aumento da  $V_d$  resulta em camadas com menor largura e peças com menor inclinação.
  3. Efeito do avanço da tocha:
    - a) Ao empregar diferentes estratégias (arco contínuo e interrompido), a largura da camada não era adequada para permitir a deposição ao avançar a tocha em 1,0 mm e 2,0 mm. Portanto, não foi possível obter peças inclinadas com os parâmetros utilizados e avanço de 1,0 mm e 2,0 mm; apenas com avanço de 0,50 mm.
  4. Efeito da estratégia de deposição (arco contínuo e interrompido):
    - a) Há um aumento de 32,70% na entrada de calor ao utilizar arco interrompido, comparado com a deposição usando arco contínuo, com  $V_a$  de 1,40 m/min e  $V_d$  de 6,0 mm/s. Ao aumentar  $V_d$  para 8,0 mm/s e  $V_a$  para 1,50 m/min, observa-se um aumento de 13,90% na entrada de calor;
    - b) Apesar do aumento no aporte térmico com arco interrompido, o ciclo térmico durante o processo é menor em comparação com a deposição contínua, devido ao resfriamento das camadas;
    - c) A peça depositada utilizando arco interrompido e  $V_d$  de 6,0 mm/s apresentou um aumento de 71,00% no ângulo, comparada com a deposição contínua. No entanto, ao utilizar  $V_d$  de 8,0 mm/s, essa estratégia não se mostrou eficaz, apresentando ângulos próximos (37,50° e 35,90°).
- Peça plana e curva depositada com arco contínuo, maior quantidade de camadas (71 e 57 camadas) e maior comprimento (150 mm):
  1. Efeito do aumento da quantidade de camadas e comprimento:
    - a) A peça plana deveria ser depositada com 100 camadas; no entanto, ocorreu a interrupção do arco na camada 71 devido a um problema com a DBCP;
    - b) Com o aumento da quantidade de camadas, a DBCP, que deveria ser de 12 mm, cresce ao longo do processo. Na camada 71, essa distância atingiu 39,20 mm, resultando na ocorrência *humping* e na interrupção da deposição;

- c) A qualidade superficial da peça plana diminui à medida que o número de camadas aumenta, devido à ineficiência do resfriamento natural e ao aumento do aporte térmico. Isso resulta no aumento da largura e na diminuição da altura das camadas subsequentes.
2. Efeito da variação na geometria:
- a) A peça curva apresentou um acabamento superior em uma maior quantidade de camadas em comparação com a peça plana. Isso se deve à geometria da peça curva, que contribui para a estabilidade do arco e a fluidez da poça de fusão;
  - b) A dissipação térmica na peça curva é menor em comparação com a peça plana, resultando em maior concentração de calor. Isso leva a uma menor taxa de resfriamento e à diminuição da viscosidade da poça de fusão, gerando camadas com menor altura e maior largura.
- Peça depositada utilizando diferente geometria (cone) e estratégia (deposição por blocos):
    - 1. Efeito da variação na estratégia e geometria:
      - a) Durante a deposição da primeira camada, ocorreu *humping*, interrompendo brevemente o arco ao percorrer uma área sem material. Esse defeito se estendeu até o início da deposição do segundo bloco. Uma solução é depositar as primeiras camadas com uma corrente mais elevada, melhorando a transferência de material quando o substrato ainda está frio e evitando a interrupção do arco;
      - b) A partir do terceiro bloco, a DBCP aumentou devido ao acúmulo de calor no interior da peça, resultante da falta de dissipação térmica, e à entrada elevada de calor devido à redução da circunferência, o que afetou a viscosidade da poça de fusão;
      - c) A altura do cone com melhor qualidade superficial é 39,40% maior do que a peça curva e 54,55% maior do que a peça plana;
      - d) O cone possui uma área efetiva 14,10% menor e uma largura efetiva 52,01% menor em comparação com a peça plana. A área efetiva foi consideravelmente reduzida devido à menor largura na intercâmara dos blocos causada pelo resfriamento;
      - e) O processo de resfriamento natural não se mostra eficiente quando ocorre a diminuição do raio do cone. No entanto, a estratégia de deposição por blocos mostrou-se eficaz na deposição de peças com maior quantidade de camadas para solucionar o problema da DBCP.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para pesquisas futuras, é possível explorar uma diversidade de resultados ao empregar diferentes parâmetros de deposição, geometrias e estratégias, tais como:

- Utilização de uma maior variedade de parâmetros para analisar o efeito do aporte térmico na inclinação e curvatura;
- Utilização de uma câmera térmica para monitorar a temperatura durante a deposição, possibilitando a pausa do processo quando a temperatura atingir níveis elevados. A retomada ocorreria após o resfriamento, visando aprimorar o acabamento superficial;
- Aplicação de um comando implementado no código G que ajusta automaticamente a DBCP para tornar a deposição por blocos e com arco interrompido mais eficiente;
- Realização de deposição com a tocha inclinada, com o objetivo de ampliar a variedade de geometrias que podem ser depositadas;
- Realização da deposição de um cone invertido, ou seja, com o raio aumentando em vez de diminuir.

# REFERÊNCIAS

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas diferentes fontes, totalizando 143 divididas em:

• Revistas:	94
• Livros:	12
• Congressos:	4
• Normas:	6
• Monografias, dissertações e teses:	6
• Sites:	17
• Catálogos:	1
• Patentes:	3

Ano	1981-1999	2000-2009	2010-2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Fontes	4	11	43	13	13	11	14	25	8	1
	2,80%	7,69%	30,07%	9,09%	9,09%	7,69%	9,79%	17,48%	5,59%	0,70%

3D SYSTEMS. VisiJet M2R-TN (Dental), 2017. Disponível em: <<https://www.3dsystems.com/materials/visijet-m2r-tn>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

ABNT. Disponível em: <<https://www.abnt.org.br/>>. Acesso em: 15 de março de 2023.

ABNT. NBR 16798: Terminologia - Padrão para manufatura aditiva - Sistemas de coordenadas e metodologias de ensaio (ISO/ASTM 52921:2013 MOD), 2019.

ABNT. NBR ISO 16627-1: Implantes para cirurgia - Projeto de implantes fabricados por manufatura aditiva- Parte 1: Terminologia, 2020.

ABNT. NBR ISO 17296-2: Manufatura aditiva - Princípios gerais - Parte 2: Visão geral de categorias de processo e de matéria-prima, 2019.

ABNT. NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura Aditiva - Princípios gerais - Terminologia, 2018.

ABNT. NBR ISO/ASTM 52901: Manufatura aditiva - Princípios gerais - Requisitos para peças compradas, fabricadas por manufatura aditiva, 2019.

ABNT. NBR ISO/ASTM 52915: Especificação do Formato de Arquivo para Manufatura Aditiva (AMF) Versão 1.2, 2020.

ADEBAYO, ADEYINKA; MEHNEN, JORN; TONNELIER, XAVIER. Limiting travel speed in additive layer manufacturing, 2013. Disponível em: <<http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/8477>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2023.

AL-BERMANI, S. S.; BLACKMORE, M. L.; ZHANG, W.; TODD, I. The Origin of Microstructural Diversity, Texture, and Mechanical Properties in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 41, no. 13, p. 3422-3434, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0397-x>.

ARRIZUBIETA, JON IÑAKI; UKAR, OLATZ; OSTOLAZA, MARTA; MUGICA, ARANTZA. Study of the environmental implications of using metal powder in additive manufacturing and its handling. *Metals*, vol. 10, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10020261>.

- AWS. Fundamentals of Welding. 9ª Edição, Vol. 1, 2004, 373p.
- BAKER, RALPH. Method of making decorative articles. Patente US1533300A, 1925.
- BANDYOPADHYAY, AMIT; BOSE, SUSMITA. Additive Manufacturing. Boca Raton, FL, Crc Press, 2016.
- BAUM, L.; FICHTER, V. Os soldadores de gás inerte, MIG/MAG, a soldagem prática. 1999.
- BLAKEY-MILNER, BYRON; GRADL, PAUL; SNEDDEN, GLEN; BROOKS, MICHAEL; PITOT, JEAN; LOPEZ, ELENA; LEARY, MARTIN; BERTO, FILIPPO; ANTON DU PLESSIS. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
- BÖHLER WELDING. BÖHLER SG 2 Solid Wire, Mild Steel, 2023. Disponível em: <[http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1\\_16699\\_en\\_BOEHLER\\_SG\\_2\\_3U10B20G\\_3\\_291525\\_EN.pdf?cache=1648417168](http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1_16699_en_BOEHLER_SG_2_3U10B20G_3_291525_EN.pdf?cache=1648417168)>. Acesso em: 20 de Junho de 2023.
- BONNEAU, VINCENT; IDATE, HAO YI; PROBST, LAURENT; BERTRAND, PEDERSEN; LONKEU, OLIVIA-KELLY. The Disruptive Nature of 3D Printing. *European Commission: Brussels, Belgium*, 2017.
- ÇAM, GÜREL. Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, p. 77–85, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137>.
- CARNEIRO, O.S.; SILVA, A.F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, vol. 83, p. 768–776, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>.
- CHANDRASEKARAN, SRINIVASAN; HARI, S.; AMIRTHALINGAM, MURUGAIYAN. Wire arc additive manufacturing of functionally graded material for marine risers. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 792, p. 139530, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530>.
- CHAPUT, CHRISTOPHE; CHARTIER, THIERRY. Fabrication of ceramics by stereolithography. *RTe journal - Forum für Rapid Technologie*, 2007. Disponível em: <[https://rtejournal.de/wp-content/uploads/2007\\_Fabrication-of-ceramics-by-stereolithography.pdf](https://rtejournal.de/wp-content/uploads/2007_Fabrication-of-ceramics-by-stereolithography.pdf)>. Acesso em: 27 de dezembro de 2022.
- CHEN, AN-NAN; WU, JIA-MIN; LIU, KAI; CHEN, JING-YAN; XIAO, HUAN; CHEN, PENG; LI, CHEN-HUI; SHI, YU-SHENG. High-performance ceramic parts with complex shape prepared by selective laser sintering: a review. *Advances in Applied Ceramics*, vol. 117, no. 2, p. 100–117, 2017. <https://doi.org/10.1080/17436753.2017.1379586>.
- CHEN, ZHANGWEI; LI, ZIYONG; LI, JUNJIE; LIU, CHENGBO; LAO, CHANGSHI; FU, YUELONG; LIU, CHANGYONG; LI, YANG; WANG, PEI; HE, YI. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no. 4, p. 661–687, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>.
- CORREIA, D. S.; GONÇALVES, C. V.; JUNIOR, SEBASTIÃO S. C.; FERRARESI, V. A. GMAW welding optimization using genetic algorithms. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 26, p. 28–32, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000100005>.

- DEBROY, T.; WEI, H.L; ZUBACK, J.S; MUKHERJEE, T; ELMER, J.W; MILEWSKI, J.O; BEESE, A.M; A. WILSON-HEID; DE, A; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, vol. 92, p. 112–224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- DING, DONGHONG; PAN, ZENGXI; CUIURI, DOMINIC; LI, HUIJUN. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 34, p. 8–19, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>.
- DING, DONGHONG; PAN, ZENGXI; CUIURI, DOMINIC; LI, HUIJUN; LARKIN, NATHAN; VAN DUIN, STEPHEN. Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 37, p. 139–150, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.002>.
- ELKASEER, A.; CHEN, K. J.; JANHSEN, J. C.; REFLE, O.; HAGENMEYER, V.; SCHOLZ, S. G. Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. *Additive Manufacturing*, v. 60, p. 103270, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103270>.
- ELREFAEY, AHMED; ROSS, NIGEL G. Microstructure and Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welding Similar and Dissimilar Aluminum Alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 28, no. 6, p. 715–724, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40195-015-0252-6>.
- ENGINEERING PRODUCT DESIGN. What is Sheet Lamination? 2022. Disponível em: <<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- ERMAKOVA, ANNA; MEHMANPARAST, ALI; GANGULY, SUPRIYO; RAZAVI, JAVAD; BERTO, FILIPPO. Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components. *International Journal of Fracture*, vol. 235, no. 1, p. 47–59, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10704-021-00545-8>.
- ESPERA JR., ALEJANDRO H.; VALINO, ARNALDO D.; PALAGANAS, JEROME O.; SOUZA, LUCIO; CHEN, QIYI; ADVINCULA, RIGOBERTO C. 3D Printing of a Robust Polyamide-12-Carbon Black Composite via Selective Laser Sintering: Thermal and Electrical Conductivity. *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 304, no. 4, p. 1800718, 2019. <https://doi.org/10.1002/mame.201800718>.
- FERNANDES, M.O. “Projeto de instalação de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade”. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TGno06, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.22, 2016.
- FITNIK. WAAM (Wire-Arc Additive Manufacturing) | LLC Fitnik technologies. 2022. Disponível em: <<http://fitnik.tech/en/technologies/waam>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- FORMLABS. SLA vs. DLP: Compare Resin 3D Printers, 2020. Disponível em: <<https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- FRONIUS. Manual de operação TransPuls Synergic 5000 CMT Advanced. Código 42,0426,0001,EN 024-15122020, 2020. Disponível em <<https://www.fronius.com/~/-/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42,0426,0001,PB.pdf>>. Acesso em: 14 de Junho de 2023.



- FURUKAWA, K. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Welding International*, vol. 20, no. 6, p. 440–445, 2006. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>.
- GARCIA, ENRIQUE J; WARDLE, BRIAN L; HART, A. JOHN. Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, p. 1065–1070, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.03.011>.
- GARDNER, LEROY; KYVELOU, PINELOPI; HERBERT, GORDON; BUCHANAN, CRAIG. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 172, p. 106233, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106233>.
- GIBSON, IAN; ROSEN, DAVID; STUCKER, BRENT; KHORASANI, MAHYAR. Additive Manufacturing Technologies. *Cham: Springer International Publishing*, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
- GOEHRKE, SARAH ANDERSON. Johnson Matthey Focuses on Binder Jet Ceramic 3D Printing, Opens New R&D Facility. 2017. *3D Print*. Disponível em: <<https://3dprint.com/183597/johnson-matthey-ceramic-am/>>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.
- GONG, HAIJUN; SNELLING, DEAN; KARDEL, KAMRAN; CARRANO, ANDRES. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM and SLM Based Additive Manufacturing Processes. *JOM*, vol. 71, no. 3, p. 880–885, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3>.
- GONZALEZ, J. A.; MIRELES, J.; LIN, Y.; WICKER, R. B. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, vol. 42, no. 9, p. 10559–10564, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.079>.
- GRIFFITH, M. L.; ENSZ, M. T.; PUSKAR, J. D.; ROBINO, C. V.; BROOKS, J. A.; PHILLIBER, J. A.; SMUGERESKY, J. E.; HOFMEISTER, W. H. Understanding the Microstructure and Properties of Components Fabricated by Laser Engineered Net Shaping (LENS). *MRS Proceedings*, vol. 625, 2000. <https://doi.org/10.1557/proc-625-9>.
- HARBAUGH, JENNIFER. NASA 3-D Prints First Full-Scale Copper Rocket Engine Part. *NASA*, 2015. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/marshall/news/nasa-3-D-prints-first-full-scale-copper-rocket-engine-part.html>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2022.
- HOFFMANN, MIGUEL; ELWANY, ALAA. In-Space Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 145, 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4055603>.
- HOOPER, PAUL A. Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, vol. 22, p. 548–559, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.032>.
- HUANG, JIGANG; QIN, QIN; WEN, CHENG; CHEN, ZHUOXI; HUANG, KUNLAN; FANG, XIA; WANG, JIE. A dynamic slicing algorithm for conformal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, vol. 51, p. 102622, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102622>.
- HUANG, LEI; CHEN, XIZHANG; KONOVALOV, SERGEY; SU, CHUANCHU; FAN, PENGFEI; WANG, YANHU; XIAOMING, PAN; PANCHENKO, IRINA. A Review of Challenges for Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02823-y>.
- HUBS. Introduction to material jetting 3D printing, 2022. Disponível em: <<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.

- HULL, CHARLES W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patente US4575330A, 1986.
- HUR, HYUK; PARK, YU JIN; KIM, DONG-HYUN; KO, JONG WAN. Material extrusion for ceramic additive manufacturing with polymer-free ceramic precursor binder. *Materials & Design*, vol. 221, p. 110930, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110930>.
- JANSSEN, ROLF; SCHEPPOKAT, SVEN; CLAUSSEN, NILS. Tailor-made ceramic-based components—Advantages by reactive processing and advanced shaping techniques. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 28, p. 1369–1379, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.022>.
- JAVAID, MOHD; HALEEM, ABID; RAVI PRATAP SINGH; SUMAN, RAJIV; RAB, SHANAY. Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, p. 312–322, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>.
- JIANG, JINGCHAO; XU, XUN; STRINGER, JONATHAN. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>.
- KAZANAS, PANAGIOTIS; DEHERKAR, PREETAM; ALMEIDA, PEDRO; LOCKETT, HELEN; WILLIAMS, STEWART. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 226, no. 6, p. 1042–1051, 2012. <https://doi.org/10.1177/0954405412437126>.
- KERSTENS, FABIO; CERVONE, ANGELO; GRADL, PAUL. End to end process evaluation for additively manufactured liquid rocket engine thrust chambers. *Acta Astronautica*, vol. 182, p. 454–465, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.02.034>.
- KING, WAYNE E; BARTH, HOLLY D; CASTILLO, VICTOR M; GALLEGOS, GILBERT F; GIBBS, JOHN W; HAHN, DOUGLAS E; KAMATH, CHANDRIKA; RUBENCHIK, ALEXANDER M. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, p. 2915–2925, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005>.
- KLOCKE, F. Modern approaches for the production of ceramic components. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 17, p. 457–465, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(96\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(96)00163-X).
- KUMARAN, T. A. VIGNESHWARA; REDDY, S. A. NITHIN JOSEPH; JEROME, S.; ANBARASAN, N.; ARIVAZHAGAN, N.; MANIKANDAN, M.; SATHISHKUMAR, M. Development of Pulsed Cold Metal Transfer and Gas Metal Arc Welding Techniques on High-Strength Aerospace-Grade AA7475-T761. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, no. 11, p. 7270–7290, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05240-8>.
- LAKHDAR, Y.; TUCK, C; BINNER, J; TERRY, A; GOODRIDGE, R. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, vol. 116, p. 100736, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>.
- LI, YIFENG; QIN, XUNPENG; WU, QIANG; HU, ZEIQI; SHAO, TAN. Fabrication of curved overhanging thin-walled structure with robotic wire and arc additive manufacturing (RWAAM). *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 47, no. 1, p. 102–110, 19 Aug. 2019. <https://doi.org/10.1108/ir-05-2019-0112>.

- LISKEVYCH, O.; CARLI, P.S.; SANTOS, L.F.; ALMEIDA, E.M.; NOVELINO, A.L.B.; ZIBEROV, M. Análise Experimental de Tensões Residuais em Peças Produzidas por Manufatura Aditiva a Arco, In: 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF, Brasília, 2023.
- LIU, GUO; ZHANG, XIAOFENG; CHEN, XULIANG; HE, YUNHU; CHENG, LIZI; HUO, MENGKE; YIN, JIANAN; HAO, FENGQIAN; CHEN, SIYAO; WANG, PEIYU; YI, SHENGHUI; WAN, LEI; MAO, ZHENGYI; CHEN, ZHOU; WANG, XU; CAO, ZHAOWENBO; LU, JIAN. Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 145, p. 100596, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.
- LIU, ZHIYUAN; ZHAO, DANDAN; WANG, PEI; YAN, MING; YANG, CAN; CHEN, ZHANGWEI; LU, JIAN; LU, ZHAOPING. Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 100, p. 224–236, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.011>.
- LOVO, J. F. P.; CAMARGO, I. L. de; ERBERELI, R.; MORAIS, M. M.; FORTULAN, C. A. Vat Photopolymerization Additive Manufacturing Resins: Analysis and Case Study. *Materials Research*, [s. l.], v. 23, 2020. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0010>.
- MADHAVADAS, VAISHNAV; SRIVASTAVA, DIVYANSH; CHADHA, UTKARSH; ARAVIND RAJ, SAKTHIVEL; THARIQ, MOHAMED; SHAHAR, FARAH SYAZWANI; AIN. A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace components. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 39, p. 18–36, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>.
- MARQUES, PAULO VILLANI; MODENESI, PAULO JOSÉ; BRACARENSE, ALEXANDRE QUEIROZ. Soldagem Fundamentos e Tecnologia. 3ª ed, 2011.
- MARTIN, JOHN H; BRENNAN D, YAHATA; HUNDLEY, JACOB M; MAYER, JUSTIN A; SCHAEGLER, TOBIAS A; POLLOCK, TRESA M. 3D printing of highstrength aluminium alloys. *Nature*, vol. 549, no. 7672, p. 365–369, 2017. <https://doi.org/10.1038/nature23894>.
- MENDES, RODRIGO FLORES. Integração e planejamento de trajetória de um robô cartesiano para construção de modelos por soldagem 3D. 2019. 10, 80 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- MENG, LIANG; ZHANG, WEIHONG; QUAN, DONGLIANG; SHI, GUANGHUI; TANG, LEI; HOU, YULIANG; BREITKOPF, PIOTR; ZHU, JIHONG; GAO, TONG. From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap. *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, no. 3, p. 805–830, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09331-1>.
- MIYANAJI, HADI; ZHANG, SHANSHAN; YANG, LI. A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 124, p. 1–11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.09.001>.
- MOTWANI, AMIT; KUMAR, ANAND; PURI, YOGESH; LAUTRE, NITIN KUMAR. Mechanical characteristics and microstructural investigation of CMT deposited bimetallic SS316LSi-IN625 thin wall for WAAM. *Welding in the World*, 3 Nov. 2022. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01403-4>.
- MUELLER, ROBERT P.; GELINO, NATHAN J.; SMITH, JONATHAN D.; BUCKLES, BRAD C.; LIPPITT, THOMAS; SCHULER, JASON M.; NICK, ANDREW J.; NUGENT, MATT W.; TOWNSEND, IVAN I. Zero Launch Mass Three-Dimensional Print Head. *Earth and Space 2018*, 2018. <https://doi.org/10.1061/9780784481899.022>.

- MX3D Bridge | MX3D. Disponível em: <<https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2022.
- NAGASAI, BELLAMKONDA PRASANNA; MALARVIZHI, SUDERSANAN; BALASUBRAMANIAN, VISVALINGAM. Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 36, p. 100–116, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.005>.
- NETO, PEDRO LEONCIO DA SILVA. Instalação, configuração e integração dos dispositivos de controle de um robô cartesiano. 2018. 105 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- NOVELINO, A. L. B. Estudo da geometria dos cordões fabricados pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.
- NOVELINO, A.L.B.; CARVALHO, G.C.; ZIBEROV, M. Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 5, p. 100105, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100105>.
- NURHUDAN, AGHNIA ILMIAH; SUPRIADI, SUGENG; WHULANZA, YUDAN; SARAGIH, AGUNG SHAMSUDDIN. Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 66, p. 228–237, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.018>.
- OLIVEIRA, C.C.F. Análise da microestrutura de peças impressas de arame ER70S-6 obtidas através de Manufatura Aditiva Por Deposição a Arco via processo GMAW-CMT, 2022. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.
- PALANI, P.K.; MURUGAN, N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, no. 1, p. 1–10, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.07.013>.
- PANCHAGNULA, JAYAPRAKASH SHARMA; SIMHAMBHATLA, SURYAKUMAR. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 49, p. 194–203, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.003>.
- PILIPOVIĆ, ANA. Chapter 11 - sheet lamination. In: IZDEBSKA-PODSIADŁY, Joanna (ed.). [S. l.]: William Andrew Publishing, 2022. p. 127–136. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818311-3.00008-2>.
- PONOMAROV, VOLODYMYR; REIS, RUHAM PABLO. Técnicas de confecção de canais superficiais e subsuperficiais em peças metálicas utilizando processos de soldagem. Patente BR102014012951-0, 2014.
- RAJAN, KUMARESAN; SAMYKANO, MAHENDRAN; KADIRGAMA, KUMARAN; HARUN, WAN SHARUZI WAN; RAHMAN, MD. MUSTAFIZUR. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08860-7>.
- RAJU, RAMESH; MANIKANDAN, N.; PALANISAMY, D.; ARULKIRUBAKARAN, D.; BINOJ, J. S.; THEJASREE, P.; AHILAN, C. A Review of Challenges and Opportunities in Additive Manufacturing. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 23–29, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0244-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0244-4_3).

- REIS, RUHAM; SCOTTI, AMÉRICO. Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma. *Artliber*, 2007.
- RODRIGUES, TIAGO A.; DUARTE, V.; AVILA, JULIAN A.; SANTOS, TELMO G.; MIRANDA, R.M.; OLIVEIRA, J.P. Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, vol. 27, p. 440–450, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.029>.
- RODRIGUES, TIAGO A.; DUARTE, V.; MIRANDA, R.M.; SANTOS, TELMO G.; OLIVEIRA, J.P. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*, vol. 12, no. 7, p. 1121, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12071121>.
- SACRAMENTO, CALIF. Aerojet Rocketdyne Successfully Tests Thrust Chamber Assembly Using Copper Alloy Additive Manufacturing Technology. 2014. *GlobeNewswire News Room*. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2014/10/17/674222/19444/en/Aerojet-Rocketdyne-Successfully-Tests-Thrust-Chamber-Assembly-Using-Copper-Alloy-Additive-Manufacturing-Technology.html>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2022.
- SAFAEE, SHAHRIAR; SCHOCK, MATTHEW; JOYEE, ERINA B; PAN, YAYUE; CHEN, ROLAND K. Field-assisted additive manufacturing of polymeric composites. *Additive Manufacturing*, vol. 51, p. 102642, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102642>.
- SALIFU, SMITH; DESAI, DAWOOD; OGUNBIYI, OLUGBENGA; MWALE, KAMPAMBA. Recent development in the additive manufacturing of polymer-based composites for automotive structures—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, p. 1–15, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08569-z>.
- SAMAT, ABDUL; HAMID, ABDUL; JAAFAR, MARIATTI; YAHAYA, BADRUL HISHAM. Mechanical properties and in vitro evaluation of thermoplastic polyurethane and polylactic acid blend for fabrication of 3D filaments for tracheal tissue engineering. *Polymers*, vol. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13183087>.
- SAMES, W J; LIST, F A; PANNALA, S.; DEHOFF, R; BABU, S S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, vol. 61, p. 315–360, 2016. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>.
- SARVANKAR, SHRUTI GANESH; YEWALE, SANKET NANDARAM. Additive manufacturing in automobile industry. *Int J Res Aeronaut Mech Eng* 7(4):1–10, 2019.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Lexium Cartesian Robots. Disponível em: <[https://download.schneider-electric.com/files?p\\_Doc\\_Ref=DIA7ED2210101EN&p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=Catalog+Lexium+Cartesian+Robots\\_November+2021.pdf](https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=DIA7ED2210101EN&p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Catalog+Lexium+Cartesian+Robots_November+2021.pdf)>. Acesso em: 14 de Junho de 2023.
- SCULPTEO. Metal Material for 3D Printing: Binder Jetting Stainless Steel 316L, 2022. Disponível em: <<https://www.sculptheo.com/en/materials/binder-jetting-material/binder-jetting-stainless-steel-316/>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- SCULPTEO. Titanium Material for 3D Printing: 3D Printing Metal, 2022. Disponível em: <<https://www.sculptheo.com/en/materials/dmls-material/dmls-titanium-material/>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- SCULPTEO. What is PLA plastic material and how to use it for 3D printing? 2022. Disponível em: <<https://www.sculptheo.com/en/materials/fdm-material/pla-material/>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- SELVI, S.; VISHVAKSENAN, A.; RAJASEKAR, E. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence Technology*, vol. 14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>.

- SHAH, ABID; ALIYEV, REZO; ZEIDLER, HENNING; KRINKE, STEFAN. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>.
- SHAH, M. A.; LEE, D.-G.; LEE, B.-Y.; HUR, S. Classifications and Applications of Inkjet Printing Technology: A Review. *IEEE Access*, v. 9, p. 140079–140102, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119219>.
- SHAMSAEI, NIMA; YADOLLAHI, AREF; BIAN, LINKAN; THOMPSON, SCOTT M. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, vol. 8, p. 12–35, 2015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>.
- SILVA, LEANDRO JOÃO DA; SOUZA, DANIELLE MONTEIRO; ARAÚJO, DOUGLAS BEZERRA DE; REIS, RUHAM PABLO; SCOTTI, AMÉRICO. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 5-6, p. 2513–2523, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>.
- SINGH, PARAMJOT; BALLA, VAMSI K.; TOFANGCHI, ALIREZA; ATRE, SUNDAR V.; KATE, KUNAL H. Printability studies of Ti-6Al-4V by metal fused filament fabrication (MF3). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 91, p. 105249, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105249>.
- SOARES, M.J; LUIZ, André; ZIBEROV, Maksym. Geometry Study on 410NiMo Alloy Parts Printed by WAAM-CMT. *Lecture notes in mechanical engineering*, p. 114–125, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43555-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43555-3_11).
- SUN, JINXING; YE, DAORONG; ZOU, JI; CHEN, XIAOTENG; WANG, YUE; YUAN, JINSI; LIANG, HAOWEN; QU, HONGQIAO; BINNER, JON; BAI, JIAMING. A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 138, p. 1–16, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.06.039>.
- SUWANPREECHA, CHANUN; MANONUKUL, ANCHALEE. A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding. *Metals*, vol. 12, 2022. <https://doi.org/10.3390/met12030429>.
- TALALAEV, R; VEINTHAL, R; LAANSOO, A; SARKANS, M. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. *Estonian Journal of Engineering*, vol. 18, no. 3, p. 243, 2012. <https://doi.org/10.3176/eng.2012.3.09>.
- TANG, MING; PISTORIUS, P. CHRIS; BEUTH, JACK L. Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, vol. 14, p. 39–48, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.12.001>.
- THOMAS, DOUGLAS; GILBERT, STANLEY. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. 2014. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>.
- TOFAIL, SYED A.M.; KOUMOULOS, ELIAS P; BANDYOPADHYAY, AMIT; BOSE, SUSMITA; O'DONOGHUE, LISA; COSTAS CHARITIDIS. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, vol. 21, p. 22–37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.



- TOKAR, ANNA. Confecção de canais subsuperficiais de resfriamento/aquecimento em peças metálicas pela ação de um arco de soldagem, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14778/1/ConfeccaoCanaisSubsuperficiais.pdf>>. Acesso em: 20 Junho de 2023.
- TOMLIN, MATTHEW; MEYER, JONATHAN. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part. *The 7th Altair CAE Technology Conference*, 2011. Disponível em: <<https://www.mmsonline.com/cdn/cms/uploadedFiles/Topology-Optimization-of-an-Additive-Layer-Manufactured-Aerospace-Part.pdf>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2022
- TOPMAXTECH. Types of 3D printers or 3D printing technologies overview, 2015. Disponível em: <<https://en.topmaxtech.net/?p=279>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.
- TOROPCHIN, A; FROLOV, V; PIPA, A V; KOZAKOV, R; UHRLANDT, D. Influence of the arc plasma parameters on the weld pool profile in TIG welding. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 550, p. 012004, 26 Nov. 2014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/550/1/012004>.
- TURNER, B. N.; STRONG, R.; A. GOLD, S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.
- VALDIVIESO, CARTOLA. Ceramic 3D Printing: A Revolution within Additive Manufacturing? 2019. *3D Natives*. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/ceramic-3d-printing-170420194>>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.
- VERHOEF, LEENDERT A; BUDDE, BART W; CHOCKALINGAM, CINDHUJA; NODAR, BRAIS GARCÍA; WIJK. The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy*, vol. 112, p. 349–360, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.034>.
- VIVANCO, PAULA ANDREA PELÁEZ; CARVALHO, GUILHERME CARIBÉ; ZIBEROV, MAKSYM. Modelagem das características geométricas de paredes construídas por manufatura aditiva a arco de arame (WAAM) via deposição metálica contínua pelo processo GMAW pulsado com o arame SFA/AWS A5.18: ER70S-6. 2023. 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF).
- WAHAB, M.A. Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding. *Comprehensive Materials Processing*, p. 49–76, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00610-5>.
- WALLACE, J.; WANG, M. O.; THOMPSON, P.; BUSSO, M.; BELLE, V.; MAMMOSER, N.; KIM, K.; FISHER, J. P.; SIBLANI, A.; XU, Y.; WELTER, J. F.; LENNON, D. P.; SUN, J.; CAPLAN, A. I.; DEAN, D. Validating continuous digital light processing (cDLP) additive manufacturing accuracy and tissue engineering utility of a dye-initiator package. *Biofabrication*, v. 6, n. 1, p. 015003, 2014. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/6/1/015003>.
- WANG, XIN; JIANG, MAN; ZHOU, ZUOWAN; GOU, JIHUA; HUI, DAVID. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, p. 442–458, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- WANG, YINGYA; MÜLLERTZ, ANETTE; RANTANEN, JUKKA. Additive Manufacturing of Solid Products for Oral Drug Delivery Using Binder Jetting Three-Dimensional Printing. *AAPS PharmSciTech*, vol. 23, no. 6, p. 196, 2022. <https://doi.org/10.1208/s12249-022-02321-w>.
- WEMAN, KLAS. Welding processes handbook. *Woodhead Pub*, 2012.

- WILLIAMS, S W; MARTINA, F; ADDISON, A C; DING, J; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, vol. 32, p. 641–647, 2016. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
- WOHLERS, TERRY T.; ASSOCIATES, WOHLERS; CAMPBELL, IAN; CAFFREY, TIM; DIEGEL, OLAF; KOWEN, JOSEPH. Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report. *Wohlers Associates*, 2018.
- WU, CHENMING; DAI, CHENGKAI; FANG, GUOXIN; LIU, YONG-JIN; WANG, CHARLIE C.L. RoboFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017. pp. 1175–1180. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989140>.
- WU, DONGSHENG; HUA, XUEMING; YE, DINGJIAN; LI, FANG. Understanding of humping formation and suppression mechanisms using the numerical simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.110>.
- WU, WENZHENG; GENG, PENG; LI, GUIWEI; ZHAO, DI; ZHANG, HAIBO; ZHAO, JI. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, vol. 8, p. 5834–5846, 2015. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>.
- XIONG, JUN; LEI, YANGYANG; CHEN, HUI; ZHANG, GUANGJUN. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, p. 397–403, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019>.
- 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*, vol. 87, no. 1-4, p. 579–586, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8543-2>.
- XU, JIE; MA, YIMING; WANG, LIN; ZHANG, YIRAN; LU, XU. Numerical investigation on the influence of current waveform on droplet transfer in pulsed gas metal arc welding. *Vacuum*, vol. 203, p. 111230, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111230>.
- YAKOUT, MOSTAFA; ELBESTAWI, M.A.; VELDHUIS, STEPHEN C. Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 266, p. 397–420, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.006>.
- YAN, ZHAOYANG; ZHAO, YUN; JIANG, FAN; CHEN, SHUJUN; LI, FANG; CHENG, WEI; MA, XINQIANG. Metal transfer behaviour of CMT-based step-over deposition in fabricating slant features. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 71, p. 147–155, 1 Nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.027>.
- YANG, L.; HSU, K.; BAUGHMAN, B.; GODFREY, D.; MEDINA, F.; MENON, M.; WIENER, S. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. [S. l.]: Springer, 2017. ISBN 9783319551289. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-55128-9>.
- YANG, Y.; FUH, J.Y.H.; LOH, H.T.; WONG, Y.S. Multi-orientational deposition to minimize support in the layered manufacturing process. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 22, no. 2, p. 116–129, 2003. [https://doi.org/10.1016/s0278-6125\(03\)90009-4](https://doi.org/10.1016/s0278-6125(03)90009-4).

- YUAN, LEI; PAN, ZENGXI; DING, DONGHONG; HE, FENGYANG; VAN DUIN, STEPHEN; LI, HUIJUN; LI, WEIHUA. Investigation of humping phenomenon for the multi-directional robotic wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 63, p. 101916, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101916>.
- YUAN, LEI; PAN, ZENGXI; DING, DONGHONG; YU, ZIPING; VAN DUIN, STEPHEN; LI, HUIJUN; LI, WEIHUA; NORRISH, JOHN. Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 63, p. 24–34, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.018>.
- ZHANG, XUEQIN; ZHANG, KEQIANG; ZHANG, LU; WANG, WENQING; LI, YING; HE, RUJIE. Additive manufacturing of cellular ceramic structures: From structure to structure–function integration. *Materials & Design*, vol. 215, p. 110470, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110470>.
- ZIEMIAN, C. W.; CIPOLETTI, D. E.; ZIEMIAN, S. N.; OKWARA, M. N.; HAILE, K. V. Monotonic and Cyclic Tensile Properties of ABS Components Fabricated by Additive Manufacturing, 2014. <https://doi.org/10.26153/tsw/15704>.

# APÊNDICE A - CÓDIGO G

PAREDE INCLINADA PLANA DE 10 CAMADAS E 50 MM DE COMPRIMENTO COM ARCO CONTÍNUO				
VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA TOCHA (MM/S)				
8,0			6,0	
AVANÇO (MM)			AVANÇO (MM)	
0,5	1,0	2,0	0,5	1,0
N01 G01 Y50 F8	N01 G01 Y50 F8	N01 G01 Y50 F8	N01 G01 Y50 F6	N01 G01 Y50 F6
N02 G01 Z-1.2 F24	N02 G01 Z-1.2 F24	N02 G01 Z-1.2 F24	N02 G01 Z-1.2 F24	N02 G01 Z-1.2 F24
N03 G01 X0.5 F24	N03 G01 X1 F24	N03 G01 X2 F24	N03 G01 X0.5 F24	N03 G01 X1 F24
N04 G01 Y0 F8	N04 G01 Y0 F8	N04 G01 Y0 F8	N04 G01 Y0 F6	N04 G01 Y0 F6
N05 G01 Z-2.4 F24	N05 G01 Z-2.4 F24	N05 G01 Z-2.4 F24	N05 G01 Z-2.4 F24	N05 G01 Z-2.4 F24
N06 G01 X1 F24	N06 G01 X2 F24	N06 G01 X4 F24	N06 G01 X1 F24	N06 G01 X2 F24
N07 G01 Y50 F8	N07 G01 Y50 F8	N07 G01 Y50 F8	N07 G01 Y50 F6	N07 G01 Y50 F6
N08 G01 Z-3.6 F24	N08 G01 Z-3.6 F24	N08 G01 Z-3.6 F24	N08 G01 Z-3.6 F24	N08 G01 Z-3.6 F24
N09 G01 X1.5 F24	N09 G01 X3 F24	N09 G01 X6 F24	N09 G01 X1.5 F24	N09 G01 X3 F24
N10 G01 Y0 F8	N10 G01 Y0 F8	N10 G01 Y0 F8	N10 G01 Y0 F6	N10 G01 Y0 F6
N11 G01 Z-4.8 F24	N11 G01 Z-4.8 F24	N11 G01 Z-4.8 F24	N11 G01 Z-4.8 F24	N11 G01 Z-4.8 F24
N12 G01 X2 F24	N12 G01 X4 F24	N12 G01 X8 F24	N12 G01 X2 F24	N12 G01 X4 F24
N13 G01 Y50 F8	N13 G01 Y50 F8	N13 G01 Y50 F8	N13 G01 Y50 F6	N13 G01 Y50 F6
N14 G01 Z-6 F24	N14 G01 Z-6 F24	N14 G01 Z-6 F24	N14 G01 Z-6 F24	N14 G01 Z-6 F24
N15 G01 X2.5 F24	N15 G01 X5 F24	N15 G01 X10 F24	N15 G01 X2.5 F24	N15 G01 X5 F24
N16 G01 Y0 F8	N16 G01 Y0 F8	N16 G01 Y0 F8	N16 G01 Y0 F6	N16 G01 Y0 F6
N17 G01 Z-7.2 F24	N17 G01 Z-7.2 F24	N17 G01 Z-7.2 F24	N17 G01 Z-7.2 F24	N17 G01 Z-7.2 F24
N18 G01 X3 F24	N18 G01 X6 F24	N18 G01 X12 F24	N18 G01 X3 F24	N18 G01 X6 F24
N19 G01 Y50 F8	N19 G01 Y50 F8	N19 G01 Y50 F8	N19 G01 Y50 F6	N19 G01 Y50 F6
N20 G01 Z-8.4 F24	N20 G01 Z-8.4 F24	N20 G01 Z-8.4 F24	N20 G01 Z-8.4 F24	N20 G01 Z-8.4 F24
N21 G01 X3.5 F24	N21 G01 X7 F24	N21 G01 X14 F24	N21 G01 X3.5 F24	N21 G01 X7 F24
N22 G01 Y0 F8	N22 G01 Y0 F8	N22 G01 Y0 F8	N22 G01 Y0 F6	N22 G01 Y0 F6
N23 G01 Z-9.6 F24	N23 G01 Z-9.6 F24	N23 G01 Z-9.6 F24	N23 G01 Z-9.6 F24	N23 G01 Z-9.6 F24
N24 G01 X4 F24	N24 G01 X8 F24	N24 G01 X16 F24	N24 G01 X4 F24	N24 G01 X8 F24
N25 G01 Y50 F8	N25 G01 Y50 F8	N25 G01 Y50 F8	N25 G01 Y50 F6	N25 G01 Y50 F6
N26 G01 Z-10.8 F24	N26 G01 Z-10.8 F24	N26 G01 Z-10.8 F24	N26 G01 Z-10.8 F24	N26 G01 Z-10.8 F24
N27 G01 X4.5 F24	N27 G01 X9 F24	N27 G01 X18 F24	N27 G01 X4.5 F24	N27 G01 X9 F24
N28 G01 Y0 F8	N28 G01 Y0 F8	N28 G01 Y0 F8	N28 G01 Y0 F6	N28 G01 Y0 F6

PAREDE INCLINADA PLANA DE 10 CAMADAS E 50 MM DE COMPRIMENTO COM ARCO INTERROMPIDO				
VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA TOCHA (MM/S)				
CAMADA	8,0			6,0
	AVANÇO (MM)			AVANÇO (MM)
	0,5	1,0		0,5
1	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
2	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y-50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
3	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
4	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y-50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
5	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
6	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y-50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
7	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
8	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y-50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
9	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24
10	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24	N01 G01 Y-50 F8 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X1 F24		N01 G01 Y-50 F6 N02 G01 Z-1.2 F24 N03 G01 X0.5 F24

**PAREDE INCLINADA PLANA DE 71 CAMADAS E 150 MM DE COMPRIMENTO**

N00 G01 X150 F8	N75 G01 X0 F8	N150 G01 X150 F8	N224 G01 Y37.5 F24
N01 G01 Z-1.2 F24	N76 G01 Z-31.2 F24	N151 G01 Z-61.2 F24	N225 G01 X0 F8
N02 G01 Y0.5 F24	N77 G01 Y13 F24	N152 G01 Y25.5 F24	N226 G01 Z-91.2 F24
N03 G01 X0 F8	N78 G01 X150 F8	N153 G01 X0 F8	N227 G01 Y38 F24
N04 G01 Z-2.4 F24	N79 G01 Z-32.4 F24	N154 G01 Z-62.4 F24	N228 G01 X150 F8
N05 G01 Y1 F24	N80 G01 Y13.5 F24	N155 G01 Y26 F24	N229 G01 Z-92.4 F24
N06 G01 X150 F8	N81 G01 X0 F8	N156 G01 X150 F8	N230 G01 Y38.5 F24
N07 G01 Z-3.6 F24	N82 G01 Z-33.6 F24	N157 G01 Z-63.6 F24	N231 G01 X0 F8
N08 G01 Y1.5 F24	N83 G01 Y14 F24	N158 G01 Y26.5 F24	N232 G01 Z-93.6 F24
N09 G01 X0 F8	N84 G01 X150 F8	N159 G01 X0 F8	N233 G01 Y39 F24
N10 G01 Z-4.8 F24	N85 G01 Z-34.8 F24	N160 G01 Z-64.8 F24	N234 G01 X150 F8
N11 G01 Y2 F24	N86 G01 Y14.5 F24	N161 G01 Y27 F24	N235 G01 Z-94.8 F24
N12 G01 X150 F8	N87 G01 X0 F8	N162 G01 X150 F8	N236 G01 Y39.5 F24
N13 G01 Z-6 F24	N88 G01 Z-36 F24	N163 G01 Z-66 F24	N237 G01 X0 F8
N14 G01 Y2.5 F24	N89 G01 Y15 F24	N164 G01 Y27.5 F24	N238 G01 Z-96 F24
N15 G01 X0 F8	N90 G01 X150 F8	N165 G01 X0 F8	N239 G01 Y40 F24
N16 G01 Z-7.2 F24	N91 G01 Z-37.2 F24	N166 G01 Z-67.2 F24	N240 G01 X150 F8
N17 G01 Y3 F24	N92 G01 Y15.5 F24	N167 G01 Y28 F24	N241 G01 Z-97.2 F24
N18 G01 X150 F8	N93 G01 X0 F8	N168 G01 X150 F8	N242 G01 Y40.5 F24
N19 G01 Z-8.4 F24	N94 G01 Z-38.4 F24	N169 G01 Z-68.4 F24	N243 G01 X0 F8
N20 G01 Y3.5 F24	N95 G01 Y16 F24	N170 G01 Y28.5 F24	N244 G01 Z-98.4 F24
N21 G01 X0 F8	N96 G01 X150 F8	N171 G01 X0 F8	N245 G01 Y41 F24
N22 G01 Z-9.6 F24	N97 G01 Z-39.6 F24	N172 G01 Z-69.6 F24	N246 G01 X150 F8
N23 G01 Y4 F24	N98 G01 Y16.5 F24	N173 G01 Y29 F24	N247 G01 Z-99.6 F24
N24 G01 X150 F8	N99 G01 X0 F8	N174 G01 X150 F8	N248 G01 Y41.5 F24
N25 G01 Z-10.8 F24	N100 G01 Z-40.8 F24	N175 G01 Z-70.8 F24	N249 G01 X0 F8
N26 G01 Y4.5 F24	N101 G01 Y17 F24	N176 G01 Y29.5 F24	N250 G01 Z-100.8 F24
N27 G01 X0 F8	N102 G01 X150 F8	N177 G01 X0 F8	N251 G01 Y42 F24
N28 G01 Z-12 F24	N103 G01 Z-42 F24	N178 G01 Z-72 F24	N252 G01 X150 F8
N29 G01 Y5 F24	N104 G01 Y17.5 F24	N179 G01 Y30 F24	N253 G01 Z-102 F24
N30 G01 X150 F8	N105 G01 X0 F8	N180 G01 X150 F8	N254 G01 Y42.5 F24
N31 G01 Z-13.2 F24	N106 G01 Z-43.2 F24	N181 G01 Z-73.2 F24	N255 G01 X0 F8
N32 G01 Y5.5 F24	N107 G01 Y18 F24	N182 G01 Y30.5 F24	N256 G01 Z-103.2 F24
N33 G01 X0 F8	N108 G01 X150 F8	N183 G01 X0 F8	N257 G01 Y43 F24
N34 G01 Z-14.4 F24	N109 G01 Z-44.4 F24	N184 G01 Z-74.4 F24	N258 G01 X150 F8
N35 G01 Y6 F24	N110 G01 Y18.5 F24	N185 G01 Y31 F24	N259 G01 Z-104.4 F24
N36 G01 X150 F8	N111 G01 X0 F8	N186 G01 X150 F8	N260 G01 Y43.5 F24
N37 G01 Z-15.6 F24	N112 G01 Z-45.6 F24	N187 G01 Z-75.6 F24	N261 G01 X0 F8
N38 G01 Y6.5 F24	N113 G01 Y19 F24	N188 G01 Y31.5 F24	N262 G01 Z-105.6 F24
N39 G01 X0 F8	N114 G01 X150 F8	N189 G01 X0 F8	N263 G01 Y44 F24
N40 G01 Z-16.8 F24	N115 G01 Z-46.8 F24	N190 G01 Z-76.8 F24	N264 G01 X150 F8
N41 G01 Y7 F24	N116 G01 Y19.5 F24	N191 G01 Y32 F24	N265 G01 Z-106.8 F24
N42 G01 X150 F8	N117 G01 X0 F8	N192 G01 X150 F8	N266 G01 Y44.5 F24
N43 G01 Z-18 F24	N118 G01 Z-48 F24	N193 G01 Z-78 F24	N267 G01 X0 F8
N44 G01 Y7.5 F24	N119 G01 Y20 F24	N194 G01 Y32.5 F24	N268 G01 Z-108 F24
N45 G01 X0 F8	N120 G01 X150 F8	N195 G01 X0 F8	N269 G01 Y45 F24
N46 G01 Z-19.2 F24	N121 G01 Z-49.2 F24	N196 G01 Z-79.2 F24	N270 G01 X150 F8
N47 G01 Y8 F24	N122 G01 Y20.5 F24	N197 G01 Y33 F24	N271 G01 Z-109.2 F24
N48 G01 X150 F8	N123 G01 X0 F8	N198 G01 X150 F8	N272 G01 Y45.5 F24
N49 G01 Z-20.4 F24	N124 G01 Z-50.4 F24	N199 G01 Z-80.4 F24	N273 G01 X0 F8
N50 G01 Y8.5 F24	N125 G01 Y21 F24	N200 G01 Y33.5 F24	N274 G01 Z-110.4 F24
N51 G01 X0 F8	N126 G01 X150 F8	N201 G01 X0 F8	N275 G01 Y46 F24
N52 G01 Z-21.6 F24	N127 G01 Z-51.6 F24	N202 G01 Z-81.6 F24	N276 G01 X150 F8
N53 G01 Y9 F24	N128 G01 Y21.5 F24	N203 G01 Y34 F24	N277 G01 Z-111.6 F24
N54 G01 X150 F8	N129 G01 X0 F8	N204 G01 X150 F8	N278 G01 Y46.5 F24
N55 G01 Z-22.8 F24	N130 G01 Z-52.8 F24	N205 G01 Z-82.8 F24	N279 G01 X0 F8
N56 G01 Y9.5 F24	N131 G01 Y22 F24	N206 G01 Y34.5 F24	N280 G01 Z-112.8 F24
N57 G01 X0 F8	N132 G01 X150 F8	N207 G01 X0 F8	N281 G01 Y47 F24
N58 G01 Z-24 F24	N133 G01 Z-54 F24	N208 G01 Z-84 F24	N282 G01 X150 F8
N59 G01 Y10 F24	N134 G01 Y22.5 F24	N209 G01 Y35 F24	N283 G01 Z-114 F24
N60 G01 X150 F8	N135 G01 X0 F8	N210 G01 X150 F8	N284 G01 Y47.5 F24
N61 G01 Z-25.2 F24	N136 G01 Z-55.2 F24	N211 G01 Z-85.2 F24	N285 G01 X0 F8
N62 G01 Y10.5 F24	N137 G01 Y23 F24	N212 G01 Y35.5 F24	N286 G01 Z-115.2 F24
N63 G01 X0 F8	N138 G01 X150 F8	N213 G01 X0 F8	N287 G01 Y48 F24
N64 G01 Z-26.4 F24	N139 G01 Z-56.4 F24	N214 G01 Z-86.4 F24	N288 G01 X150 F8
N65 G01 Y11 F24	N140 G01 Y23.5 F24	N215 G01 Y36 F24	N289 G01 Z-116.4 F24
N66 G01 X150 F8	N141 G01 X0 F8	N216 G01 X150 F8	N290 G01 Y48.5 F24
N67 G01 Z-27.6 F24	N142 G01 Z-57.6 F24	N217 G01 Z-87.6 F24	N291 G01 X0 F8
N68 G01 Y11.5 F24	N143 G01 Y24 F24	N218 G01 Y36.5 F24	N292 G01 Z-117.6 F24
N69 G01 X0 F8	N144 G01 X150 F8	N219 G01 X0 F8	N293 G01 Y49 F24
N70 G01 Z-28.8 F24	N145 G01 Z-58.8 F24	N220 G01 Z-88.8 F24	N294 G01 X150 F8
N71 G01 Y12 F24	N146 G01 Y24.5 F24	N221 G01 Y37 F24	N295 G01 Z-118.8 F24
N72 G01 X150 F8	N147 G01 X0 F8	N222 G01 X150 F8	N296 G01 Y49.5 F24
N73 G01 Z-30 F24	N148 G01 Z-60 F24	N223 G01 Z-90 F24	N297 G01 X0 F8
N74 G01 Y12.5 F24	N149 G01 Y25 F24		

**PAREDE INCLINADA CURVA DE 57 CAMADAS, 150 MM DE COMPRIMENTO E RAI0 DE 47,75 MM (PAREDE 1)**

N00 G03 Y0 X95.5 R47.75 F8	N75 G02 Y12.5 X0 R47.75 F8	N150 G03 Y25 X95.5 R47.75 F8	N224 G01 Y37.5 F24
N01 G01 Z-1.2 F24	N76 G01 Z-31.2 F24	N151 G01 Z-61.2 F24	N225 G02 Y37.5 X0 R47.75 F8
N02 G01 Y0.5 F24	N77 G01 Y13 F24	N152 G01 Y25.5 F24	N226 G01 Z-91.2 F24
N03 G02 Y0.5 X0 R47.75 F8	N78 G03 Y13 X95.5 R47.75 F8	N153 G02 Y25.5 X0 R47.75 F8	N227 G01 Y38 F24
N04 G01 Z-2.4 F24	N79 G01 Z-32.4 F24	N154 G01 Z-62.4 F24	N228 G03 Y38 X95.5 R47.75 F8
N05 G01 Y1 F24	N80 G01 Y13.5 F24	N155 G01 Y26 F24	N229 G01 Z-92.4 F24
N06 G03 Y1 X95.5 R47.75 F8	N81 G02 Y13.5 X0 R47.75 F8	N156 G03 Y26 X95.5 R47.75 F8	N230 G01 Y38.5 F24
N07 G01 Z-3.6 F24	N82 G01 Z-33.6 F24	N157 G01 Z-63.6 F24	N231 G02 Y38.5 X0 R47.75 F8
N08 G01 Y1.5 F24	N83 G01 Y14 F24	N158 G01 Y26.5 F24	N232 G01 Z-93.6 F24
N09 G02 Y1.5 X0 R47.75 F8	N84 G03 Y14 X95.5 R47.75 F8	N159 G02 Y26.5 X0 R47.75 F8	N233 G01 Y39 F24
N10 G01 Z-4.8 F24	N85 G01 Z-34.8 F24	N160 G01 Z-64.8 F24	N234 G03 Y39 X95.5 R47.75 F8
N11 G01 Y2 F24	N86 G01 Y14.5 F24	N161 G01 Y27 F24	N235 G01 Z-94.8 F24
N12 G03 Y2 X95.5 R47.75 F8	N87 G02 Y14.5 X0 R47.75 F8	N162 G03 Y27 X95.5 R47.75 F8	N236 G01 Y39.5 F24
N13 G01 Z-6 F24	N88 G01 Z-36 F24	N163 G01 Z-66 F24	N237 G02 Y39.5 X0 R47.75 F8
N14 G01 Y2.5 F24	N89 G01 Y15 F24	N164 G01 Y27.5 F24	N238 G01 Z-96 F24
N15 G02 Y2.5 X0 R47.75 F8	N90 G03 Y15 X95.5 R47.75 F8	N165 G02 Y27.5 X0 R47.75 F8	N239 G01 Y40 F24
N16 G01 Z-7.2 F24	N91 G01 Z-37.2 F24	N166 G01 Z-67.2 F24	N240 G03 Y40 X95.5 R47.75 F8
N17 G01 Y3 F24	N92 G01 Y15.5 F24	N167 G01 Y28 F24	N241 G01 Z-97.2 F24
N18 G03 Y3 X95.5 R47.75 F8	N93 G02 Y15.5 X0 R47.75 F8	N168 G03 Y28 X95.5 R47.75 F8	N242 G01 Y40.5 F24
N19 G01 Z-8.4 F24	N94 G01 Z-38.4 F24	N169 G01 Z-68.4 F24	N243 G02 Y40.5 X0 R47.75 F8
N20 G01 Y3.5 F24	N95 G01 Y16 F24	N170 G01 Y28.5 F24	N244 G01 Z-98.4 F24
N21 G02 Y3.5 X0 R47.75 F8	N96 G03 Y16 X95.5 R47.75 F8	N171 G02 Y28.5 X0 R47.75 F8	N245 G01 Y41 F24
N22 G01 Z-9.6 F24	N97 G01 Z-39.6 F24	N172 G01 Z-69.6 F24	N246 G03 Y41 X95.5 R47.75 F8
N23 G01 Y4 F24	N98 G01 Y16.5 F24	N173 G01 Y29 F24	N247 G01 Z-99.6 F24
N24 G03 Y4 X95.5 R47.75 F8	N99 G02 Y16.5 X0 R47.75 F8	N174 G03 Y29 X95.5 R47.75 F8	N248 G01 Y41.5 F24
N25 G01 Z-10.8 F24	N100 G01 Z-40.8 F24	N175 G01 Z-70.8 F24	N249 G02 Y41.5 X0 R47.75 F8
N26 G01 Y4.5 F24	N101 G01 Y17 F24	N176 G01 Y29.5 F24	N250 G01 Z-100.8 F24
N27 G02 Y4.5 X0 R47.75 F8	N102 G03 Y17 X95.5 R47.75 F8	N177 G02 Y29.5 X0 R47.75 F8	N251 G01 Y42 F24
N28 G01 Z-12 F24	N103 G01 Z-42 F24	N178 G01 Z-72 F24	N252 G03 Y42 X95.5 R47.75 F8
N29 G01 Y5 F24	N104 G01 Y17.5 F24	N179 G01 Y30 F24	N253 G01 Z-102 F24
N30 G03 Y5 X95.5 R47.75 F8	N105 G02 Y17.5 X0 R47.75 F8	N180 G03 Y30 X95.5 R47.75 F8	N254 G01 Y42.5 F24
N31 G01 Z-13.2 F24	N106 G01 Z-43.2 F24	N181 G01 Z-73.2 F24	N255 G02 Y42.5 X0 R47.75 F8
N32 G01 Y5.5 F24	N107 G01 Y18 F24	N182 G01 Y30.5 F24	N256 G01 Z-103.2 F24
N33 G02 Y5.5 X0 R47.75 F8	N108 G03 Y18 X95.5 R47.75 F8	N183 G02 Y30.5 X0 R47.75 F8	N257 G01 Y43 F24
N34 G01 Z-14.4 F24	N109 G01 Z-44.4 F24	N184 G01 Z-74.4 F24	N258 G03 Y43 X95.5 R47.75 F8
N35 G01 Y6 F24	N110 G01 Y18.5 F24	N185 G01 Y31 F24	N259 G01 Z-104.4 F24
N36 G03 Y6 X95.5 R47.75 F8	N111 G02 Y18.5 X0 R47.75 F8	N186 G03 Y31 X95.5 R47.75 F8	N260 G01 Y43.5 F24
N37 G01 Z-15.6 F24	N112 G01 Z-45.6 F24	N187 G01 Z-75.6 F24	N261 G02 Y43.5 X0 R47.75 F8
N38 G01 Y6.5 F24	N113 G01 Y19 F24	N188 G01 Y31.5 F24	N262 G01 Z-105.6 F24
N39 G02 Y6.5 X0 R47.75 F8	N114 G03 Y19 X95.5 R47.75 F8	N189 G02 Y31.5 X0 R47.75 F8	N263 G01 Y44 F24
N40 G01 Z-16.8 F24	N115 G01 Z-46.8 F24	N190 G01 Z-76.8 F24	N264 G03 Y44 X95.5 R47.75 F8
N41 G01 Y7 F24	N116 G01 Y19.5 F24	N191 G01 Y32 F24	N265 G01 Z-106.8 F24
N42 G03 Y7 X95.5 R47.75 F8	N117 G02 Y19.5 X0 R47.75 F8	N192 G03 Y32 X95.5 R47.75 F8	N266 G01 Y44.5 F24
N43 G01 Z-18 F24	N118 G01 Z-48 F24	N193 G01 Z-78 F24	N267 G02 Y44.5 X0 R47.75 F8
N44 G01 Y7.5 F24	N119 G01 Y20 F24	N194 G01 Y32.5 F24	N268 G01 Z-108 F24
N45 G02 Y7.5 X0 R47.75 F8	N120 G03 Y20 X95.5 R47.75 F8	N195 G02 Y32.5 X0 R47.75 F8	N269 G01 Y45 F24
N46 G01 Z-19.2 F24	N121 G01 Z-49.2 F24	N196 G01 Z-79.2 F24	N270 G03 Y45 X95.5 R47.75 F8
N47 G01 Y8 F24	N122 G01 Y20.5 F24	N197 G01 Y33 F24	N271 G01 Z-109.2 F24
N48 G03 Y8 X95.5 R47.75 F8	N123 G02 Y20.5 X0 R47.75 F8	N198 G03 Y33 X95.5 R47.75 F8	N272 G01 Y45.5 F24
N49 G01 Z-20.4 F24	N124 G01 Z-50.4 F24	N199 G01 Z-80.4 F24	N273 G02 Y45.5 X0 R47.75 F8
N50 G01 Y8.5 F24	N125 G01 Y21 F24	N200 G01 Y33.5 F24	N274 G01 Z-110.4 F24
N51 G02 Y8.5 X0 R47.75 F8	N126 G03 Y21 X95.5 R47.75 F8	N201 G02 Y33.5 X0 R47.75 F8	N275 G01 Y46 F24
N52 G01 Z-21.6 F24	N127 G01 Z-51.6 F24	N202 G01 Z-81.6 F24	N276 G03 Y46 X95.5 R47.75 F8
N53 G01 Y9 F24	N128 G01 Y21.5 F24	N203 G01 Y34 F24	N277 G01 Z-111.6 F24
N54 G03 Y9 X95.5 R47.75 F8	N129 G02 Y21.5 X0 R47.75 F8	N204 G03 Y34 X95.5 R47.75 F8	N278 G01 Y46.5 F24
N55 G01 Z-22.8 F24	N130 G01 Z-52.8 F24	N205 G01 Z-82.8 F24	N279 G02 Y46.5 X0 R47.75 F8
N56 G01 Y9.5 F24	N131 G01 Y22 F24	N206 G01 Y34.5 F24	N280 G01 Z-112.8 F24
N57 G02 Y9.5 X0 R47.75 F8	N132 G03 Y22 X95.5 R47.75 F8	N207 G02 Y34.5 X0 R47.75 F8	N281 G01 Y47 F24
N58 G01 Z-24 F24	N133 G01 Z-54 F24	N208 G01 Z-84 F24	N282 G03 Y47 X95.5 R47.75 F8
N59 G01 Y10 F24	N134 G01 Y22.5 F24	N209 G01 Y35 F24	N283 G01 Z-114 F24
N60 G03 Y10 X95.5 R47.75 F8	N135 G02 Y22.5 X0 R47.75 F8	N210 G03 Y35 X95.5 R47.75 F8	N284 G01 Y47.5 F24
N61 G01 Z-25.2 F24	N136 G01 Z-55.2 F24	N211 G01 Z-85.2 F24	N285 G02 Y47.5 X0 R47.75 F8
N62 G01 Y10.5 F24	N137 G01 Y23 F24	N212 G01 Y35.5 F24	N286 G01 Z-115.2 F24
N63 G02 Y10.5 X0 R47.75 F8	N138 G03 Y23 X95.5 R47.75 F8	N213 G02 Y35.5 X0 R47.75 F8	N287 G01 Y48 F24
N64 G01 Z-26.4 F24	N139 G01 Z-56.4 F24	N214 G01 Z-86.4 F24	N288 G03 Y48 X95.5 R47.75 F8
N65 G01 Y11 F24	N140 G01 Y23.5 F24	N215 G01 Y36 F24	N289 G01 Z-116.4 F24
N66 G03 Y11 X95.5 R47.75 F8	N141 G02 Y23.5 X0 R47.75 F8	N216 G03 Y36 X95.5 R47.75 F8	N290 G01 Y48.5 F24
N67 G01 Z-27.6 F24	N142 G01 Z-57.6 F24	N217 G01 Z-87.6 F24	N291 G02 Y48.5 X0 R47.75 F8
N68 G01 Y11.5 F24	N143 G01 Y24 F24	N218 G01 Y36.5 F24	N292 G01 Z-117.6 F24
N69 G02 Y11.5 X0 R47.75 F8	N144 G03 Y24 X95.5 R47.75 F8	N219 G02 Y36.5 X0 R47.75 F8	N293 G01 Y49 F24
N70 G01 Z-28.8 F24	N145 G01 Z-58.8 F24	N220 G01 Z-88.8 F24	N294 G03 Y49 X95.5 R47.75 F8
N71 G01 Y12 F24	N146 G01 Y24.5 F24	N221 G01 Y37 F24	N295 G01 Z-118.8 F24
N72 G03 Y12 X95.5 R47.75 F8	N147 G02 Y24.5 X0 R47.75 F8	N222 G03 Y37 X95.5 R47.75 F8	N296 G01 Y49.5 F24
N73 G01 Z-30 F24	N148 G01 Z-60 F24	N223 G01 Z-90 F24	N297 G02 Y49.5 X0 R47.75 F8
N74 G01 Y12.5 F24	N149 G01 Y25 F24		



**PAREDE INCLINADA CURVA DE 45 CAMADAS, 150 MM DE COMPRIMENTO E RAI0 DE 47,75 MM (PAREDE 2)**

N00 G01 X-10 F24	N100 G01 Y10 F24	N200 G01 Y20 F24	N300 G01 Y30 F24	N399 G01 Z-96 F24
N01 G01 X0 F8	N101 G01 X0 F8	N201 G01 X0 F8	N301 G01 X0 F8	N400 G01 Y40 F24
N02 G03 Y0 X95.5 R47.75 F8	N102 G03 Y10 X95.5 R47.75 F8	N202 G03 Y20 X95.5 R47.75 F8	N302 G03 Y30 X95.5 R47.75 F8	N401 G01 X0 F8
N03 G01 X105.5 F8	N103 G01 X105.5 F8	N203 G01 X105.5 F8	N303 G01 X105.5 F8	N402 G03 Y40 X95.5 R47.75 F8
N04 G01 Z-1.2 F24	N104 G01 Z-25.2 F24	N204 G01 Z-49.2 F24	N304 G01 Z-73.2 F24	N403 G01 X105.5 F8
N05 G01 Y0.5 F24	N105 G01 Y10.5 F24	N205 G01 Y20.5 F24	N305 G01 Y30.5 F24	N404 G01 Z-97.2 F24
N06 G01 X95.5 F8	N106 G01 X95.5 F8	N206 G01 X95.5 F8	N306 G01 X95.5 F8	N405 G01 Y40.5 F24
N07 G02 Y0.5 X0 R47.75 F8	N107 G02 Y10.5 X0 R47.75 F8	N207 G02 Y20.5 X0 R47.75 F8	N307 G02 Y30.5 X0 R47.75 F8	N406 G01 X95.5 F8
N08 G01 X-10 F8	N108 G01 X-10 F8	N208 G01 X-10 F8	N308 G01 X-10 F8	N407 G02 Y40.5 X0 R47.75 F8
N09 G01 Z-2.4 F24	N109 G01 Z-26.4 F24	N209 G01 Z-50.4 F24	N309 G01 Z-74.4 F24	N408 G01 X-10 F8
N10 G01 Y1 F24	N110 G01 Y11 F24	N210 G01 Y21 F24	N310 G01 Y31 F24	N409 G01 Z-98.4 F24
N11 G01 X0 F8	N111 G01 X0 F8	N211 G01 X0 F8	N311 G01 X0 F8	N410 G01 Y41 F24
N12 G03 Y1 X95.5 R47.75 F8	N112 G03 Y11 X95.5 R47.75 F8	N212 G03 Y21 X95.5 R47.75 F8	N312 G03 Y31 X95.5 R47.75 F8	N411 G01 X0 F8
N13 G01 X105.5 F8	N113 G01 X105.5 F8	N213 G01 X105.5 F8	N313 G01 X105.5 F8	N412 G03 Y41 X95.5 R47.75 F8
N14 G01 Z-3.6 F24	N114 G01 Z-27.6 F24	N214 G01 Z-51.6 F24	N314 G01 Z-75.6 F24	N413 G01 X105.5 F8
N15 G01 Y1.5 F24	N115 G01 Y11.5 F24	N215 G01 Y21.5 F24	N315 G01 Y31.5 F24	N414 G01 Z-99.6 F24
N16 G01 X95.5 F8	N116 G01 X95.5 F8	N216 G01 X95.5 F8	N316 G01 X95.5 F8	N415 G01 Y41.5 F24
N17 G02 Y1.5 X0 R47.75 F8	N117 G02 Y11.5 X0 R47.75 F8	N217 G02 Y21.5 X0 R47.75 F8	N317 G02 Y31.5 X0 R47.75 F8	N416 G01 X95.5 F8
N18 G01 X-10 F8	N118 G01 X-10 F8	N218 G01 X-10 F8	N318 G01 X-10 F8	N417 G02 Y41.5 X0 R47.75 F8
N19 G01 Z-4.8 F24	N119 G01 Z-28.8 F24	N219 G01 Z-52.8 F24	N319 G01 Z-76.8 F24	N418 G01 X-10 F8
N20 G01 Y2 F24	N120 G01 Y12 F24	N220 G01 Y22 F24	N320 G01 Y32 F24	N419 G01 Z-100.8 F24
N21 G01 X0 F8	N121 G01 X0 F8	N221 G01 X0 F8	N321 G01 X0 F8	N420 G01 Y42 F24
N22 G03 Y2 X95.5 R47.75 F8	N122 G03 Y12 X95.5 R47.75 F8	N222 G03 Y22 X95.5 R47.75 F8	N322 G03 Y32 X95.5 R47.75 F8	N421 G01 X0 F8
N23 G01 X105.5 F8	N123 G01 X105.5 F8	N223 G01 X105.5 F8	N323 G01 X105.5 F8	N422 G03 Y42 X95.5 R47.75 F8
N24 G01 Z-6 F24	N124 G01 Z-30 F24	N224 G01 Z-54 F24	N324 G01 Z-78 F24	N423 G01 X105.5 F8
N25 G01 Y2.5 F24	N125 G01 Y12.5 F24	N225 G01 Y22.5 F24	N325 G01 Y32.5 F24	N424 G01 Z-102 F24
N26 G01 X95.5 F8	N126 G01 X95.5 F8	N226 G01 X95.5 F8	N326 G01 X95.5 F8	N425 G01 Y42.5 F24
N27 G02 Y2.5 X0 R47.75 F8	N127 G02 Y12.5 X0 R47.75 F8	N227 G02 Y22.5 X0 R47.75 F8	N327 G02 Y32.5 X0 R47.75 F8	N426 G01 X95.5 F8
N28 G01 X-10 F8	N128 G01 X-10 F8	N228 G01 X-10 F8	N328 G01 X-10 F8	N427 G02 Y42.5 X0 R47.75 F8
N29 G01 Z-7.2 F24	N129 G01 Z-31.2 F24	N229 G01 Z-55.2 F24	N329 G01 Z-79.2 F24	N428 G01 X-10 F8
N30 G01 Y3 F24	N130 G01 Y13 F24	N230 G01 Y23 F24	N330 G01 Y33 F24	N429 G01 Z-103.2 F24
N31 G01 X0 F8	N131 G01 X0 F8	N231 G01 X0 F8	N331 G01 X0 F8	N430 G01 Y43 F24
N32 G03 Y3 X95.5 R47.75 F8	N132 G03 Y13 X95.5 R47.75 F8	N232 G03 Y23 X95.5 R47.75 F8	N332 G03 Y33 X95.5 R47.75 F8	N431 G01 X0 F8
N33 G01 X105.5 F8	N133 G01 X105.5 F8	N233 G01 X105.5 F8	N333 G01 X105.5 F8	N432 G03 Y43 X95.5 R47.75 F8
N34 G01 Z-8.4 F24	N134 G01 Z-32.4 F24	N234 G01 Z-56.4 F24	N334 G01 Z-80.4 F24	N433 G01 X105.5 F8
N35 G01 Y3.5 F24	N135 G01 Y13.5 F24	N235 G01 Y23.5 F24	N335 G01 Y33.5 F24	N434 G01 Z-104.4 F24
N36 G01 X95.5 F8	N136 G01 X95.5 F8	N236 G01 X95.5 F8	N336 G01 X95.5 F8	N435 G01 Y43.5 F24
N37 G02 Y3.5 X0 R47.75 F8	N137 G02 Y13.5 X0 R47.75 F8	N237 G02 Y23.5 X0 R47.75 F8	N337 G02 Y33.5 X0 R47.75 F8	N436 G01 X95.5 F8
N38 G01 X-10 F8	N138 G01 X-10 F8	N238 G01 X-10 F8	N338 G01 X-10 F8	N437 G02 Y43.5 X0 R47.75 F8
N39 G01 Z-9.6 F24	N139 G01 Z-33.6 F24	N239 G01 Z-57.6 F24	N339 G01 Z-81.6 F24	N438 G01 X-10 F8
N40 G01 Y4 F24	N140 G01 Y14 F24	N240 G01 Y24 F24	N340 G01 Y34 F24	N439 G01 Z-105.6 F24
N41 G01 X0 F8	N141 G01 X0 F8	N241 G01 X0 F8	N341 G01 X0 F8	N440 G01 Y44 F24
N42 G03 Y4 X95.5 R47.75 F8	N142 G03 Y14 X95.5 R47.75 F8	N242 G03 Y24 X95.5 R47.75 F8	N342 G03 Y34 X95.5 R47.75 F8	N441 G01 X0 F8
N43 G01 X105.5 F8	N143 G01 X105.5 F8	N243 G01 X105.5 F8	N343 G01 X105.5 F8	N442 G03 Y44 X95.5 R47.75 F8
N44 G01 Z-10.8 F24	N144 G01 Z-34.8 F24	N244 G01 Z-58.8 F24	N344 G01 Z-82.8 F24	N443 G01 X105.5 F8
N45 G01 Y4.5 F24	N145 G01 Y14.5 F24	N245 G01 Y24.5 F24	N345 G01 Y34.5 F24	N444 G01 Z-106.8 F24
N46 G01 X95.5 F8	N146 G01 X95.5 F8	N246 G01 X95.5 F8	N346 G01 X95.5 F8	N445 G01 Y44.5 F24
N47 G02 Y4.5 X0 R47.75 F8	N147 G02 Y14.5 X0 R47.75 F8	N247 G02 Y24.5 X0 R47.75 F8	N347 G02 Y34.5 X0 R47.75 F8	N446 G01 X95.5 F8
N48 G01 X-10 F8	N148 G01 X-10 F8	N248 G01 X-10 F8	N348 G01 X-10 F8	N447 G02 Y44.5 X0 R47.75 F8
N49 G01 Z-12 F24	N149 G01 Z-36 F24	N249 G01 Z-60 F24	N349 G01 Z-84 F24	N448 G01 X-10 F8
N50 G01 Y5 F24	N150 G01 Y15 F24	N250 G01 Y25 F24	N350 G01 Y35 F24	N449 G01 Z-108 F24
N51 G01 X0 F8	N151 G01 X0 F8	N251 G01 X0 F8	N351 G01 X0 F8	N450 G01 Y45 F24
N52 G03 Y5 X95.5 R47.75 F8	N152 G03 Y15 X95.5 R47.75 F8	N252 G03 Y25 X95.5 R47.75 F8	N352 G03 Y35 X95.5 R47.75 F8	N451 G01 X0 F8
N53 G01 X105.5 F8	N153 G01 X105.5 F8	N253 G01 X105.5 F8	N353 G01 X105.5 F8	N452 G03 Y45 X95.5 R47.75 F8
N54 G01 Z-13.2 F24	N154 G01 Z-37.2 F24	N254 G01 Z-61.2 F24	N354 G01 Z-85.2 F24	N453 G01 X105.5 F8
N55 G01 Y5.5 F24	N155 G01 Y15.5 F24	N255 G01 Y25.5 F24	N355 G01 Y35.5 F24	N454 G01 Z-109.2 F24
N56 G01 X95.5 F8	N156 G01 X95.5 F8	N256 G01 X95.5 F8	N356 G01 X95.5 F8	N455 G01 Y45.5 F24
N57 G02 Y5.5 X0 R47.75 F8	N157 G02 Y15.5 X0 R47.75 F8	N257 G02 Y25.5 X0 R47.75 F8	N357 G02 Y35.5 X0 R47.75 F8	N456 G01 X95.5 F8
N58 G01 X-10 F8	N158 G01 X-10 F8	N258 G01 X-10 F8	N358 G01 X-10 F8	N457 G02 Y45.5 X0 R47.75 F8
N59 G01 Z-14.4 F24	N159 G01 Z-38.4 F24	N259 G01 Z-62.4 F24	N359 G01 Z-86.4 F24	N458 G01 X-10 F8
N60 G01 Y6 F24	N160 G01 Y16 F24	N260 G01 Y26 F24	N360 G01 Y36 F24	N459 G01 Z-110.4 F24
N61 G01 X0 F8	N161 G01 X0 F8	N261 G01 X0 F8	N361 G01 X0 F8	N460 G01 Y46 F24
N62 G03 Y6 X95.5 R47.75 F8	N162 G03 Y16 X95.5 R47.75 F8	N262 G03 Y26 X95.5 R47.75 F8	N362 G03 Y36 X95.5 R47.75 F8	N461 G01 X0 F8
N63 G01 X105.5 F8	N163 G01 X105.5 F8	N263 G01 X105.5 F8	N363 G01 X105.5 F8	N462 G03 Y46 X95.5 R47.75 F8
N64 G01 Z-15.6 F24	N164 G01 Z-39.6 F24	N264 G01 Z-63.6 F24	N364 G01 Z-87.6 F24	N463 G01 X105.5 F8
N65 G01 Y6.5 F24	N165 G01 Y16.5 F24	N265 G01 Y26.5 F24	N365 G01 Y36.5 F24	N464 G01 Z-111.6 F24
N66 G01 X95.5 F8	N166 G01 X95.5 F8	N266 G01 X95.5 F8	N366 G01 X95.5 F8	N465 G01 Y46.5 F24
N67 G02 Y6.5 X0 R47.75 F8	N167 G02 Y16.5 X0 R47.75 F8	N267 G02 Y26.5 X0 R47.75 F8	N367 G02 Y36.5 X0 R47.75 F8	N466 G01 X95.5 F8
N68 G01 X-10 F8	N168 G01 X-10 F8	N268 G01 X-10 F8	N368 G01 X-10 F8	N467 G02 Y46.5 X0 R47.75 F8
N69 G01 Z-16.8 F24	N169 G01 Z-40.8 F24	N269 G01 Z-64.8 F24	N369 G01 Z-88.8 F24	N468 G01 X-10 F8
N70 G01 Y7 F24	N170 G01 Y17 F24	N270 G01 Y27 F24	N370 G01 Y37 F24	N469 G01 Z-112.8 F24
N71 G01 X0 F8	N171 G01 X0 F8	N271 G01 X0 F8	N371 G01 X0 F8	N470 G01 Y47 F24
N72 G03 Y7 X95.5 R47.75 F8	N172 G03 Y17 X95.5 R47.75 F8	N272 G03 Y27 X95.5 R47.75 F8	N372 G03 Y37 X95.5 R47.75 F8	N471 G01 X0 F8
N73 G01 X105.5 F8	N173 G01 X105.5 F8	N273 G01 X105.5 F8	N373 G01 X105.5 F8	N472 G03 Y47 X95.5 R47.75 F8
N74 G01 Z-18 F24	N174 G01 Z-42 F24	N274 G01 Z-66 F24	N374 G01 Z-90 F24	N473 G01 X105.5 F8
N75 G01 Y7.5 F24	N175 G01 Y17.5 F24	N275 G01 Y27.5 F24	N375 G01 Y37.5 F24	N474 G01 Z-114 F24
N76 G01 X95.5 F8	N176 G01 X95.5 F8	N276 G01 X95.5 F8	N376 G01 X95.5 F8	N475 G01 Y47.5 F24
N77 G02 Y7.5 X0 R47.75 F8	N177 G02 Y17.5 X0 R47.75 F8	N277 G02 Y27.5 X0 R47.75 F8	N377 G02 Y37.5 X0 R47.75 F8	N476 G01 X95.5 F8
N78 G01 X-10 F8	N178 G01 X-10 F8	N278 G01 X-10 F8	N378 G01 X-10 F8	N477 G02 Y47.5 X0 R47.75 F8
N79 G01 Z-19.2 F24	N179 G01 Z-43.2 F24	N279 G01 Z-67.2 F24	N379 G01 Z-91.2 F24	N478 G01 X-10 F8
N80 G01 Y8 F24	N180 G01 Y18 F24	N280 G01 Y28 F24	N380 G01 Y38 F24	N479 G01 Z-115.2 F24
N81 G01 X0 F8	N181 G01 X0 F8	N281 G01 X0 F8	N381 G01 X0 F8	N480 G01 Y48 F24
N82 G03 Y8 X95.5 R47.75 F8	N182 G03 Y18 X95.5 R47.75 F8	N282 G03 Y28 X95.5 R47.75 F8	N382 G03 Y38 X95.5 R47.75 F8	N481 G01 X0 F8
N83 G01 X105.5 F8	N183 G01 X105.5 F8	N283 G01 X105.5 F8	N383 G01 X105.5 F8	N482 G03 Y48 X95.5 R47.75 F8
N84 G01 Z-20.4 F24	N184 G01 Z-44.4 F24	N284 G01 Z-68.4 F24	N384 G01 Z-92.4 F24	N483 G01 X105.5 F8
N85 G01 Y8.5 F24	N185 G01 Y18.5 F24	N285 G01 Y28.5 F24	N385 G01 Y38.5 F24	N484 G01 Z-116.4 F24
N86 G01 X95.5 F8	N186 G01 X95.5 F8	N286 G01 X95.5 F8	N386 G01 X95.5 F8	N485 G01 Y48.5 F24
N87 G02 Y8.5 X0 R47.75 F8	N187 G02 Y18.5 X0 R47.75 F8	N287 G02 Y28.5 X0 R47.75 F8	N387 G02 Y38.5 X0 R47.75 F8	N486 G01 X95.5 F8
N88 G01 X-10 F8	N188 G01 X-10 F8	N288 G01 X-10 F8	N388 G01 X-10 F8	N487 G02 Y48.5 X0 R47.75 F8
N89 G01 Z-21.6 F24	N189 G01 Z-45.6 F24	N289 G01 Z-69.6 F24	N389 G01 Z-93.6 F24	N488 G01 X-10 F8
N90 G01 Y9 F24	N190 G01 Y19 F24	N290 G01 Y29 F24	N390 G01 Y39 F24	N489 G01 Z-117.6 F24
N91 G01 X0 F8	N191 G01 X0 F8	N291 G01 X0 F8	N391 G01 X0 F8	N490 G01 Y49 F24
N92 G03 Y9 X95.5 R47.75 F8	N192 G03 Y19 X95.5 R47.75 F8	N292 G03 Y29 X95.5 R47.75 F8	N392 G03 Y39 X95.5 R47.75 F8	N491 G01 X0 F8
N93 G01 X105.5 F8	N193 G01 X105.5 F8	N293 G01 X105.5 F8	N393 G01 X105.5 F8	N492 G03 Y49 X95.5 R47.75 F8
N94 G01 Z-22.8 F24	N194 G01 Z-46.8 F24	N294 G01 Z-70.8 F24	N394 G01 Z-94.8 F24	N493 G01 X105.5 F8
N95 G01 Y9.5 F24	N195 G01 Y19.5 F24	N295 G01 Y29.5 F24	N395 G01 Y39.5 F24	N494 G01 Z-118.8 F24
N96 G01 X95.5 F8	N196 G01 X95.5 F8	N296 G01 X95.5 F8	N396 G01 X95.5 F8	N495 G01 Y49.5 F24
N97 G02 Y9.5 X0 R47.75 F8	N197 G02 Y19.5 X0 R47.75 F8	N297 G02 Y29.5 X0 R47.75 F8	N397 G02 Y39.5 X0 R47.75 F8	N496 G01 X95.5 F8
N98 G01 X-10 F8	N198 G01 X-10 F8	N298 G01 X-10 F8	N398 G01 X-10 F8	N497 G02 Y49.5 X0 R47.75 F8
N99 G01 Z-24 F24	N199 G01 Z-48 F24	N299 G01 Z-72 F24		

**CONE DE 96 CAMADAS**

1º BLOCO	2º BLOCO	3º BLOCO	4º BLOCO	5º BLOCO
N00 G03 Y0 X95.5 R47.75 F8	N00 G01 Z-1.2 F24	N00 G01 Z-1.2 F24	N00 G01 Z-1.2 F24	N00 G01 Z-1.2 F24
N00 G03 Y0 X0 R47.75 F8	N00 G01 X0.5 F24	N00 G01 X0.5 F24	N00 G01 X0.5 F24	N00 G01 X0.5 F24
N00 G01 Z-1.2 F24	N00 G03 Y0 X76 R37.75 F8	N00 G03 Y0 X56 R27.75 F8	N00 G03 Y0 X36 R17.75 F8	N00 G03 Y0 X16 R7.75 F8
N00 G01 X0.5 F24	N00 G03 Y0 X0.5 R37.75 F8	N00 G03 Y0 X0.5 R27.75 F8	N00 G03 Y0 X0.5 R17.75 F8	N00 G03 Y0 X0.5 R7.75 F8
N00 G03 Y0 X95 R47.25 F8	N00 G01 Z-2.4 F24	N00 G01 Z-2.4 F24	N00 G01 Z-2.4 F24	N00 G01 Z-2.4 F24
N00 G03 Y0 X0.5 R47.25 F8	N00 G01 X1 F24	N00 G01 X1 F24	N00 G01 X1 F24	N00 G01 X1 F24
N00 G01 Z-2.4 F24	N00 G03 Y0 X75.5 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X55.5 R27.25 F8	N00 G03 Y0 X35.5 R17.25 F8	N00 G03 Y0 X15.5 R7.25 F8
N00 G01 X1 F24	N00 G03 Y0 X1 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X1 R27.25 F8	N00 G03 Y0 X1 R17.25 F8	N00 G03 Y0 X1 R7.25 F8
N00 G03 Y0 X94.5 R46.75 F8	N00 G01 Z-3.6 F24	N00 G01 Z-3.6 F24	N00 G01 Z-3.6 F24	N00 G01 Z-3.6 F24
N00 G03 Y0 X1 R46.75 F8	N00 G01 X1.5 F24	N00 G01 X1.5 F24	N00 G01 X1.5 F24	N00 G01 X1.5 F24
N00 G01 Z-3.6 F24	N00 G03 Y0 X75 R36.75 F8	N00 G03 Y0 X55 R26.75 F8	N00 G03 Y0 X35 R16.75 F8	N00 G03 Y0 X15 R6.75 F8
N00 G01 X1.5 F24	N00 G03 Y0 X1.5 R36.75 F8	N00 G03 Y0 X1.5 R26.75 F8	N00 G03 Y0 X1.5 R16.75 F8	N00 G03 Y0 X1.5 R6.75 F8
N00 G03 Y0 X94 R46.25 F8	N00 G01 Z-4.8 F24	N00 G01 Z-4.8 F24	N00 G01 Z-4.8 F24	N00 G01 Z-4.8 F24
N00 G03 Y0 X1.5 R46.25 F8	N00 G01 X2 F24	N00 G01 X2 F24	N00 G01 X2 F24	N00 G01 X2 F24
N00 G01 Z-4.8 F24	N00 G03 Y0 X74.5 R36.25 F8	N00 G03 Y0 X54.5 R26.25 F8	N00 G03 Y0 X34.5 R16.25 F8	N00 G03 Y0 X14.5 R6.25 F8
N00 G03 Y0 X93.5 R45.75 F8	N00 G03 Y0 X2 R36.25 F8	N00 G03 Y0 X2 R26.25 F8	N00 G03 Y0 X2 R16.25 F8	N00 G03 Y0 X2 R6.25 F8
N00 G03 Y0 X2 R45.75 F8	N00 G01 Z-6 F24	N00 G01 Z-6 F24	N00 G01 Z-6 F24	N00 G01 Z-6 F24
N00 G01 Z-6 F24	N00 G01 X2.5 F24	N00 G01 X2.5 F24	N00 G01 X2.5 F24	N00 G01 X2.5 F24
N00 G03 Y0 X93 R45.25 F8	N00 G03 Y0 X74 R35.75 F8	N00 G03 Y0 X54 R25.75 F8	N00 G03 Y0 X34 R15.75 F8	N00 G03 Y0 X14 R5.75 F8
N00 G03 Y0 X2.5 R45.25 F8	N00 G03 Y0 X2.5 R35.75 F8	N00 G03 Y0 X2.5 R25.75 F8	N00 G03 Y0 X2.5 R15.75 F8	N00 G03 Y0 X2.5 R5.75 F8
N00 G01 Z-6 F24	N00 G01 Z-7.2 F24	N00 G01 Z-7.2 F24	N00 G01 Z-7.2 F24	N00 G01 Z-7.2 F24
N00 G03 Y0 X92.5 R44.75 F8	N00 G01 X3 F24	N00 G01 X3 F24	N00 G01 X3 F24	N00 G01 X3 F24
N00 G03 Y0 X3 R44.75 F8	N00 G03 Y0 X73.5 R35.25 F8	N00 G03 Y0 X53.5 R25.25 F8	N00 G03 Y0 X33.5 R15.25 F8	N00 G03 Y0 X13.5 R5.25 F8
N00 G01 Z-8.4 F24	N00 G03 Y0 X3 R35.25 F8	N00 G03 Y0 X3 R25.25 F8	N00 G03 Y0 X3 R15.25 F8	N00 G03 Y0 X3 R5.25 F8
N00 G03 Y0 X92 R44.25 F8	N00 G01 Z-8.4 F24	N00 G01 Z-8.4 F24	N00 G01 Z-8.4 F24	N00 G01 Z-8.4 F24
N00 G03 Y0 X3.5 R44.25 F8	N00 G01 X3.5 F24	N00 G01 X3.5 F24	N00 G01 X3.5 F24	N00 G01 X3.5 F24
N00 G01 Z-8.4 F24	N00 G03 Y0 X73 R34.75 F8	N00 G03 Y0 X53 R24.75 F8	N00 G03 Y0 X33 R14.75 F8	N00 G03 Y0 X13 R4.75 F8
N00 G03 Y0 X91.5 R43.75 F8	N00 G03 Y0 X3.5 R34.75 F8	N00 G03 Y0 X3.5 R24.75 F8	N00 G03 Y0 X3.5 R14.75 F8	N00 G03 Y0 X3.5 R4.75 F8
N00 G01 Z-10.8 F24	N00 G01 Z-9.6 F24	N00 G01 Z-9.6 F24	N00 G01 Z-9.6 F24	N00 G01 Z-9.6 F24
N00 G03 Y0 X4 R43.75 F8	N00 G01 X4 F24	N00 G01 X4 F24	N00 G01 X4 F24	N00 G01 X4 F24
N00 G01 Z-10.8 F24	N00 G03 Y0 X72.5 R34.25 F8	N00 G03 Y0 X52.5 R24.25 F8	N00 G03 Y0 X32.5 R14.25 F8	N00 G03 Y0 X12.5 R4.25 F8
N00 G03 Y0 X4.5 R43.75 F8	N00 G03 Y0 X4 R34.25 F8	N00 G03 Y0 X4 R24.25 F8	N00 G03 Y0 X4 R14.25 F8	N00 G03 Y0 X4 R4.25 F8
N00 G01 Z-10.8 F24	N00 G01 Z-10.8 F24	N00 G01 Z-10.8 F24	N00 G01 Z-10.8 F24	N00 G01 Z-10.8 F24
N00 G03 Y0 X91 R43.25 F8	N00 G01 X4.5 F24	N00 G01 X4.5 F24	N00 G01 X4.5 F24	N00 G01 X4.5 F24
N00 G03 Y0 X4.5 R43.25 F8	N00 G03 Y0 X72 R33.75 F8	N00 G03 Y0 X52 R23.75 F8	N00 G03 Y0 X32 R13.75 F8	N00 G03 Y0 X12 R3.75 F8
N00 G01 Z-12 F24	N00 G03 Y0 X4.5 R33.75 F8	N00 G03 Y0 X4.5 R23.75 F8	N00 G03 Y0 X4.5 R13.75 F8	N00 G03 Y0 X4.5 R3.75 F8
N00 G03 Y0 X90.5 R42.75 F8	N00 G01 Z-12 F24	N00 G01 Z-12 F24	N00 G01 Z-12 F24	N00 G01 Z-12 F24
N00 G03 Y0 X5 R42.75 F8	N00 G01 X5 F24	N00 G01 X5 F24	N00 G01 X5 F24	N00 G01 X5 F24
N00 G01 Z-13.2 F24	N00 G03 Y0 X71 R32.75 F8	N00 G03 Y0 X51 R22.75 F8	N00 G03 Y0 X31 R12.75 F8	N00 G03 Y0 X11 R2.75 F8
N00 G03 Y0 X90 R42.25 F8	N00 G03 Y0 X5 R32.75 F8	N00 G03 Y0 X5 R22.75 F8	N00 G03 Y0 X5 R12.75 F8	N00 G03 Y0 X5 R2.75 F8
N00 G01 Z-13.2 F24	N00 G01 Z-13.2 F24	N00 G01 Z-13.2 F24	N00 G01 Z-13.2 F24	N00 G01 Z-13.2 F24
N00 G03 Y0 X89.5 R41.75 F8	N00 G01 X5.5 F24	N00 G01 X5.5 F24	N00 G01 X5.5 F24	N00 G01 X5.5 F24
N00 G03 Y0 X6 R41.75 F8	N00 G03 Y0 X70.5 R32.25 F8	N00 G03 Y0 X50.5 R22.25 F8	N00 G03 Y0 X30.5 R12.25 F8	N00 G03 Y0 X10.5 R2.25 F8
N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G03 Y0 X6 R32.25 F8	N00 G03 Y0 X6 R22.25 F8	N00 G03 Y0 X6 R12.25 F8	N00 G03 Y0 X6 R2.25 F8
N00 G03 Y0 X89 R41.25 F8	N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 Z-15.6 F24
N00 G03 Y0 X6.5 R41.25 F8	N00 G01 X6 F24	N00 G01 X6 F24	N00 G01 X6 F24	N00 G01 X6 F24
N00 G01 Z-14.4 F24	N00 G03 Y0 X70 R31.75 F8	N00 G03 Y0 X50 R21.75 F8	N00 G03 Y0 X30 R11.75 F8	N00 G03 Y0 X10 R1.75 F8
N00 G03 Y0 X6.5 R41.25 F8	N00 G03 Y0 X6.5 R31.75 F8	N00 G03 Y0 X6.5 R21.75 F8	N00 G03 Y0 X6.5 R11.75 F8	N00 G03 Y0 X6.5 R1.75 F8
N00 G01 Z-14.4 F24	N00 G01 Z-14.4 F24	N00 G01 Z-14.4 F24	N00 G01 Z-14.4 F24	N00 G01 Z-14.4 F24
N00 G03 Y0 X88.5 R40.75 F8	N00 G01 X6 F24	N00 G01 X6 F24	N00 G01 X6 F24	N00 G01 X6 F24
N00 G03 Y0 X6 R40.75 F8	N00 G03 Y0 X69.5 R31.25 F8	N00 G03 Y0 X49.5 R21.25 F8	N00 G03 Y0 X29.5 R11.25 F8	N00 G03 Y0 X9.5 R1.25 F8
N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G03 Y0 X7 R31.25 F8	N00 G03 Y0 X7 R21.25 F8	N00 G03 Y0 X7 R11.25 F8	N00 G03 Y0 X7 R1.25 F8
N00 G03 Y0 X88 R40.25 F8	N00 G01 Z-18 F24	N00 G01 Z-18 F24	N00 G01 Z-18 F24	N00 G01 Z-18 F24
N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 X7 F24	N00 G01 X7 F24	N00 G01 X7 F24	N00 G01 X7 F24
N00 G03 Y0 X87.5 R39.75 F8	N00 G03 Y0 X68.5 R30.25 F8	N00 G03 Y0 X48.5 R20.25 F8	N00 G03 Y0 X28.5 R10.25 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R0.25 F8
N00 G03 Y0 X87 R39.25 F8	N00 G03 Y0 X8 R30.25 F8	N00 G03 Y0 X8 R20.25 F8	N00 G03 Y0 X8 R10.25 F8	N00 G03 Y0 X8 R0.25 F8
N00 G01 Z-16.8 F24	N00 G01 Z-16.8 F24	N00 G01 Z-16.8 F24	N00 G01 Z-16.8 F24	N00 G01 Z-16.8 F24
N00 G03 Y0 X86.5 R38.75 F8	N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 Z-15.6 F24	N00 G01 Z-15.6 F24
N00 G03 Y0 X86 R38.25 F8	N00 G01 X6.5 F24	N00 G01 X6.5 F24	N00 G01 X6.5 F24	N00 G01 X6.5 F24
N00 G01 Z-19.2 F24	N00 G03 Y0 X70 X7 R31.75 F8	N00 G03 Y0 X50 X7 R21.75 F8	N00 G03 Y0 X30 X7 R11.75 F8	N00 G03 Y0 X10 X7 R1.75 F8
N00 G03 Y0 X86 R38.25 F8	N00 G03 Y0 X7 X7 R31.75 F8	N00 G03 Y0 X7 X7 R21.75 F8	N00 G03 Y0 X7 X7 R11.75 F8	N00 G03 Y0 X7 X7 R1.75 F8
N00 G01 Z-19.2 F24	N00 G01 Z-19.2 F24	N00 G01 Z-19.2 F24	N00 G01 Z-19.2 F24	N00 G01 Z-19.2 F24
N00 G03 Y0 X85 R38.75 F8	N00 G01 X7 F24	N00 G01 X7 F24	N00 G01 X7 F24	N00 G01 X7 F24
N00 G03 Y0 X85 R38.25 F8	N00 G03 Y0 X68 R29.75 F8	N00 G03 Y0 X48 R19.75 F8	N00 G03 Y0 X28 R9.75 F8	N00 G03 Y0 X8 R0.75 F8
N00 G01 Z-20.4 F24	N00 G03 Y0 X8.5 R29.75 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R19.75 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R9.75 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R0.75 F8
N00 G03 Y0 X85 R38.25 F8	N00 G01 Z-20.4 F24	N00 G01 Z-20.4 F24	N00 G01 Z-20.4 F24	N00 G01 Z-20.4 F24
N00 G01 Z-20.4 F24	N00 G01 X8 F24	N00 G01 X8 F24	N00 G01 X8 F24	N00 G01 X8 F24
N00 G03 Y0 X84.5 R37.75 F8	N00 G03 Y0 X68 R29.75 F8	N00 G03 Y0 X48 R19.75 F8	N00 G03 Y0 X28 R9.75 F8	N00 G03 Y0 X8 R0.75 F8
N00 G03 Y0 X84 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X8 X8 R30.25 F8	N00 G03 Y0 X8 X8 R20.25 F8	N00 G03 Y0 X8 X8 R10.25 F8	N00 G03 Y0 X8 X8 R0.25 F8
N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24
N00 G03 Y0 X83.5 R37.75 F8	N00 G01 X8.5 F24	N00 G01 X8.5 F24	N00 G01 X8.5 F24	N00 G01 X8.5 F24
N00 G03 Y0 X83 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X68 R29.75 F8	N00 G03 Y0 X48 R19.75 F8	N00 G03 Y0 X28 R9.75 F8	N00 G03 Y0 X8 R0.75 F8
N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-21.6 F24	N00 G01 Z-21.6 F24	N00 G01 Z-21.6 F24	N00 G01 Z-21.6 F24
N00 G03 Y0 X83 R37.25 F8	N00 G01 X9 F24	N00 G01 X9 F24	N00 G01 X9 F24	N00 G01 X9 F24
N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G03 Y0 X67.5 R29.25 F8	N00 G03 Y0 X47.5 R19.25 F8	N00 G03 Y0 X27.5 R9.25 F8	N00 G03 Y0 X7.5 R1.25 F8
N00 G03 Y0 X83 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X9 R29.25 F8	N00 G03 Y0 X9 R19.25 F8	N00 G03 Y0 X9 R9.25 F8	N00 G03 Y0 X9 R1.25 F8
N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24	N00 G01 Z-22.8 F24
N00 G03 Y0 X82.5 R37.75 F8	N00 G01 X9.5 F24	N00 G01 X9.5 F24	N00 G01 X9.5 F24	N00 G01 X9.5 F24
N00 G03 Y0 X82 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X67 R28.75 F8	N00 G03 Y0 X47 R18.75 F8	N00 G03 Y0 X27 R8.75 F8	N00 G03 Y0 X7 R1.25 F8
N00 G01 Z-24 F24	N00 G03 Y0 X8.5 R28.75 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R18.75 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R8.75 F8	N00 G03 Y0 X8.5 R0.75 F8
N00 G03 Y0 X82 R37.25 F8	N00 G01 Z-24 F24	N00 G01 Z-24 F24	N00 G01 Z-24 F24	N00 G01 Z-24 F24
N00 G01 Z-24 F24	N00 G01 X10 F24	N00 G01 X10 F24	N00 G01 X10 F24	N00 G01 X10 F24
N00 G03 Y0 X82 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X66.5 R28.25 F8	N00 G03 Y0 X46.5 R18.25 F8	N00 G03 Y0 X26.5 R8.25 F8	N00 G03 Y0 X6.5 R0.25 F8
N00 G03 Y0 X82 R37.25 F8	N00 G03 Y0 X10 R28.25 F8	N00 G03 Y0 X10 R18.25 F8	N00 G03 Y0 X10 R8.25 F8	N00 G03 Y0 X10 R0.25 F8

# ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES DO ARAME BOHLER ER70S-6



**BÖHLER SG 2**

Solid Wire, mild steel

Classifications	
<b>EN ISO 14341-A</b>	<b>AWS A5.18 / SFA-5.18</b>
G 42 3 M21 3Si1	ER70S-6
G 38 3 C1 3Si1	

**Characteristics and typical fields of application**  
 GMAW solid wire for welding unalloyed and low alloy steels. Low spatter in short and spray arc transfer modes with CO<sub>2</sub> or gas mixture. The wire is used in boiler, pipeline and structural constructions, shipbuilding and vehicle manufacturing.

**Base materials**  
 Steels with yield strength < 420 MPa (60 ksi)  
 S235JR-S355JR, S235JO-S355JO, S235J2-S355J2, S275N-S420N, S275M-S420M, P235GH-P355GH, P275NL1-P355NL1, P215NL, P265NL, P355N, P285NH-P420NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L245MB-L415MB, GE200-GE240, ship building steels: A, B, D, E, A 32-E 36  
 ASTM A 106 Gr. A, B, C; A 181 Gr. 60, 70; A 283 Gr. A, C; A 285 Gr. A, B, C; A 350 Gr. LF1; A 414 Gr. A, B, C, D, E, F, G; A 501 Gr. B; A 513 Gr. 1018; A 516 Gr. 55, 60, 65, 70; A 573 Gr. 58, 65, 70; A 588 Gr. A, B; A 633 Gr. C; A 662 Gr. B; A 711 Gr. 1013; A 841 Gr. A; API 5 L Gr. B, X42, X52, X56, X60

**Typical analysis**

	C	Si	Mn
wt.-%	0.07	0.85	1.5

**Mechanical properties of all-weld metal - typical values (min. values)**

Condition	Yield strength R <sub>e</sub>	Tensile strength R <sub>m</sub>	Elongation A (L <sub>0</sub> =5d <sub>0</sub> )	Impact energy ISO-V KV J
	MPa	MPa	%	-30°C
u	450 (≥ 420)	575 (≥ 500 - 640)	30 (≥ 20)	≥ 27
u2	430 (≥ 420)	555 (≥ 500 - 640)	29 (≥ 20)	≥ 27

u untreated, as welded – shielding gas Ar + 15 – 25% CO<sub>2</sub>  
 u2 untreated, as welded – shielding gas 100% CO<sub>2</sub>

**Operating data**

	Polarity	DC+	Dimension mm
	Shielding gas (EN ISO 14175)	M21 C1	

**Approvals**  
 TÜV (13009), DB (42.236.01), ABS, CWB, CE

All information provided is based upon careful investigation and intensive research. However, we do not assume any liability for correctness and information is subject to change without notice.