

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CAIQUE DE CASTRO GONÇALVES**

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA  
SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA, QUALIDADE  
SUPERFICIAL E DIMENSIONAL DE PEÇAS IMPRESSAS  
PELA TÉCNICA FPM**



SÃO CARLOS-SP

2023

CAIQUE DE CASTRO GONÇALVES

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE A RESISTÊNCIA  
MECÂNICA, QUALIDADE SUPERFICIAL E DIMENSIONAL DE PEÇAS IMPRESSAS  
PELA TÉCNICA FPM**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

São Carlos-SP

2023

Gonçalves, Caique de Castro

Investigação da influência da temperatura sobre a resistência mecânica, qualidade superficial e dimensional de peças impressas pela técnica FPM / Caique de Castro Gonçalves -- 2023. 84f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Alexandre Tácito Malavolta  
Banca Examinadora: Alexandre Tácito Malavolta, Alexandre Zuquete Guarato, Sidney Bruce Shiki  
Bibliografia

1. Engenharia de superfície. 2. Manufatura aditiva. I. Gonçalves, Caique de Castro. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Caique de Castro Gonçalves, realizada em 22/09/2023.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta (UFSCar)

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato (UFU)

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (UFSCar)

Dedico essa dissertação de mestrado à essa instituição, que eu aprendi a admirar imensamente, tanto a metodologia como as pessoas que a frequentam.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Deus em primeiro lugar por me permitir a graça deste momento e dedicar esta dissertação a minha esposa Caroline de Campos Bernardi por dar o suporte e força durante todo este processo glorioso e de muita luta, possibilitando com que essa dissertação fosse concretizada mantendo todo o amor e harmonia de nossa família. Agradeço aos meus pais por sempre me incentivar e apoiar meus objetivos. Amigos e familiares que ficaram na torcida por mim, em especial minha sogra Professora Helga que esteve sempre disponível nesta minha jornada acadêmica.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta, e ao Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki. Eles estiveram sempre disponíveis e conduziram suas funções de líderes educadores com astúcia e parcimônia, tornando meus momentos de aprendizado inesquecíveis e altamente valiosos.

Também expresso minha profunda gratidão à instituição UFSCar, por me acolher e proporcionar o acesso às suas instalações e aos seus funcionários excepcionais.

Minha sincera gratidão se estende à FAPESP, pois este estudo é resultado de um projeto de pesquisa de amplitude significativa, financiado pela FAPESP. Essa pesquisa não apenas contribui para o avanço do conhecimento, mas também oferece a oportunidade para que outros pesquisadores possam conduzir seus próprios estudos, testes, validações e investigações, elevando o patamar do conhecimento em suas respectivas áreas. Compartilhar essas descobertas com a comunidade acadêmica é de extrema importância.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Meu muito obrigado!

*"O homem que não cultiva o hábito  
de pensar desperdiça um dos maiores  
prazeres da vida e não consegue  
aproveitar ao máximo de si."*

- Thomas Edison

## RESUMO

A manufatura aditiva tornou-se um método alternativo muito comum nos processos industriais, devido à sua capacidade de produzir peças complexas em baixas e média escala de forma altamente eficiente. Entre as várias técnicas adotadas, a técnica FPM (*Fused Pellet Modeling*), que utiliza grãos (*pellets*) poliméricos como matéria-prima, ganha destaque. No entanto, a impressão de peças funcionais utilizando a técnica FPM enfrenta desafios relacionados à qualidade superficial e à resistência mecânica das peças produzidas. Essas questões tornam-se ainda mais complexas quando se tratam de peças de grandes dimensões, visto que os gradientes térmicos associados tendem a ser mais acentuados. Diante desse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo investigar o efeito da temperatura da mesa de impressão na resistência mecânica, qualidade superficial e dimensional de peças impressas pela técnica FPM, empregando o polímero ABS (*Acrilonitrilo butadieno estireno*). Para tal, foi desenvolvida uma mesa de impressão com controle térmico ativo, que será integrada a uma célula de manufatura dedicada à impressão 3D de produtos de grande porte, com volumes de até 1 m<sup>3</sup>. Essa célula de manufatura conta com uma extrusora monorosca, operada por um braço robótico industrial, para processar os grãos poliméricos. O principal objetivo é avaliar como o controle preciso das condições térmicas da mesa de impressão pode impactar positivamente a resistência mecânica e a qualidade das peças produzidas, especialmente em volumes maiores. Em suma, este estudo abordou a influência dos gradientes térmicos na manufatura aditiva de peças em ABS. As propriedades mecânicas não apresentaram correlações relevantes com as análises de temperatura em vários patamares. Porém, os resultados da análise dimensional e da qualidade superficial destacaram a importância crítica do controle preciso da temperatura da mesa de impressão, que influenciou as peças de acordo com os diferentes patamares. A aplicação de métodos como análise dimensional e microscopia revelou variações significativas nos resultados. Além disso, os resultados nos diferentes patamares de temperatura da mesa também se mostrou vital para a qualidade das peças produzidas. Esses achados contribuem para um entendimento mais abrangente da complexa interação entre temperatura, parâmetros de impressão e propriedades das peças fabricadas por FPM, proporcionando percepções valiosas para futuras otimizações de processo.

**Palavras-chave:** manufatura aditiva, controle de temperatura, resistência mecânica, qualidade superficial, qualidade dimensional.

## ABSTRACT

Additive manufacturing has become a common practice across various industries due to its ability to efficiently produce complex parts on low and medium scale. Among the various adopted techniques, the Fused Pellet Modeling (FPM) technique stands out, utilizing polymeric grains (pellets) as raw material. However, achieving functional parts with good surface quality and mechanical strength remains a challenge when using the FPM technique. These issues become even more complex when dealing with larger parts, as the associated thermal gradients tend to be more pronounced. In this context, the present research project aims to investigate the effect of print bed temperature on the mechanical strength, surface quality, and dimensional accuracy of parts printed using the FPM technique, employing ABS polymer. To achieve this, an actively controlled print bed will be developed and integrated into a manufacturing cell dedicated to 3D printing of large-scale products, with volumes of up to 1 m<sup>3</sup>. This manufacturing cell will feature a single-screw extruder operated by an industrial robotic arm to process the polymeric grains. The primary goal is to assess how precise control of print bed thermal conditions can positively impact the mechanical strength and quality of produced parts, particularly in larger volumes. In essence, this study addressed the influence of thermal gradients on additive manufacturing of ABS parts. Mechanical properties showed no significant correlations with temperature analyses at various levels. However, results from dimensional analysis and surface quality highlighted the critical importance of precise print bed temperature control, affecting parts according to different levels. Application of methods like dimensional analysis and microscopy revealed significant result variations. Furthermore, results across different print bed temperature levels proved crucial to part quality. These findings contribute to a comprehensive understanding of the intricate interplay between temperature, print parameters, and properties of parts manufactured using FPM, offering valuable insights for future process optimizations.

**Keywords:** Additive manufacturing, temperature control, mechanical strength, surface quality, dimensional accuracy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Previsão de mercado de impressão 3D por ano, 2014 - 2025. . . . .	17
Figura 2 – Princípio do processamento MA. . . . .	19
Figura 3 – Princípios de processamento MA para materiais poliméricos. . . . .	20
Figura 4 – Esquemática da técnica de extrusão baseado no processamento MA. . . . .	22
Figura 5 – Modelo esquemático da técnica FDM à esquerda e à direita o modelo esquemático da técnica FPM. . . . .	25
Figura 6 – Processo de formação da Adesão. 1) Superfície de Rearranjo, 2) Superfície de Aproximação, 3) Umedecimento, 4) Difusão e 5) Randomização. . . . .	28
Figura 7 – Gráfico curva de temperatura e isotérmico T °C. . . . .	29
Figura 8 – Modelo esquemático de aquecimento auxiliar na impressão FDM. . . . .	30
Figura 9 – Modelo direcionado de aquecimento com lâmpadas infravermelhas . . . . .	31
Figura 10 – Propriedades dos materiais impressos usados no processo FDM. . . . .	31
Figura 11 – Parâmetros de processos FDM. . . . .	32
Figura 12 – Fenômeno do efeito cascata nos modelos de impressão por camadas. . . . .	35
Figura 13 – Célula de manufatura. . . . .	36
Figura 14 – Bico extrusor da Célula da MA com as três zonas de temperatura. . . . .	37
Figura 15 – Controlador YRC1000. . . . .	37
Figura 16 – Mesa térmica para impressão 3D. . . . .	38
Figura 17 – Área de impressão ("sanduiche"). . . . .	39
Figura 18 – a) Primeira camada com isolantes Policetal, b) Segunda camada com isolantes Teflon. . . . .	39
Figura 19 – Fixador de Nylon. . . . .	40
Figura 20 – Modelagem da mesa em malha. . . . .	40
Figura 21 – Montagem da mesa. . . . .	41
Figura 22 – Estratégia de posicionamento dos termopares. . . . .	42
Figura 23 – Câmera térmica Hti HT-175. . . . .	43
Figura 24 – Módulo de aquisição <i>National Instruments</i> . . . . .	43
Figura 25 – (a) Painel de controle de aquisição temperatura, (b) Termopar do J. . . . .	44
Figura 26 – Leitura das temperaturas em tempo real no LabView. . . . .	44
Figura 27 – Termopares posicionados na mesa de impressão. . . . .	45
Figura 28 – Diagrama de blocos do sistema de aquecimento e monitoramento da mesa. . . . .	45
Figura 29 – Dimensões para o ensaio de tração, segundo a Norma ASTM D638. . . . .	47
Figura 30 – Regiões de análise dimensional. . . . .	49
Figura 31 – Microscópio confocal de varredura óptica Alicona Infinite Focus SL. . . . .	50
Figura 32 – Direção das coordenadas x e y. . . . .	50
Figura 33 – Corpo de prova com a superfície pintada. . . . .	51

Figura 34 – Rugosímetro portátil MAHR. . . . .	51
Figura 35 – Medição da rugosidade do corpo de prova. . . . .	52
Figura 36 – Equipamento de ensaio de tração MTS®. . . . .	53
Figura 37 – Teste de tração. . . . .	54
Figura 38 – Interface do software em execução da curva de tensão x deformação. . . . .	55
Figura 39 – Gradiente de temperatura no regime de 50°C em (a) 10 min, (b) 50 min e (c) 100 min. . . . .	57
Figura 40 – Distribuição dos pontos para o regime de 50°C. . . . .	58
Figura 41 – Gráfico de aquecimento da mesa para o caso com controle em 50°C. . . . .	58
Figura 42 – Gradiente de temperatura no regime de 90°C em 10 min, 50 min e 100 min. . . . .	59
Figura 43 – Distribuição dos pontos para o regime de 90°C. . . . .	60
Figura 44 – Gráfico de aquecimento da mesa para o caso com controle em 90°C. . . . .	60
Figura 45 – Distribuição de temperatura do caso sem controle em 10 min, 50 min e 100min. . . . .	61
Figura 46 – Distribuição dos pontos para o caso sem controle. . . . .	62
Figura 47 – Gráfico de aquecimento da mesa para o caso sem controle. . . . .	62
Figura 48 – Teste de aquecimento da mesa com a câmara térmica. . . . .	63
Figura 49 – Teste aquecimento chapa inferior da mesa. . . . .	64
Figura 50 – Teste aquecimento da estrutura da mesa. . . . .	65
Figura 51 – Teste aquecimento do "sanduíche" da mesa. . . . .	66
Figura 52 – Patamar 70°C. . . . .	67
Figura 53 – Corpos de provas impressos no patamar de 70°C. . . . .	67
Figura 54 – Empenamento dos corpos de provas no patamar de 70°C . . . . .	67
Figura 55 – Patamar 90°C. . . . .	68
Figura 56 – Corpos de provas impressos no patamar de 90°C. . . . .	69
Figura 57 – Patamar 110°C. . . . .	69
Figura 58 – Corpos de provas impressos no patamar de 110°C. . . . .	70
Figura 59 – Região de análise das camadas impressas. . . . .	72
Figura 60 – Superfície topográficas das amostras no patamar de 70°C . . . . .	73
Figura 61 – Imagem da varredura das superfícies dos corpos de prova A, B e C respectivamente. . . . .	73
Figura 62 – Superfície topográficas das amostras no patamar de 90°C . . . . .	73
Figura 63 – Superfície topográficas das amostras no patamar de 110°C . . . . .	74
Figura 64 – Imagem da varredura das superfícies dos corpos de prova D, E e F respectivamente. . . . .	74
Figura 65 – Imagem da varredura das superfícies dos corpos de prova G, H e I respectivamente. . . . .	74
Figura 66 – Curvas de ensaio de tração. . . . .	76
Figura 67 – Vista da seção transversal das amostras no patamar de 70°C. . . . .	77
Figura 68 – Vista da seção transversal das amostras no patamar de 90°C. . . . .	77

Figura 69 – Vista da seção transversal das amostras no patamar de 110°C. . . . . 78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de impressão existentes. . . . .	18
Tabela 2 – Materiais biodegradáveis para impressão 3D. . . . .	24
Tabela 3 – Comparações das técnicas por extrusão de <i>pellets</i> e filamentos. . . . .	26
Tabela 4 – Modelo e custo avaliável de impressoras em larga escala. . . . .	27
Tabela 5 – Patamares de temperaturas da mesa. . . . .	46
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do ABS. . . . .	46
Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova, segundo a Norma ASTM D638. . . . .	47
Tabela 8 – Parâmetros de impressão. . . . .	48
Tabela 9 – Parâmetros de entrada ensaio de tração. . . . .	54
Tabela 10 – Resultado dimensional dos corpos de prova no patamar de 70°C. . . . .	70
Tabela 11 – Resultado dimensional dos corpos de prova no patamar de 90°C. . . . .	70
Tabela 12 – Resultado dimensional dos corpos de prova no patamar de 110°C. . . . .	71
Tabela 13 – Rugosidade dos corpos de prova na temperatura 70°C . . . . .	72
Tabela 14 – Rugosidade dos corpos de prova na temperatura de 90°C. . . . .	72
Tabela 15 – Rugosidade dos corpos de prova na temperatura de 110°C. . . . .	72
Tabela 16 – Rugosidade dos corpos de prova. . . . .	75
Tabela 17 – Valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade. . . . .	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FPM	<i>Fused Pellet Modeling</i>
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
PEEK	Poliéter éter cetona
HDPE	Polietileno de alta densidade
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
UV	Raio ultravioleta
LEA	Laboratório de Engenharia Aplicada
LTC	Laboratório de Tribologia e Compósitos
MA	Manufatura aditiva
PCL	Policaprolactona
PET	Polietileno Tereftalato
PLA	Ácido Polilático
POM	Poliacetal
PTFE	Politetrafluoretileno (Teflon)
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varphi$       phi

## SUMÁRIO

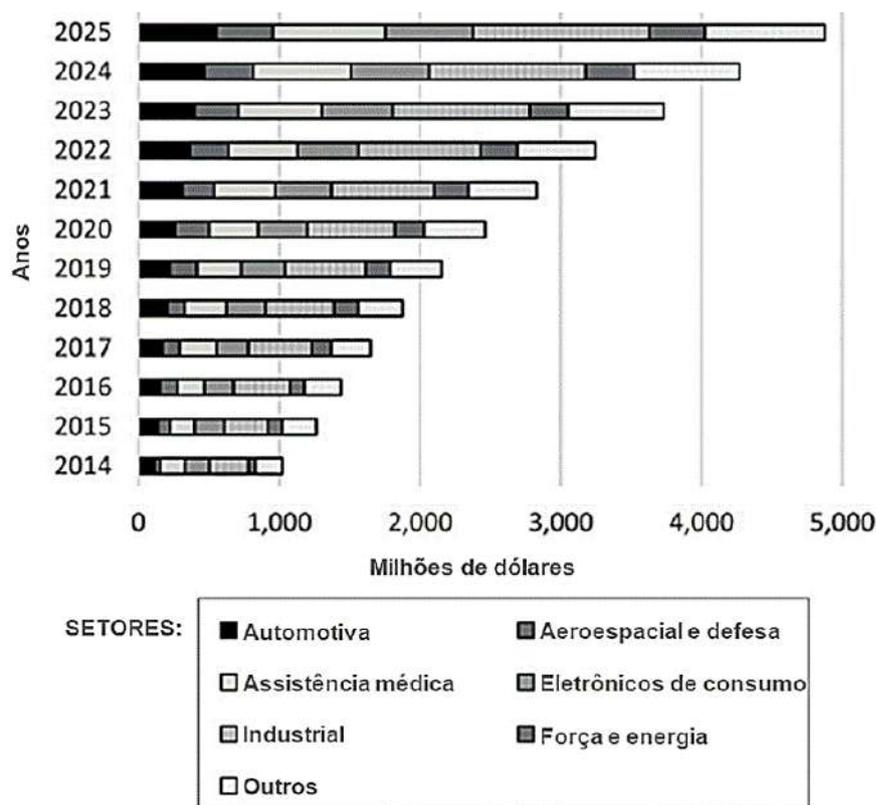
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>22</b>
2.1	TÉCNICA FDM	22
2.2	TÉCNICA FPM	24
2.3	FORMAÇÃO DE ADESÃO E PREVISÕES DE TEMPERATURA	27
2.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA	31
2.5	ACABAMENTO SUPERFICIAL	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
3.1	REPROJETO DA MESA	38
3.2	MODELO TÉRMICO DE ELEMENTOS FINITOS	40
3.3	TESTES DE AQUECIMENTO E MONTAGEM DA MESA	41
3.4	IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	46
<b>3.4.1</b>	<b>Configurações de impressão</b>	<b>47</b>
3.5	TESTE DE QUALIDADE DIMENSIONAL	48
3.6	TESTE DE QUALIDADE SUPERFICIAL	48
<b>3.6.1</b>	<b>Microscópio 3D</b>	<b>49</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Rugosímetro</b>	<b>51</b>
3.7	TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>56</b>
4.1	ANÁLISE TÉRMICA MEF	56
<b>4.1.1</b>	<b>Regime com controle 50°C</b>	<b>56</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Regime com controle 90°C</b>	<b>57</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Regime sem controle</b>	<b>61</b>
4.2	TESTES DE AQUECIMENTO	63
<b>4.2.1</b>	<b>Teste preliminar</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Teste final</b>	<b>64</b>
4.3	IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.	66
<b>4.3.1</b>	<b>Análise Dimensional</b>	<b>70</b>
4.4	QUALIDADE SUPERFICIAL	71
<b>4.4.1</b>	<b>Rugosímetro</b>	<b>71</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Microscópio</b>	<b>72</b>
4.4.2.1	Patamar 70°C	73
4.4.2.2	Patamar 90°C	73

4.4.2.3	Patamar 110°C . . . . .	74
4.5	RESISTÊNCIA MECÂNICA . . . . .	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a manufatura aditiva (MA) tem despertado um grande interesse na indústria devido às suas inúmeras vantagens na produção de protótipos e à sua capacidade de utilizar uma variedade de materiais de fabricação. Essa tecnologia possibilita que as empresas apresentem produtos e projetos mais robustos ao mercado global em um curto espaço de tempo. A rápida aceitação e aplicabilidade da MA em diversos setores, quando comparada aos processos de manufatura convencionais, têm impulsionado seu crescimento nos últimos anos. As projeções indicam que essa tendência de crescimento deve continuar nos próximos anos, conforme evidenciado pelos dados apresentados por Gordelier *et al.* (2019) e reproduzidos na Figura 1.

Figura 1 – Previsão de mercado de impressão 3D por ano, 2014 - 2025.



Fonte: Gordelier *et al.* (2019).

No cenário atual, diversas técnicas de MA foram desenvolvidas de acordo com as necessidades e complexidade dos produtos no mercado, possibilitando uma ampla capacidade de prototipagem em pequena e grande escala, com excelente qualidade e ótimas propriedades mecânicas. Esses são fatores importantes que impulsionaram as tecnologias de MA nos últimos

anos (NGO *et al.*, 2018). A Tabela 1 apresenta um resumo das várias técnicas possíveis de manufatura aditiva.

Tabela 1 – Modelos de impressão existentes.

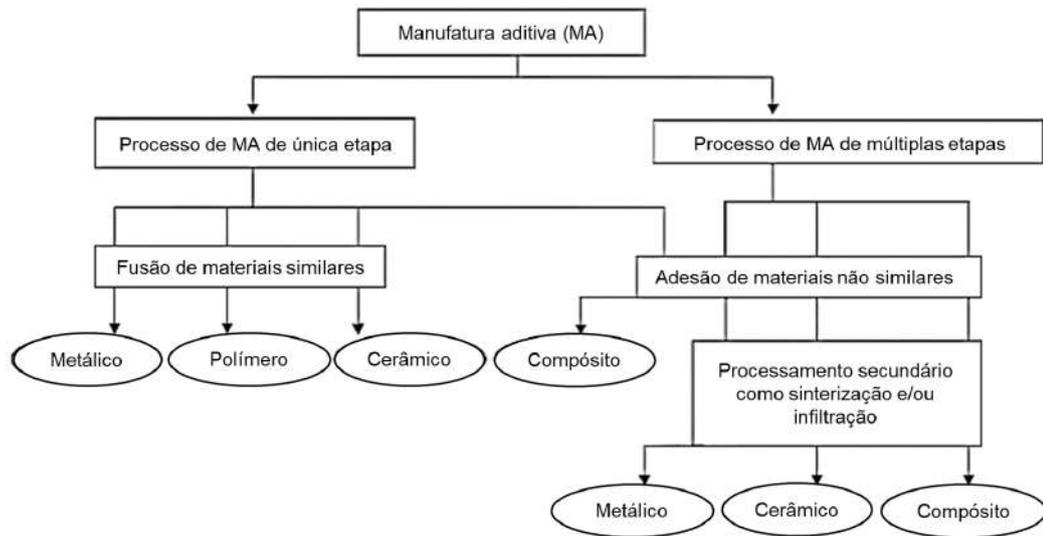
CATEGORIAS DE IMPRESSÃO	TIPOS DE IMPRESSÃO
Extrusão de material	Modelagem por deposição fundida (FDM) Fabricação de filamento fundido (FFF) Manufatura de extrusão por fusão (MEM) Impressão a jato de plástico (PJP) Modelagem de filamento Fundido (FFM)
Fotopolimerização em Cuba	Estereolitografia (SLA) Processamento Digital de luz (DLP) Digitalizar, Girar e Fotopolimerização Seletiva [3SP) Produção de Interface Líquida Contínua (CLIP)
Fusão em leito de pó	Sinterização seletiva a laser (SLS) Sinterização seletiva por calor (SHS) Sinterização direta a laser de metal (DMLS) Fusão por feixe de elétrons (EBM) Fusão seletiva a laser (SLM) Fusão multijato (MJF) Impressão de jato de tinta (3DP)
Deposição por energia direcionada	Deposição de metal a laser (LBMD ou LMD) Deposição direta de metal (DMD) Fabricação direcionada por luz (DLF) Modelagem de rede com engenharia laser (LENS) fabricação de forma livre a laser (LFF)
Laminação de folha	Manufatura Aditiva Ultrasônica (UAM) Manufatura laminar de objetos (LOM) Deposição seletiva de laminados (SDL)
Jateamento de material	Impressão de curvaturas suaves (SCP) Impressão por múltiplos jatos (MJM)

Fonte: Adaptado de Whyman (2018).

Outro fator que contribuiu para a acessibilidade das técnicas de MA foi o resultado de patentes desenvolvidas no passado por indústrias relevantes. Essas patentes permitiram que os fabricantes apresentassem aos seus clientes equipamentos e materiais de impressão mais rápidos e econômicos, capazes de atender a padrões específicos (NGO *et al.*, 2018).

Em resumo, a MA baseia-se em desenhos 3D desenvolvidos por meio de softwares CAD (*Computer Aided Design*) para a reprodução de peças de reposição, protótipos e até mesmo, lotes, o que viabiliza às engenharias o desenvolvimento de protótipos em tempo reduzido, garantindo exatidão e precisão em diversos tamanhos e formas (KUMAR; SATHIYA, 2021). Ao longo dos anos, a MA já foi definida por vários termos, tais como fabricação aditiva, processo aditivo, técnicas aditivas, fabricação de camada aditiva, fabricação de forma livre sólida e fabricação de forma livre (ABNT, 2018). O processo pode ser dividido em duas categorias: única etapa e múltiplas etapas, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Princípio do processamento MA.



Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

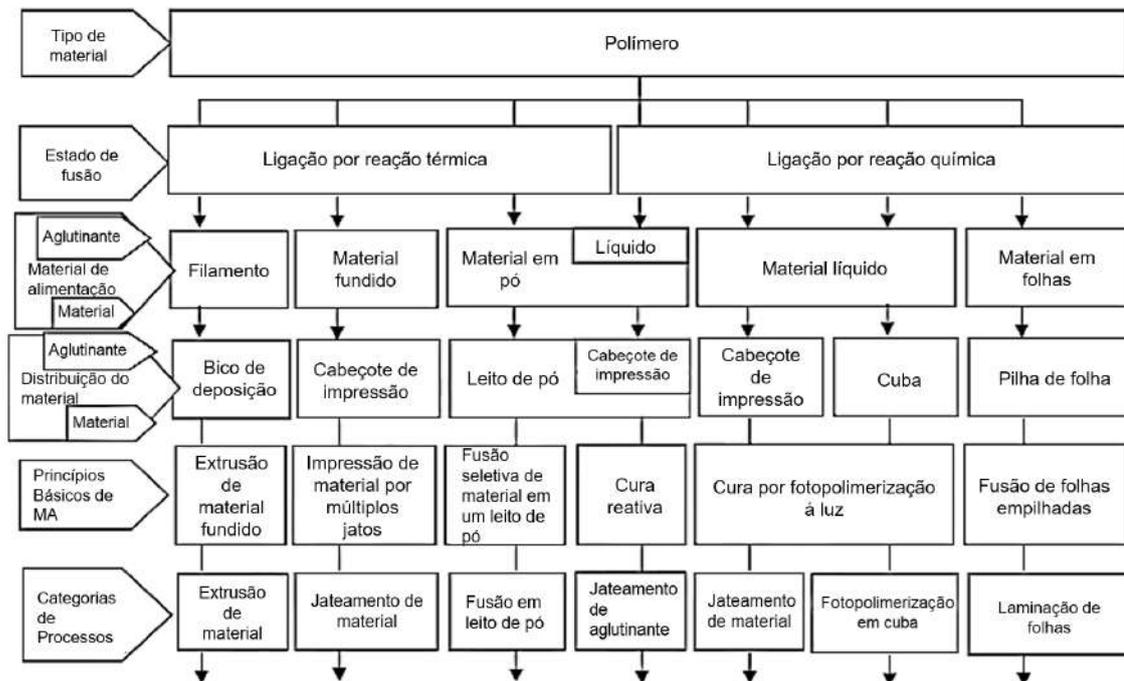
De acordo com a ABNT (2018), as propriedades dos materiais produzidos por meio da MA são determinadas por quatro fatores principais:

- tipo de material utilizado (polímero, metal, cerâmica ou composto);
- princípio de aplicação (fusão, cura ou sinterização);
- matéria-prima usada na adição das camadas (líquido, pó, suspensão, filamentos, folhas e outros);
- equipamento de impressão.

A norma NBR ISO/ASTM 52900 também menciona diversas maneiras pelas quais o material impresso pode ser transformado para fabricar uma peça, destacando a diversidade de materiais disponíveis caracterizados por diferentes tipos de ligações atômicas, tais como ligações metálicas, covalentes e iônicas. Dentre os materiais mais utilizados no processo de MA, os polímeros, em particular, são considerados atrativos e econômicos devido à facilidade de impressão de produtos com esse material (ABNT, 2018). Vários setores industriais têm direcionado sua atenção para a aplicação de polímeros (NGO *et al.*, 2018). A Figura 3 ilustra as várias combinações possíveis da aplicação dos polímeros na MA.

Para aplicação de materiais poliméricos na MA destacam-se as técnicas por extrusão onde o material polimérico é fundido e depositado em camadas para gerar a geometria final desejada. No caso da técnica por extrusão, um dos grandes desafios refere-se a temperatura, a qual desempenha um papel crítico na adesão das camadas das peças impressas. Quando as camadas de material são depositadas durante a impressão, elas se fundem e se solidificam para formar

Figura 3 – Princípios de processamento MA para materiais poliméricos.



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2018).

a estrutura final. A temperatura do substrato e do bico de extrusão são fatores importantes que afetam a qualidade da adesão entre as camadas. Como exemplos de alguns efeitos da temperatura na adesão de camadas de peças impressas destacam-se:

- Temperatura do substrato: a temperatura da mesa de impressão é crucial para garantir uma boa adesão da primeira camada à plataforma. Se a temperatura estiver muito baixa, a primeira camada pode não se fixar adequadamente, levando a problemas como descolamento ou deformações.
- Temperatura do bico de extrusão: a temperatura do bico de extrusão determina a viscosidade e a fluidez do material derretido. Se a temperatura do bico estiver muito baixa, a camada pode não ser depositada de forma uniforme e a adesão entre as camadas pode ser fraca. Por outro lado, uma temperatura muito alta pode levar a fusão excessiva entre as camadas e a perda de detalhes.
- Transição entre camadas: à medida que cada camada é depositada e resfriada, ocorre uma transferência de calor entre elas. Se a temperatura do substrato diminuir muito rapidamente, as camadas subsequentes podem não se fundir perfeitamente à camada anterior, resultando em potenciais falhas na adesão.

Estes fatos apontam a importância do controle de temperatura durante a manufatura aditiva. O controle preciso da temperatura ao longo de todo o processo de impressão é essencial para

garantir uma adesão adequada e minimizar distorções ocasionadas pelos efeitos termoelásticos.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é de investigar a influência da temperatura da base de uma mesa de impressão sobre a resistência mecânica e qualidade superficial de peças impressas com material polimérico ABS. Para tal, foi realizado o desenvolvimento da mesa de impressão com controle ativo de temperatura para compor uma célula de manufatura 3D em desenvolvimento para fabricação de produtos de grande porte (com volume de até 1 m<sup>3</sup>) em utilização no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Nesta célula, o material polimérico em grãos (*pellets*) é processado em uma extrusora monorosca, com capacidade para deposição de até 0,5 kg/h, e manipulada por um braço robótico industrial modelo Yaskawa GP88. Como objetivos específicos destacam-se:

- Re projetar e montar a mesa de impressão a partir de sua configuração atual para uma configuração que atenda patamares específicos de temperatura sem distorções da estrutura;
- Executar testes de aquecimento da nova configuração da mesa;
- Realizar a impressão de corpos de prova em patamares distintos de temperatura;
- Avaliar a resistência mecânica e qualidade superficial dos corpos impressos.

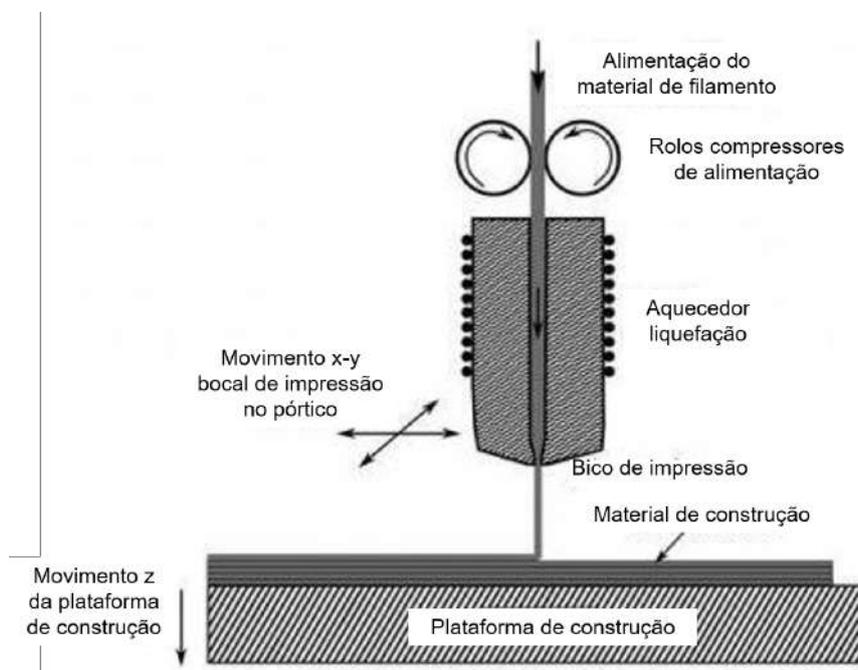
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os tópicos relacionados com a impressão de materiais poliméricos, abordando as características das principais técnicas de impressão assim como os efeitos da temperatura e de outros parâmetros de impressão sobre a adesão e qualidade superficial do impresso.

### 2.1 TÉCNICA FDM

Dentre as diversas técnicas de manufatura aditiva, destaca-se a técnica FDM (*Fused Deposition Modeling*) na qual materiais poliméricos são fundidos e depositados em camadas sobre uma plataforma para formar a geometria desejada. Em geral, a matéria prima são filamentos que passam por rolos de pressão que empurram o material para um bico extrusor aquecido onde o material é fundido e depositados sobre uma plataforma como mostra a Figura 4 (KUMAR, 2020). Uma característica fundamental do processo FDM, de acordo com Sun *et al.* (2008), é o seu potencial para fabricar peças com propriedades controladas localmente como porosidade, densidade e propriedades mecânicas.

Figura 4 – Esquemática da técnica de extrusão baseado no processamento MA.



Fonte: Turner, Strong e Gold (2014).

Conforme Durgun e Ertan (2014), dentre as vantagens da técnica de FDM destaca-se:

- Baixo custo de manutenção;

- Alta variedade de material disponível;
- Fabricação de peças com espessura fina;
- Peças com tolerâncias apertadas;
- Utilização de materiais não tóxicos;
- Operações em baixa temperatura.

As desvantagens do processo FDM estão relacionadas às características do material do filamento extrudado, que deve operar como um pistão durante o processo de impressão. Isso pode resultar em algumas limitações significativas no desempenho e na qualidade das peças produzidas. Segundo Kumar (2020) é fundamental que o filamento exiba a rigidez adequada para evitar qualquer deformação quando o material fundido é extrudado. Contudo, é igualmente essencial que o filamento não seja excessivamente rígido, de modo a permitir sua flexão durante o processo de extrusão. Além destas considerações, é importante que o filamento possua resistência suficiente para suportar a pressão exercida durante a alimentação do material, evitando o risco de quebra. Simultaneamente, é crucial evitar a escolha de um filamento tão forte, uma vez que isso poderia elevar o ponto de fusão a tal ponto que comprometesse o processo de fusão. Outra desvantagem do processo FDM, que pode se caracterizar como uma das mais desafiadoras, se refere a qualidade superficial e resistência mecânica dos impressos. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos para minimizar a rugosidade dos impressos, investigando diferentes tipos de polímeros, parâmetros e estratégias de impressão.

De acordo com Pakkanen *et al.* (2017), os materiais utilizados na técnica FDM devem apresentar propriedades tais como baixo ponto de fusão e viscosidade reduzida. Esses atributos são essenciais para assegurar a fluidez e a adesão adequada à camada prévia durante a deposição. A obtenção de parâmetros ótimos de viscosidade e fluidez repousa principalmente na identificação da temperatura de extrusão ideal para os polímeros de base utilizados no processo.

Dentre os materiais empregados na técnica FDM, o mais conhecido e amplamente utilizado nas impressões é o Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), boas propriedades mecânicas e facilidade de extrusão tornou a sua escolha preferida dos fabricantes. No entanto, o ABS tem a desvantagem de não ser um material biodegradável e possui baixa resistência aos raios ultravioleta (UV). Outro material comum e amplamente utilizado é o Ácido Poliláctico (PLA), que é um material biodegradável e reciclável, fabricado a partir da polimerização de açúcares e amidos. O PLA tem ganhado popularidade como uma alternativa mais ecológica ao ABS. Além desses, outros materiais também são utilizados em impressões FDM, incluindo os polímeros Policarbonato (PC), Poliamida (PA), Polietileno de alta densidade (HDPE), Polietileno Tereftalato (PET) e Poliuretano Termoplástico Flexível (TPU) (PAKKANEN *et al.*, 2017).

Conforme Whyman (2018), a escolha por materiais biodegradáveis tem sido cada vez mais adotada em substituição aos polímeros comuns, como mostrado na Tabela 2. A crescente

preocupação com o meio ambiente e a busca por soluções mais ecológicas tem impulsionado a adoção de materiais biodegradáveis na indústria de manufatura aditiva. Esses materiais são produzidos a partir de recursos renováveis e possuem baixo impacto ambiental, o que os torna uma opção mais sustentável. Além disso, o baixo custo desses materiais também contribui para sua popularidade como alternativa aos polímeros comuns (WHYMAN, 2018). Embora os materiais biodegradáveis apresentem desempenho de resistência próximo ou até mesmo superior aos polímeros convencionais, sua escolha está fortemente relacionada à preocupação com a sustentabilidade.

Tabela 2 – Materiais biodegradáveis para impressão 3D.

MATERIAL	PRODUZIDO DE	PROPRIEDADES	TEMPERATURA DE EXTRUSÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
PLA	Amidos vegetais	Resistente, forte	160 - 222 °C	Bio-plástico, não tóxico, inodoro, baixo empenamento	Baixa resistência ao calor, frágil
PVA	Petróleo	Solúvel em água, boa barreira	190 -210 °C	Biodegradável, reciclável, não tóxico	Expansivo, deteriora com umidade, armazenamento especial
PHA	Açúcares com biossíntese	Vários copolímeros, frágil e duro	-160 °C	UV estável, rigidez	Elasticidade, frágil
HIPS	Petróleo	Alta resistência ao impacto, solúvel em limoneno	190 - 210 °C	Biodegradável, baixo custo, similar ao ABS	Empenamento, mesa de impressão aquecida
PET	Petróleo	Forte e flexível	210 - 230 °C	Aprovação FDA, reciclável	Absorve umidade

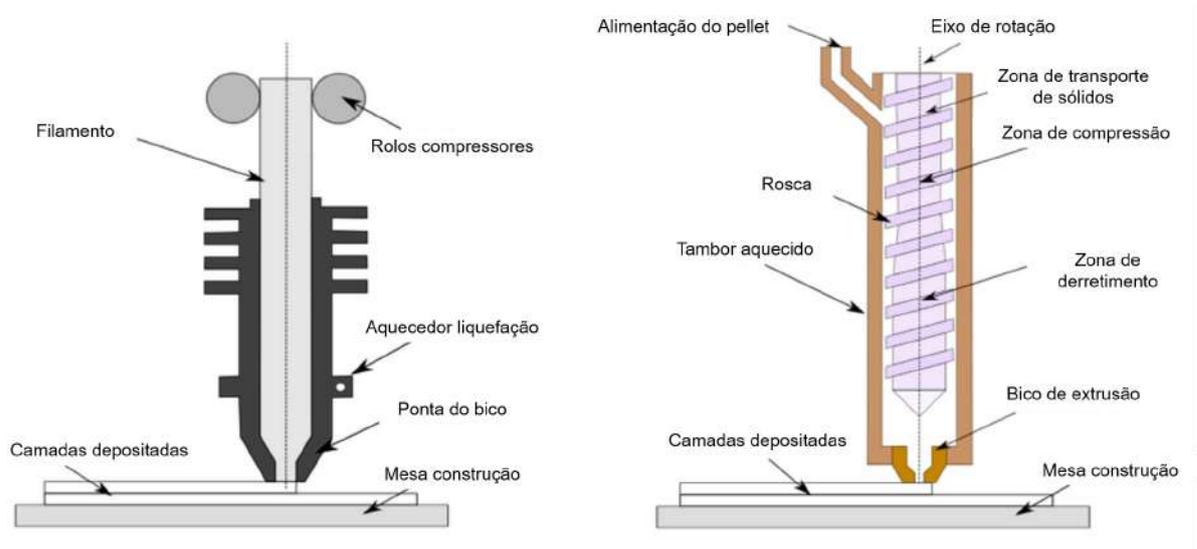
Fonte: Adaptado de Whyman (2018).

## 2.2 TÉCNICA FPM

Na técnica de manufatura aditiva FPM (*Fused Pellet Modeling*), materiais em formato de grãos (*pellets*) são colocados em um reservatório de alimentação para então serem aquecidos e fundidos durante a passagem por um bico extrusor. Essa técnica é amplamente utilizada com diferentes tipos de materiais e é especialmente adequada para a impressão de grandes volumes. O FPM se tornou uma alternativa viável e altamente versátil para a prototipagem rápida (WANG *et al.*, 2015). A Figura 5 apresenta um modelo de dispositivos da técnica FPM com a FDM.

Para garantir um desempenho ótimo no processo de extrusão FPM, o sistema precisa ser projetado considerando algumas funções. Na primeira seção de alimentação, os *pellets* passam por uma rosca de passo largo e diâmetro pequeno, o que resulta em um maior volume de material sendo empurrado pela força de fricção. Na segunda seção, conhecida como transição ou compressão, grande parte do material entra no ponto de fusão, e o diâmetro do parafuso se torna cada vez mais estreito, direcionando o material para a região de aquecimento da parede. Na última seção, ocorre o processo de bombeamento do parafuso, onde o material está completamente em

Figura 5 – Modelo esquemático da técnica FDM à esquerda e à direita o modelo esquemático da técnica FPM.



Fonte: Pricci, Tullio e Percoco (2021).

seu ponto de fusão, permitindo que o bombeamento supere a pressão na cabeça do bico extrusor (WANG *et al.*, 2015).

O processo de deposição pela técnica FPM não é simples de se reproduzir pois o bico extrusor necessita de uma velocidade de varredura coordenada com a vazão do material e, para isso, o peso e o volume do material precisam estar dentro de uma faixa requerida (WANG *et al.*, 2015).

A técnica FPM apresenta várias vantagens, incluindo baixo custo de materiais e operação, que está relacionado ao parafuso extrusor. Além disso, essa técnica permite a introdução de aditivos e diferentes combinações de materiais, que podem ser adicionados ao reservatório de alimentação mesmo durante a operação, eliminando o tempo de inatividade e processamento extra (WHYMAN, 2018). Redução do tempo de impressão devido ao fato da extrusora de *pellets* ter um bocal grande, velocidade de saída dos materiais é elevada, o que resulta numa redução do tempo de impressão quando comparado com a extrusora de filamentos. Outro aspecto vantajoso na extrusão FPM, é a possibilidade de realimentar *pellets* reciclados de uma peça que foi impressa na mesma extrusora (SHAIK; SCHUSTER; SHAIK, 2021). No entanto, há algumas desvantagens associadas ao FPM. Por exemplo, essa técnica pode se tornar inviável para produzir peças em pequena escala, uma vez que é mais aplicada em processos industriais. Outra desvantagem é a possibilidade de contaminação do material extrudado devido à presença de partículas dispersas, o que pode afetar a qualidade do produto final e a eficiência do processamento. Além disso, o sistema de monitoramento do FPM é mais complexo em comparação com o FDM, o que pode resultar em um maior número de falhas no processo. Os impressos feitos com FPM também podem apresentar defeitos, como bolhas, superfícies irregulares, inconsistências e, em muitos

casos, entupimento no bico (WHYMAN, 2018).

Shaik, Schuster e Shaik (2021) faz uma concisa comparação entre as técnicas de extrusão de *pellets* e extrusão de filamentos apresentada na Tabela 3. Cada uma dessas abordagens possui suas próprias características distintas e desempenha um papel crucial, dependendo das necessidades específicas das impressões em questão.

Tabela 3 – Comparações das técnicas por extrusão de *pellets* e filamentos.

ESPECIFICAÇÕES	EXTRUSÃO EM PELLETS	EXTRUSÃO EM FILAMENTOS
Custo da extrusão	Moderado	Moderado
Custo da matéria prima	Barato	Caro
Taxa de fluxo de material	Alta	Baixo
Qualidade do acabamento superficial	Baixo	Alta
Variedade de materiais	Maior	Menor
Temperatura de extrusão	Alta	Comparavelmente baixo
Impressão de modelos complexos	Inflexível	Flexível
Reforço com fibras	Muito boa	Ruim
Custo do produto final	Baixo	Comparavelmente alto

Fonte: Adaptado de Shaik, Schuster e Shaik (2021).

Existem várias impressoras 3D especializadas em impressão de larga escala, porém, estas máquinas são significativamente mais lentas e apresentam dimensional menos preciso quando comparadas as impressoras menores padrão, além de serem muito mais caras. A Tabela 4 apresenta alguns modelos de volumes de impressão, custos e área de impressão.

Tabela 4 – Modelo e custo avaliável de impressoras em larga escala.

IMPRESSORA 3D	PREÇO (Dólares)	VOLUME (m³)	TAMANHO (mm)
BAAM—Cincinnati Labs	-	35,5	6096 x 3186 x 1829
BigRep ONE	10.000-50.000	1,02	1005 x 1005 x 1005
Fouche 3D Printing Cheetah Pro	10.400	1,00	1000 x 1000 x 1000
CoLiDo Mega	26.000	1,50	1000 x 1000 x 1500
Titan Robotics Atlas 2.0	26.200	1,02	915 x 915 x 1220
3D Platform 400 Series	36.999	1,05	1000 x 1500 x 700
HORI Z1000	40.000	1,00	1000 x 1000 x 1000
Erector EB 2076 LX	46.425	23,78	6096 x 2133 x 1829
German RepRap X1000	65.500	0,48	1000 x 800 x 600
Zilla3D Deltazilla	7995	0,69	750 x 750 x 1220
THE BOX	< 250.000	2,48	1500 x 1100 x 1500
Moebyus Machines M3	18.516	1,00	1000 x 1000 x 1000
Extreme Builder 2000	23.456	0,89	700 x 700 x 1820
DeltaWASP 3MT	27.660	1,20	3000 x 3000 x 3000
Leapfrog XceL	27.783	0,59	510 x 500 x 2300
Tractus3D T3500	42.602	2,00	1000 x 1000 x 2000

Fonte: Adaptado de Shah *et al.* (2019).

### 2.3 FORMAÇÃO DE ADESÃO E PREVISÕES DE TEMPERATURA

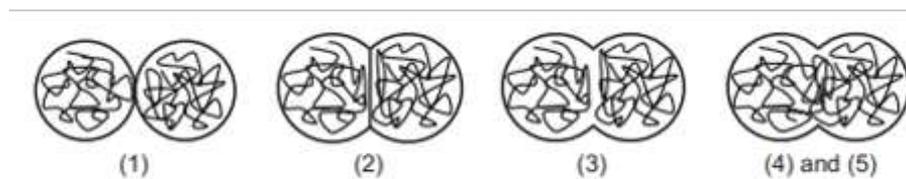
O processo de formação da adesão entre filamentos de peças produzidas pelas técnicas FDM e FPM é conduzida pela energia térmica do material a ser extrudado. A qualidade de adesão do impresso é resultado de um bom desempenho do histórico de temperatura entre interfaces, que consequentemente acarreta em boas propriedades mecânicas no produto (SUN *et al.*, 2008). A resistência de uma peça MA de extrusão por fusão será limitada fundamentalmente pela força do vínculo entre camadas vizinhas. A força de ligação será uma função da energia de adesão/coesão, que dependerá parte da área de contato entre pescoço (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

Conforme Coogan e Kazmer (2017) este processo de adesão entre camadas, ilustrado na Figura 6, ocorre em cinco etapas:

1. rearranjo de superfície,
2. superfície de aproximação,
3. umedecimento,
4. difusão
5. randomização

Durante a fase de rearranjo, o processo de aproximação das superfícies induz o contato entre elas. Contudo, o completo estabelecimento do contato entre as superfícies apenas se consumará após a remoção integral de todas as obstruções físicas, tais como proeminências e texturas superficiais. O surgimento da força de resistência no ponto de contato se inicia quando uma superfície começa a efetuar uma "molhagem" da outra, o que resulta na configuração inicial dessa resistência. Após a molhagem ter sido estabelecida, essa resistência tende a aumentar à medida que as cadeias poliméricas iniciam um processo de difusão na região de interface. Em outras palavras, as propriedades mecânicas inerentes ao material original somente serão restauradas em sua totalidade durante a fase de difusão, quando as cadeias poliméricas adentrarem a interface até atingirem um estado de interpenetração em equilíbrio. Na etapa subsequente de randomização, as cadeias poliméricas continuam a se difundir e se misturar, embora as propriedades mecânicas da interface não registrem mais incrementos significativos (COOGAN, 2015).

Figura 6 – Processo de formação da Adesão. 1) Superfície de Rearranjo, 2) Superfície de Aproximação, 3) Umedecimento, 4) Difusão e 5) Randomização.



Fonte: Coogan e Kazmer (2017).

Khanafer *et al.* (2022) menciona que a rigidez das camadas e resistência dos modelos impressos é resultado da força de ligação entre os filamentos. A ligação entre os filamentos depende da histórico da temperatura na região de interface entre uma camada em deposição e as camadas adjacentes. Para superar a interface de elo fraco das peças FDM, é necessário otimizar o processo FDM em termos de controle de temperatura. As propriedades mecânicas das peças fundidas são afetadas pela temperatura do sistema FDM, incluindo temperatura do bocal, temperatura base e temperatura ambiente (YU *et al.*, 2021).

No trabalho de Khanafer *et al.* (2022) é mencionado que para garantir o vínculo de formação de adesão entre camadas é necessário que a camada anterior seja reaquecida a uma temperatura acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do material. Para quantificar o grau de ligação interpenetrada formada na interface do material é proposto um potencial de ligação ( $\varphi$ ) dado pela integral ao longo do tempo da diferença de temperatura da camada de interface e crítica conforme expresso pela Equação 1.

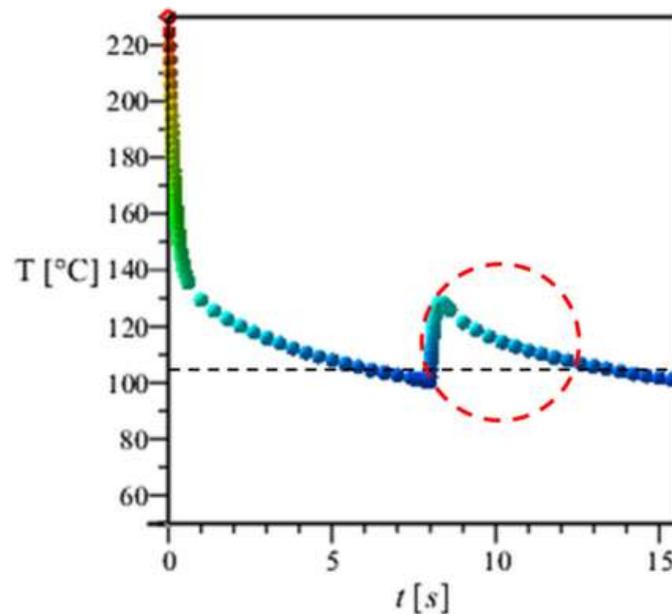
$$\varphi = \int_0^t (T - T_c) * dt \quad (1)$$

- $\varphi$  Potencial de ligação;

- $T$  Temperatura de interface;
- $T_c$  Temperatura crítica;

Khanafer *et al.* (2022) também apresenta um gráfico típico da evolução da temperatura contra o tempo durante o processo conforme mostrado na Figura 7. A adesão irá ocorrer quando a temperatura estiver acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ).

Figura 7 – Gráfico curva de temperatura e isotérmico  $T$  °C.



Fonte: Khanafer *et al.* (2022).

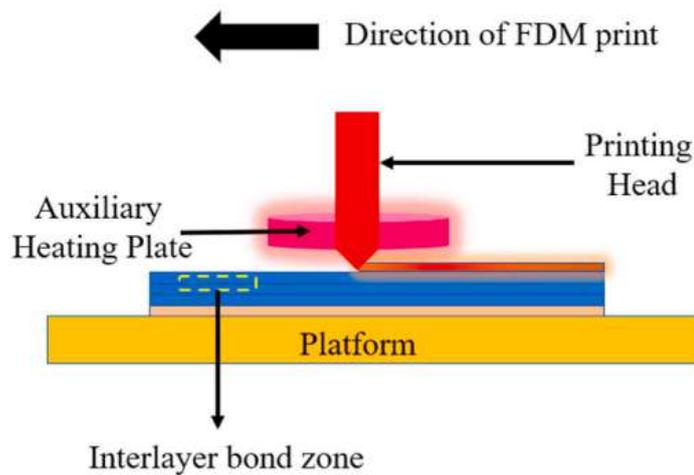
Gardner *et al.* (2022) menciona que as impressoras de código aberto possuem limitações em relação a materiais de alta performance, o que leva à dificuldade de manter a temperatura das camadas uniforme durante toda a impressão. Além disso, a falta de controles térmicos na cabine pode resultar em um controle insuficiente da temperatura da impressão e das condições do ambiente. Já Jo, Kwon e Moon (2018) relata que o processo de refluxo térmico como uma etapa de pós-processamento, que envolve a aplicação de aquecimento em objetos impressos em FDM, poderia apresentar uma melhora considerável a rugosidade da superfície, adesão e durabilidade.

Alguns pesquisadores se empenharam em desenvolver novas abordagens para os parâmetros de aquecimento e otimização das condições de adesão das camadas, com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas e o acabamento superficial das peças produzidas.

A exemplo de Yu *et al.* (2021) que em sua pesquisa observou que outros pesquisadores estavam focados nos parâmetros de temperatura de extrusão e da plataforma. Em seu próprio estudo, ele procurou criar um sistema de aquecimento adicional próximo ao bico de extrusão. O objetivo era aprimorar as propriedades mecânicas das peças de PLA impressas pela de tecnologia FDM. Para alcançar seu objetivo, foi desenvolvido um dispositivo de placa que recebe uma

potência de aquecimento controlada por um sistema de controle PID apresentada na Figura 8. Esse sistema foi projetado para manter a temperatura de aquecimento auxiliar a um valor constante. O propósito dessa implementação era avaliar a qualidade da aderência entre as camadas e a anisotropia mecânica das peças resultantes.

Figura 8 – Modelo esquemático de aquecimento auxiliar na impressão FDM.

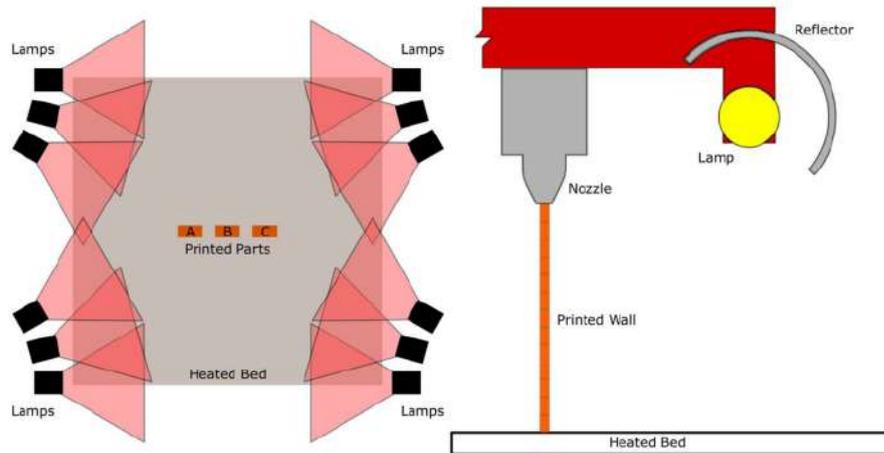


Fonte: Yu *et al.* (2021).

Outra pesquisa realizada por Gardner *et al.* (2022) desenvolveu uma impressora 3D de código aberto que incorpora um sistema de controle de ambiente. A Figura 9 ilustra uma cabine de aquecimento das peças utiliza lâmpadas infravermelhas direcionadas para manter a temperatura o mais próxima do valor desejado, enquanto os componentes da impressora permanecem dentro das faixas de operação projetadas. Esse sistema possibilita a impressão de polímeros em alta temperatura e minimizar os riscos de danos à máquina. Além disso, busca estabelecer uma ligação interfacial ideal entre as propriedades mecânicas e os defeitos de superfície das peças impressas em diversas condições de ambiente, a fim de determinar o impacto dessas condições nas propriedades finais das peças.

Lau *et al.* (2023) apresentaram uma observação de grande relevância em relação à otimização dos parâmetros de impressão FDM visando aprimorar a qualidade das impressões. Ele destaca que, muitas vezes, pouco foco é dado à compreensão do papel do fluxo de calor proveniente da cama de impressão aquecida na qualidade geral da impressão. Seu estudo investiga detalhadamente o impacto do fluxo de calor da cama de impressão e das características superficiais na formação de defeitos de ondulação e aspereza na superfície das peças impressas. Para realizar essa investigação, ele adicionou uma placa térmica condutora de zinco sobre a cama de impressão padrão, com o intuito de alterar o fluxo de calor na superfície de impressão. O objetivo era examinar minuciosamente como a interação entre a superfície da amostra produzida por FDM e a superfície da cama de impressão influenciava o resultado final.

Figura 9 – Modelo direcionado de aquecimento com lâmpadas infravermelhas



Fonte: Gardner *et al.* (2022).

## 2.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Apesar da técnica de FDM ser considerada um dos processos mais vantajosos e econômicos tanto na fabricação peças 3D e no consumo da matéria prima, as peças impressas pela técnica FDM por outro lado apresenta grandes limitações em suas propriedades mecânicas. Estas limitações na sua grande maioria estão relacionadas ao tipo do material, tipo de processamento e geometria do impresso (RANE, 2019). A Tabela 10 a seguir apresenta as propriedades mecânicas dos materiais comumente usados.

Figura 10 – Propriedades dos materiais impressos usados no processo FDM.

MATRIZ	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	MÓDULO DE TRAÇÃO (Gpa)	MÓDULO DE FLEXÃO (Gpa)	TEMPERATURA DE IMPRESSÃO (°C)
ABS	1.04	22-37	0.998	1.9	210-250
PA	1.1	34-68	0.94	0.84	235-260
PLA	1.25	37-46	2.02	2.39	190-210
PEEK	1.3	48-265	3.5-3.9	3.47-4	360-450
PP	0.92	20-40	1.1-1.6	1.2-1.6	230-260

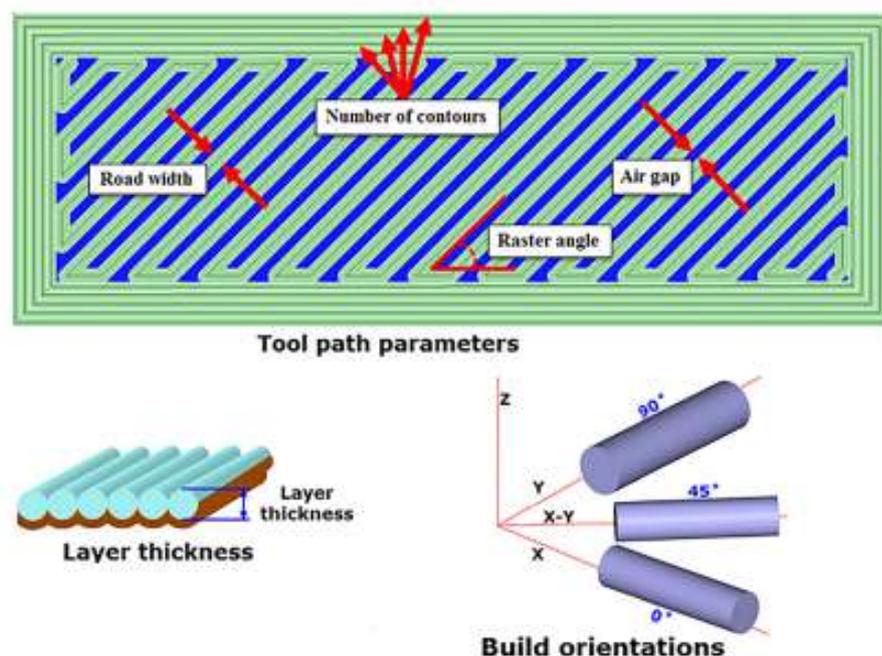
Fonte: Adaptado de Shanmugam *et al.* (2021).

No entanto, o processo FDM apresenta resistência mecânica inferiores quando comparados com outros processos como a da moldagem por injeção em que as peças em FDM possuem pontos fracos entre as camadas devido à presença vazios e também os materiais termoplásticos tendem a encolher durante o processo de resfriamento, o que pode resultar em peças com empenamento (WENG *et al.*, 2016).

De acordo com Rane (2019) os fatores que influenciam as propriedades mecânicas dessas peças estão relacionados aos parâmetros de impressão, como porcentagem de preenchimento, padrão de preenchimento, número de cascas por perímetro, orientação de impressão, altura das camadas, espaços livres e temperaturas de impressão. No âmbito de obter melhores propriedades de tração Dizon *et al.* (2018) menciona que filamentos orientados longitudinalmente e paralelos à direção do carregamento apresenta maior tração e que quando os filamentos são depositados ao longo de sua direção de construção resulta em valores de baixa resistência à tração, uma explicação para isso é que diferentes direções de impressão apresentam diferentes resultados de resistência a tração está na formação de ligação entre camadas.

Já Gordelier *et al.* (2019) aborda, em uma revisão de estado da arte, os efeitos dos principais parâmetros de impressão sobre as propriedades mecânicas do impresso. A Figura 11 ilustra alguns destes principais parâmetros e suas correspondentes descrições são dadas a seguir.

Figura 11 – Parâmetros de processos FDM.



Fonte: Nyiranzeyimana *et al.* (2021)

- Seleção de materiais: uma variedade de materiais pode ser utilizada nos processos de FDM, e cada vez mais novos materiais são desenvolvidos, possibilitando novas opções de processamento. Os materiais mais comuns são o ABS e o PLA, cujas características e propriedades mecânicas são abordadas em várias literaturas. Pesquisas comparativas feitas sobre a resistência dos materiais ABS e PLA revelam resultados em que o PLA possui limite de escoamento até 1,5 vezes superior ao do ABS. Outra análise investigada mostra que o PLA apresenta o dobro da resistência à tração do ABS. Os materiais alternativos

novos disponíveis no mercado, como o Poliéter éter cetona (PEEK), possuem estudos comparativos em relação ao ABS, onde chegam a apresentar resistência à tração superior em média de 108%. Esses materiais novos usam aditivos para desenvolver e melhorar as propriedades mecânicas.

- **Altura das camadas:** as orientações planas e na borda são fatores importantes a serem considerados na impressão 3D para garantir a máxima resistência à tração. Estudos realizados com materiais como ABS e PLA demonstraram que a redução da altura da camada pode levar a melhorias significativas na resistência à tração, chegando a 24,5% de melhoria no caso do PLA, ao reduzir a altura da camada de 0,4 mm para 0,2 mm. O resultado destacou que essa melhora na resistência à tração pode estar associada a um aumento no tempo de impressão, devido à necessidade de imprimir mais camadas. Esse aumento no tempo de impressão também se tornou um fator essencial para encontrar um equilíbrio entre a melhoria da resistência à tração e o aumento do tempo de fabricação.
- **Orientação da impressão:** geralmente, quando a resistência à tração é uma prioridade, deve-se evitar a impressão na vertical. A orientação plana ou na borda obtém melhor desempenho de tração para materiais como ABS, PC e PLA, muitas vezes alcançando duas vezes a resistência à tração de amostras impressas na vertical. Vários autores observaram uma variação mínima na resistência de amostras planas e impressas na borda.
- **Ângulo raster (orientação do filamento):** numerosas pesquisas têm se dedicado à investigação do parâmetro do ângulo de raster como um elemento que oferece resultados otimizados na manufatura aditiva. O ângulo de raster consiste essencialmente em uma variável de controle que determina o ângulo dos trajetos seguidos durante a deposição das camadas. Os ângulos mais frequentemente empregados são 0°, 45° e 90°. Resultados obtidos a partir desses parâmetros confirmam que, em testes realizados com material ABS, o ângulo de 0° demonstrou resistência à tração superior em comparação com o ângulo de 90°. Em relação a outro material, o PLA, testes realizados também comprovaram que os ângulos de 0° e 45° resultaram em maior resistência à tração em comparação com o ângulo de 90°. Notavelmente, o ângulo de 0° se apresenta como o parâmetro que alcança resultados mais expressivos.
- **Vazios e largura:** os vazios (*air gaps*) e a largura do caminho (*road width*) devem ser otimizados em conjunto para assegurar uma alta qualidade de adesão entre camadas sem transbordamentos. Considerar vazios ligeiramente negativos resulta em amostras de maior resistência, esses intervalos negativos promovem uma ligação mais eficiente entre as camadas adjacentes. O parâmetro de largura do caminho de deposição (*road width*) está intrinsecamente relacionado com o vazio entre camadas, e quando selecionado de maneira adequada em conjunto com o *air gap*, resulta em ligações robustas. Quando essa associação não é bem equilibrada, falhas como excesso de preenchimento podem ocorrer, levando a

sobreposição indesejada das camadas, impactando negativamente tanto no aspecto visual quanto na resistência do material.

## 2.5 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Nos últimos 20 anos, houve uma grande quantidade de pesquisas envolvendo a melhoria da qualidade da superfície das peças produzidas pelo processo FDM. Vários pesquisadores adotaram diferentes abordagens para reduzir a rugosidade da superfície das peças fabricadas por FDM, tais como otimização dos parâmetros de impressão, tratamento químico e otimização da estratégia de fatiamento do processo FDM.

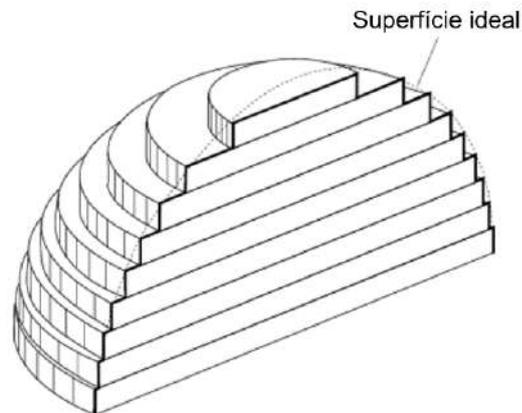
No entanto, o processo FDM apresenta algumas limitações inerentes, como acabamento superficial e precisão dimensional, que podem requerer pós-processamento das peças. A rugosidade da superfície das peças FDM é um problema significativo enfrentado pelos pesquisadores devido à estratégia de deposição camada por camada, que é um princípio fundamental dessa tecnologia. Durante o empilhamento de diferentes camadas, degraus de escada são visíveis, especialmente em curvas e peças circulares. Também ocorrem picos e vales em dimensões lineares devido ao espaço entre duas camadas depositadas de material impresso (CHOHAN *et al.*, 2022).

Dois grupos de parâmetros podem influenciar a precisão dimensional ou a qualidade da superfície dos produtos FDM, são eles o processo e condições de impressão. Os parâmetros do processo compreendem a espessura da camada, direção de construção ideal, espaços livres e ângulo raster (SOARES *et al.*, 2018).

A orientação da peça e a geração de suportes são parâmetros cruciais na fabricação por camadas. De acordo com as observações de Sreedhar, Mathikumar e Jothi (2012), a quantidade de suporte utilizada pode ter um grande impacto na qualidade superficial da peça. Reduzir esse efeito requer que a peça seja adequadamente apoiada durante todo o processo de impressão, minimizar a área total de contato com o suporte e, conseqüentemente, reduzir a necessidade de pós-processamento da superfície. Além disso, é importante lidar com o fenômeno conhecido como "efeito cascata", Figura 12, que é inerente à impressão por camadas. Para atenuar esse efeito, é necessário reduzir a presença de superfícies inclinadas e maximizar a suavidade das superfícies impressas que pode contribuir para a obtenção de resultados de alta qualidade.

De fato, muitos pesquisadores têm se dedicado a aprimorar diversos aspectos das peças fabricadas por FDM, incluindo a qualidade superficial, a precisão dimensional e o tempo de fabricação. Entre os tópicos explorados, a rugosidade superficial tem sido objeto de estudo por vários especialistas na área. Por exemplo, Anitha, Arunachalam e Radhakrishnan (2001) propôs o método Taguchi para explorar o efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície, incluindo espessura da camada, largura da estrada e velocidade de impressão, respectivamente. Wang, Zou e Ding (2019) abordou uma nova proposta para modelar a rugosidade da superfície

Figura 12 – Fenômeno do efeito cascata nos modelos de impressão por camadas.



Fonte: Adaptado de Nourghassemi (2021).

considerando a difusão entre os filamentos de deposição para impressão 3D de modelagem de deposição fundida FDM de resina resistente ao calor. Khan e Mishra (2020) aborda os efeitos dos parâmetros de fabricação por FDM na rugosidade superficial de peças em ABS. A pesquisa propõe uma técnica inovadora de pós-processamento químico para aprimorar a qualidade da superfície de peças. O estudo analisa especialmente os parâmetros de suavização, que incluem temperatura, tempo de imersão e ciclo de suavização com o objetivo de identificar o parâmetro de air gaps como o mais significativo.

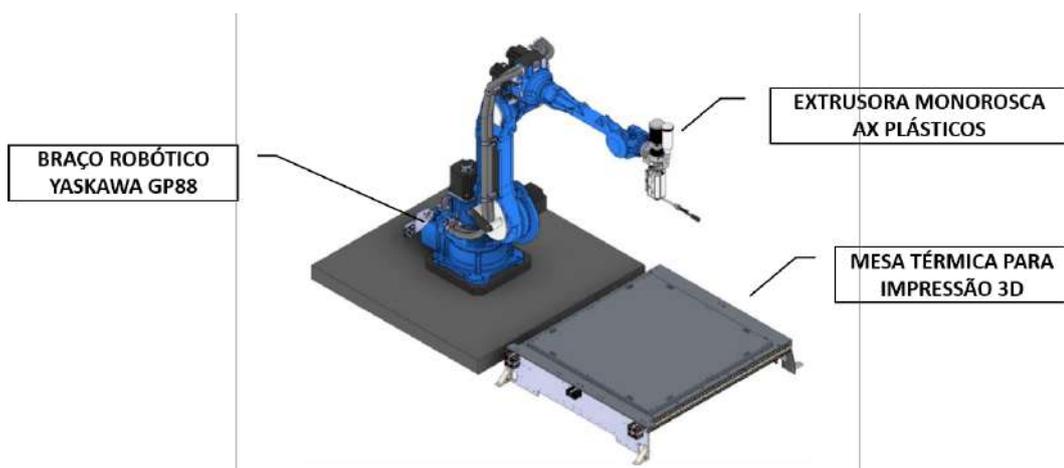
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a investigação dos efeitos da temperatura sobre a qualidade superficial, dimensional e resistência mecânica na impressão FPM foi utilizada a célula de manufatura localizada no Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Para investigações futuras e o avanço de estudos relacionados à impressão 3D de peças de grande volume, este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados, a nomenclatura e classificação dos corpos de prova, bem como as configurações finais da mesa de impressão e parâmetros de aquecimento em termos de sua estrutura física.

Inicialmente, foram realizadas modificações em uma mesa de impressão já existente, com o objetivo de incorporar um sistema de controle ativo de temperatura. Foram desenvolvidos projetos conceituais de mesas de impressão, nos quais foi proposta a utilização de isolamento térmico na região de deposição do material impresso, de forma a evitar a transferência de calor para a estrutura da mesa. Além disso, será empregado um sistema de aquecimento por meio de mantas térmicas na base da mesa, as quais serão controladas por um algoritmo do tipo ON/OFF, visando a manutenção das temperaturas desejadas

A célula de manufatura é composta por um robô da marca Yakawa, modelo Motoman® GP88, que foi integrado com uma extrusora monorosca da marca AX Plásticos®. Além disso, a célula inclui uma mesa térmica dedicada para a impressão 3D, conforme ilustrado na Figura 13. A extrusora é alimentada por gravidade, através de um funil, com o material polimérico em formato de *pellets* sendo os principais materiais utilizados na célula o ABS, PLA e PCL.

Figura 13 – Célula de manufatura.

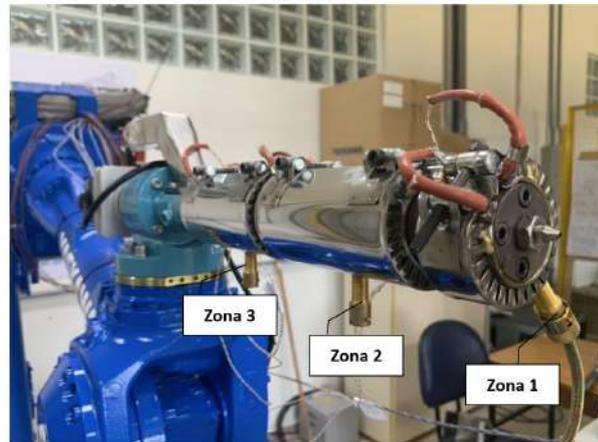


Fonte: Autoria própria.

A Figura 14 apresenta detalhe da extrusora na qual os *pellets* passam por três zonas de aquecimento, cada uma delas equipada com termopares para controle da temperatura, onde

o material é fundido para, em seguida, ser depositado sobre a mesa de impressão seguindo a trajetória conforme o plano previamente carregado no controlador do robô.

Figura 14 – Bico extrusor da Célula da MA com as três zonas de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

O robô está equipado com um controlador YRC1000 apresentado na Figura 15, responsável por gerenciar a trajetória e a velocidade de movimento. Este controlador possui a capacidade de ler o programa G-code, que é carregado e posicionado no software. A parametrização e as propriedades dos movimentos e orientações do braço robótico são configuradas para permitir a impressão da amostra de acordo com as especificações desejadas.

Figura 15 – Controlador YRC1000.

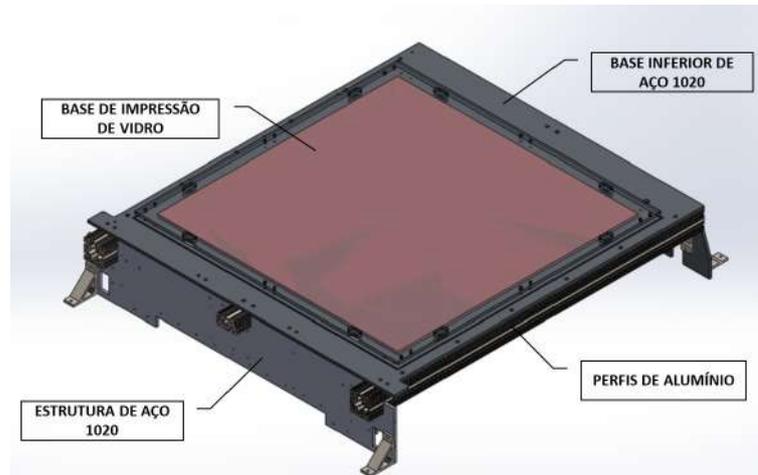


Fonte: Autoria própria.

A mesa original da célula é formada por uma estrutura de aço 1020 e perfis de alumínio conforme mostrado na Figura 16. A base de impressão utilizada como superfície de deposição do

material impresso é composta por um vidro de dimensões de 1000 mm x 1000 mm x 9,5 mm e cujo aquecimento é realizado por quatro mantas térmicas com dimensões de 1000 mm x 250 mm x 6 mm e capacidade de 2000 Watts de potência. As mantas são posicionadas na parte inferior do vidro e apresentam controle do tipo ON/OFF, visando a manutenção das temperaturas desejadas.

Figura 16 – Mesa térmica para impressão 3D.



Fonte: Autoria própria.

### 3.1 REPROJETO DA MESA

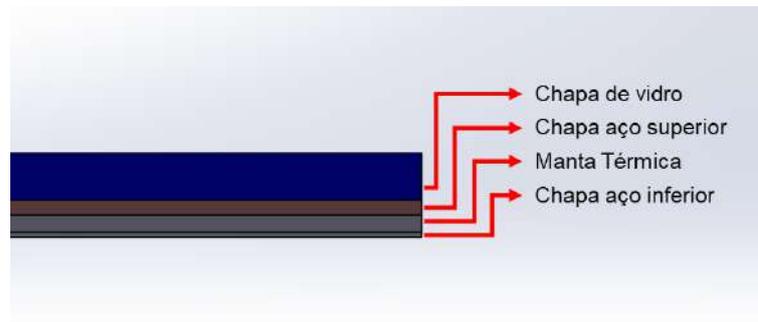
Inicialmente foi realizado o reprojeto da mesa de impressão da célula, sob a qual o material é depositado, para garantir sua estabilidade dimensional e os patamares de temperatura de interesse. Nesta etapa foram utilizados o software SolidWorks 2019 para modelagem CAD e o software NX-Siemens para geração de modelos térmicos de elementos finitos.

Um dos grandes problemas encontrados durante o aquecimento da mesa na sua configuração original foi a dissipação de calor para a estrutura ocasionando dilatações e deformações. Para minimizar este problema, inicialmente o modelo CAD da mesa foi desenvolvido utilizando o software Solidworks 2019 e em seguida foram elaborados projetos conceituais nos quais foram concebidas modificações.

A primeira modificação refere-se ao subconjunto de aquecimento que utilizou um conceito de “sanduíche” com chapas de aço SAE 1020 posicionadas na parte inferior e superior das mantas térmicas conforme esquematizado na Figura 17. Desta forma, buscou-se uma melhor homogeneização da temperatura por toda área de impressão dada pelo espalhamento de calor sobre a superfície de impressão durante o processo de aquecimento.

A segunda modificação refere-se a utilização de isolamentos térmicos em partes da estrutura de forma a garantir que a transferência de calor permanecesse localizada na região de impressão. A configuração modificada utilizou elementos isolantes como seis placas com dimensões de 75x35x12 mm sobre as estruturas de alumínio laterais e três placas com dimensões

Figura 17 – Área de impressão ("sanduiche").

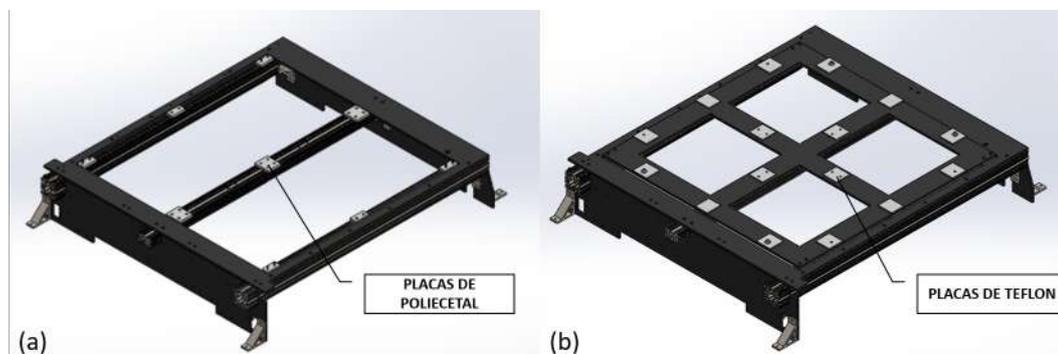


Fonte: Autoria própria.

75x75x12 mm na estrutura central de Poliacetal (POM) para separação da estrutura da mesa com chapa de apoio da base, assim restringir a dissipação do calor da mesa aquecida para toda a estrutura conforme ilustrado na Figura 18a.

O Poliacetal é um plástico de engenharia rígido com excepcional estabilidade dimensional, baixa absorção de água, baixo coeficiente de atrito, elevada resistência à abrasão e agentes químicos. O POM é um dos termoplásticos com maior índice de aplicação nos diversos setores industriais e apresenta resistência a temperaturas de serviço em longa duração até 100°C e, por períodos limitados até 140°C, mesmo a temperaturas mais elevadas, a resistência do produto a baixas temperaturas permite um desempenho satisfatório até -30°C. Outra camada isolante de placas de Teflon (PTFE) foi utilizada entre a estrutura central de apoio e o subconjunto de aquecimento composto pelas chapas e mantas térmicas Figura 18b. O Teflon apresenta excelente resistência a temperaturas de serviço contínuas até 260° C e, por períodos limitados, mesmo a temperaturas mais elevadas, a resistência do produto a baixas temperaturas permite um desempenho satisfatório até -200° C.

Figura 18 – a) Primeira camada com isolantes Policetal, b) Segunda camada com isolantes Teflon.

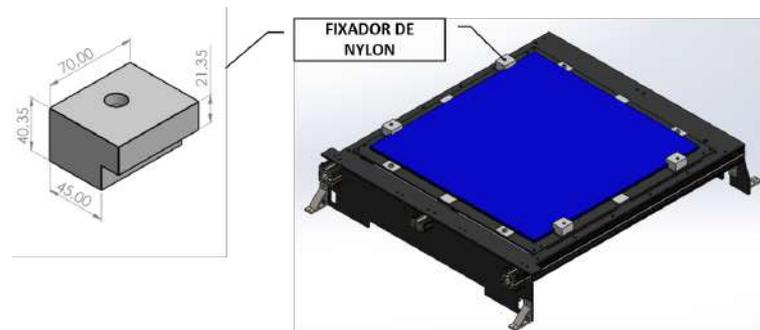


Fonte: Autoria própria.

Para fixar a área de impressão foram fabricados no laboratório do LEA fixadores de Nylon para garantir a fixação da mesa e também que ela permita uma folga para dilatação das

chapas de aço durante o aquecimento das mantas térmicas conforme a Figura 19.

Figura 19 – Fixador de Nylon.



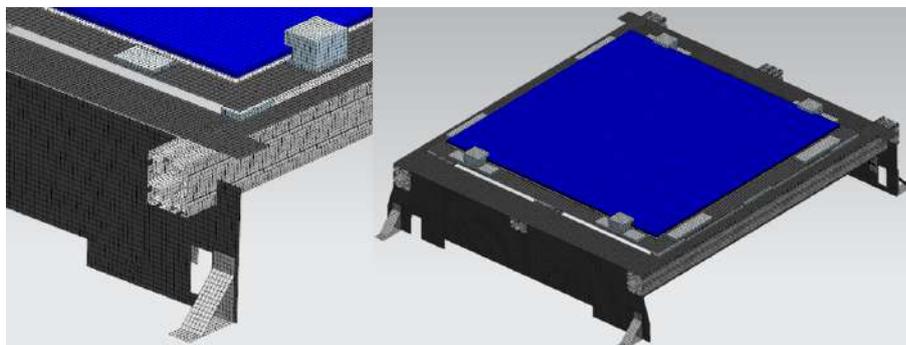
Fonte: Autoria própria.

### 3.2 MODELO TÉRMICO DE ELEMENTOS FINITOS

Durante o processo de reprojeto da mesa também foram realizadas simulações térmicas de elementos finitos em regime transiente, utilizando o software NX Siemens 12, para avaliação das modificações propostas. Os resultados obtidos pelas análises serviram de orientação a definição da configuração final da mesa para posterior elaboração do projeto final detalhado, fabricação e montagem.

A Figura 20 mostra detalhes da malha do modelo após a concepção de modificações da mesa original. A malha do modelo foi mapeada com elementos do tipo casca (quadriláteros 4 nós) e elementos sólidos (hexaédricos 8 nós) totalizando 202.189 elementos. Nessa simulação, foram modelados regimes transientes com controle e sem controle.

Figura 20 – Modelagem da mesa em malha.



Fonte: Autoria própria.

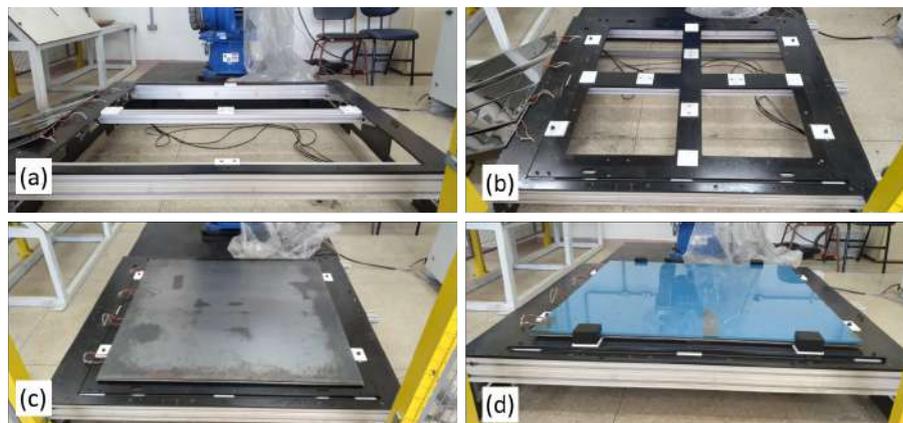
Após a construção da malha, as propriedades térmicas foram atribuídas para os diferentes materiais que compõem o modelo. Como condições de contorno foram aplicados acoplamentos térmicos em todas as superfícies de contato e também se considerou a convecção das superfícies expostas com o ambiente externo.

Já o carregamento do modelo corresponde a potência térmica de 2000 W dissipada por cada uma das 4 mantas de aquecimento. Esta potência foi aplicada duas formas distintas nas análises transientes. A primeira (denominada de caso sem controle) considera a potência máxima durante todo o tempo de análise. Já a segunda maneira (denominada de caso com controle) considera a potência aplicada com a atuação de um controle térmico do tipo ON/OFF em dois patamares de interesse, 50°C e 90°C.

### 3.3 TESTES DE AQUECIMENTO E MONTAGEM DA MESA

A montagem da mesa foi realizada com base nos resultados das análises das simulações térmicas, que confirmaram a eficácia das modificações realizadas na mesa para minimizar os efeitos de dilatação da estrutura e garantir as temperaturas desejadas na superfície de impressão. Em seguida, foi iniciado o processo de aquisição de materiais e fabricação, seguindo as etapas estabelecidas: a) aplicação da primeira camada de isolantes térmicos, b) aplicação da segunda camada de isolantes térmicos, c) montagem do "sanduíche" e, por fim, d) fixação da mesa, conforme ilustrado na Figura 21

Figura 21 – Montagem da mesa.



Fonte: Autoria própria.

Após a conclusão da montagem da mesa, foram realizados testes preliminares de aquecimento para mapear as temperaturas obtidas sobre a plataforma de impressão e avaliar a sua estabilidade dimensional. Nesta etapa, foram utilizados os seguintes recursos:

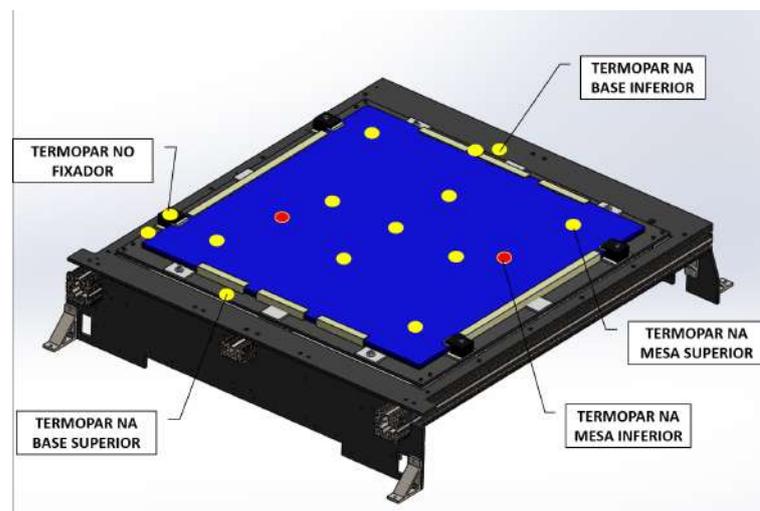
- Câmera térmica: Monitorar e registrar a temperatura da mesa.
- Sistema de aquisição de temperatura: Responsável por gerenciar a potência e o perfil de aquecimento da mesa, também irá auxiliar no monitoramento e registro das temperaturas em diferentes pontos da mesa durante o aquecimento.
- Termopares: Sensores de temperatura do tipo J e K, posicionados estrategicamente em pontos-chave da estrutura e da superfície de impressão.

- Software de análise de dados: Utilizado para coletar e interpretar os resultados dos testes, fornecendo informações sobre a distribuição térmica e a estabilidade dimensional da mesa.

Esses recursos permitiram avaliar o desempenho da mesa após as modificações e verificar se as temperaturas desejadas foram alcançadas de forma precisa e uniforme em toda a superfície de impressão. Além disso, foram realizadas medições para verificar se as alterações promovidas garantiam a estabilidade da estrutura da mesa durante o processo de aquecimento e impressão. Esses testes preliminares foram fundamentais para validar as melhorias implementadas no projeto da mesa e assegurar a qualidade e precisão das futuras impressões.

As modificações e adaptações realizadas na mesa de aquecimento incluíram a instalação de um total de 16 termopares para monitorar com precisão a temperatura tanto da estrutura quanto da região de impressão. Dois termopares do tipo K foram posicionados na parte inferior do "sanduíche" da mesa, enquanto os demais termopares do tipo K foram estrategicamente distribuídos em diferentes pontos da estrutura da mesa e na parte superior do "sanduíche", conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Estratégia de posicionamento dos termopares.



Fonte: Autoria própria.

Para conduzir o teste preliminar de aquecimento da mesa, foi utilizado uma câmera térmica do modelo Hti@ HT-175, que possui uma resolução de 32x32 pixels, Figura 23. A câmera térmica auxiliou na captura das variações de temperatura na superfície da mesa durante o processo de aquecimento. As imagens térmicas capturada foi posteriormente analisadas e permitiu uma avaliação detalhada dos gradientes de temperatura e padrões de aquecimento ao longo da área da mesa. Essa abordagem possibilitou uma compreensão mais precisa da distribuição térmica durante o teste.

Para aquisição e leitura das temperaturas da mesa de impressão, foi empregado um módulo de aquisição da marca National Instruments cDAQ-9178, Figura 24, o módulo é um

Figura 23 – Câmera térmica Hti HT-175.



Fonte: Autoria própria.

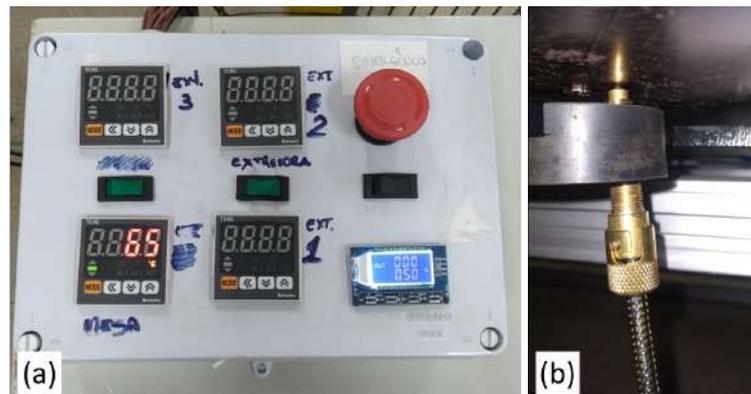
chassis USB CompactDAQ concebido para sistemas de medição de sensores pequenos e portáteis, no qual todos os termopares tipo K foram conectados. Além disso, foi utilizado um painel elétrico já existente visto na Figura 25 a), que conta com controladores de temperatura e um gerador de frequências PWM para configuração das temperaturas desejadas tanto da mesa de aquecimento quanto das três zonas do bico extrusor.

Um termopar do tipo J foi acoplado na parte inferior do "sanduíche" da mesa e também conectado ao sistema conforme a Figura 25 b), que tem como finalidade fazer o acionamento da mantas para o aquecimento da mesa, o controlador foi programado para que quando a temperatura de set point inserido no painel for inferior a 2°C da referência o sistema aciona a resistência para o aquecimento da mesa, o mesmo acontece o desligamento das mantas quando o controlador for superior a 2°C da medida de set point.

Figura 24 – Módulo de aquisição *National Instruments*.

Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – (a) Painel de controle de aquisição temperatura, (b) Termopar do J.

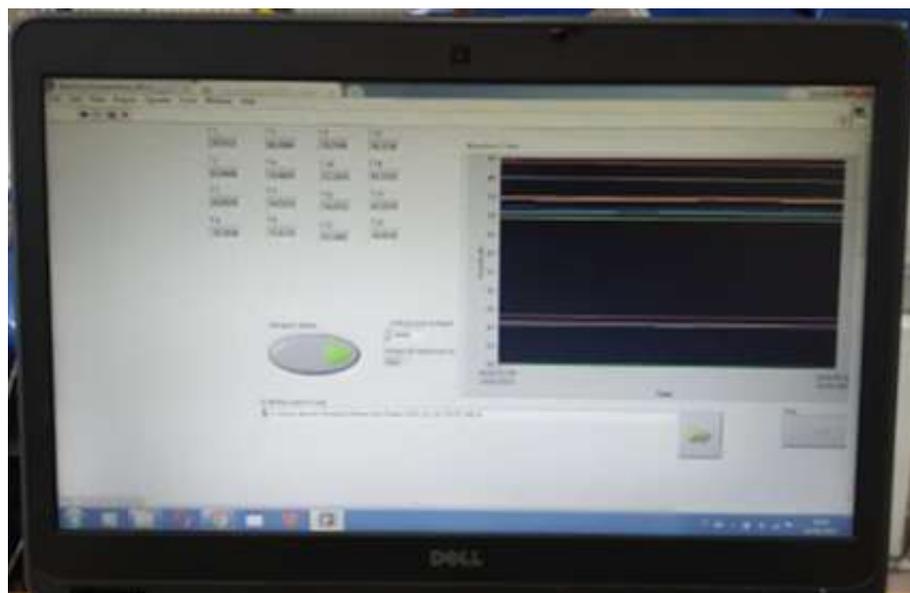


Fonte: Autoria própria.

Para a leitura em tempo real das temperaturas da mesa, o módulo de aquisição foi conectado a um laptop. Utilizou-se o software LabView para obter os valores de temperatura e gerar as curvas correspondentes no gráfico, Figura 26. Após essa etapa, os dados foram coletados para análise e posterior utilização nas avaliações necessárias.

O uso do software LabView permite uma leitura precisa das temperaturas em tempo real, bem como a visualização das curvas de variação ao longo do processo de aquecimento. Essa abordagem proporcionou informações valiosas para a validação das temperaturas desejadas na superfície de impressão e também para o monitoramento de qualquer distorção decorrente do processo de aquecimento da mesa.

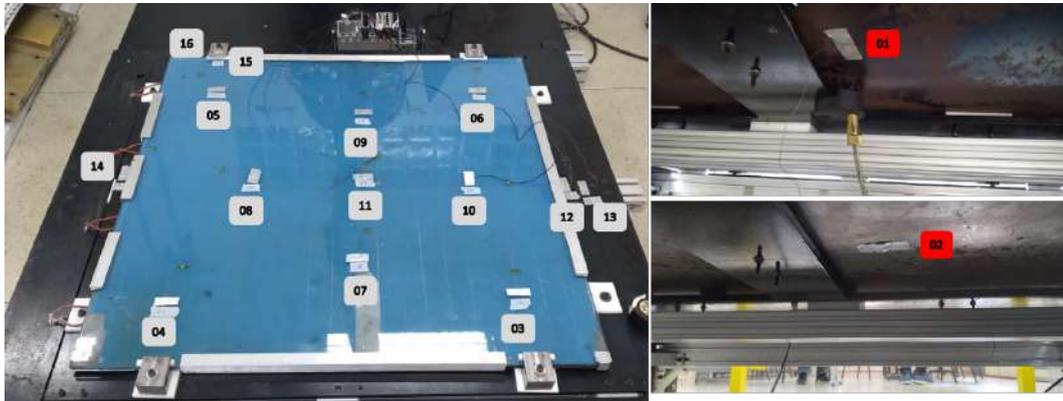
Figura 26 – Leitura das temperaturas em tempo real no LabView.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 apresenta a montagem final da mesa com os termopares posicionados.

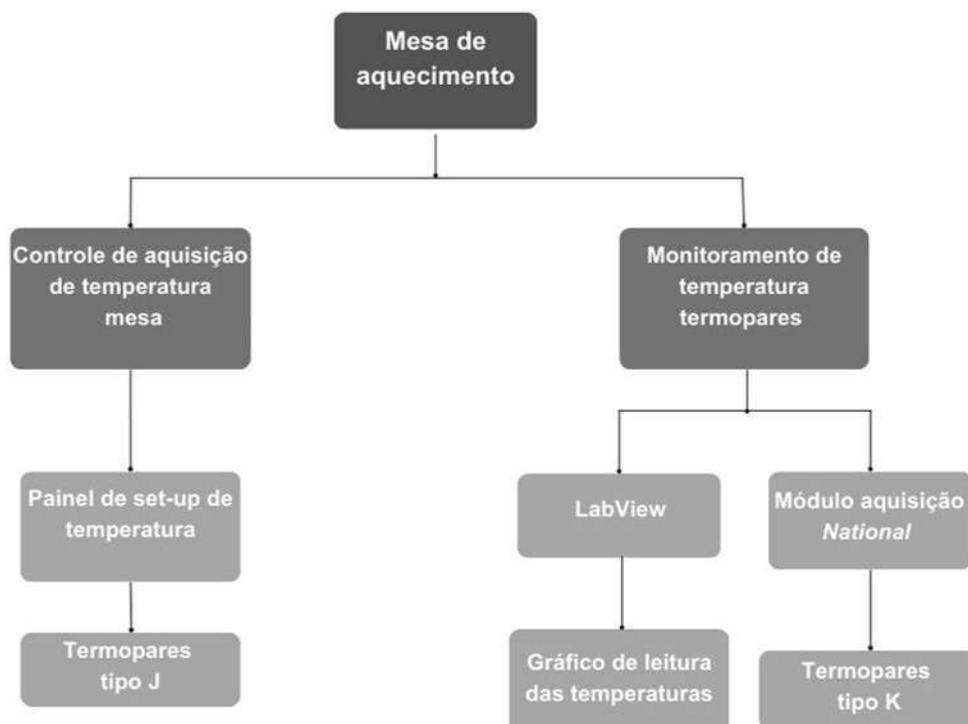
Figura 27 – Termopares posicionados na mesa de impressão.



Fonte: Autoria própria.

Para compreender o funcionamento dos sistemas de aquisição de temperatura e monitoramento de temperaturas, foi desenvolvido um diagrama de blocos que explica o sistema, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama de blocos do sistema de aquecimento e monitoramento da mesa.



Fonte: Autoria própria.

Essas soluções permitiram uma coleta precisa e eficiente das temperaturas da mesa durante o processo de impressão, possibilitando uma análise detalhada das variações térmicas e contribuindo para a validação das modificações realizadas na mesa.

### 3.4 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a finalização da montagem, testes e ajustes da mesa, um conjunto de nove corpos de prova em ABS foram impressos em três patamares distintos de temperatura da mesa. O ABS possui a sua temperatura de transição vítrea elevada de 100°C e nesta fase o ABS começa a amolecer por volta dos 100°C, para isso foi estabelecido duas faixas de temperatura abaixo da temperatura recomendada pelo fabricante e uma temperatura ideal indicada para impressão do ABS conforme apresentado na Tabela 5. Os corpos de prova foi posteriormente submetidos a uma inspeção dimensional, avaliação do acabamento superficial e testes de resistência mecânica.

Tabela 5 – Patamares de temperaturas da mesa.

<b>Amostras</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Unidade</b>
A, B e C	70	°C
D, E e F	90	°C
G, H e I	110	°C

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

No experimento, utilizou-se material polimérico no formato de grãos (*pellets*), mais especificamente a resina de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) do fabricante SABIC, chamada Resina Cicolac MG94 (MG94, 2022). Essa resina foi especialmente projetada para ser processada por técnicas de injeção e extrusão.

A resina ABS Cicolac MG94 possui alta resistência à fadiga e requer uma temperatura de impressão entre 205 e 245°C. As propriedades mecânicas desse material, conforme fornecidas pelo próprio fabricante, estão disponíveis na Tabela 6. Essas propriedades serão essenciais para avaliar a adequação do material no contexto do processo de impressão 3D em questão.

O uso do ABS nesse experimento proporcionou uma base sólida para a análise das características do material e seu desempenho nas peças produzidas pelo processo FDM.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do ABS.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Limite de escoamento	46	MPa
Resistência à tração ruptura	35	MPa
Módulo de tração	2480	MPa
Alongamento de tração	2	%
Resistência à flexão	79	MPa
Módulo à flexão	2620	MPa

Fonte: Adaptado de SABIC,2019.

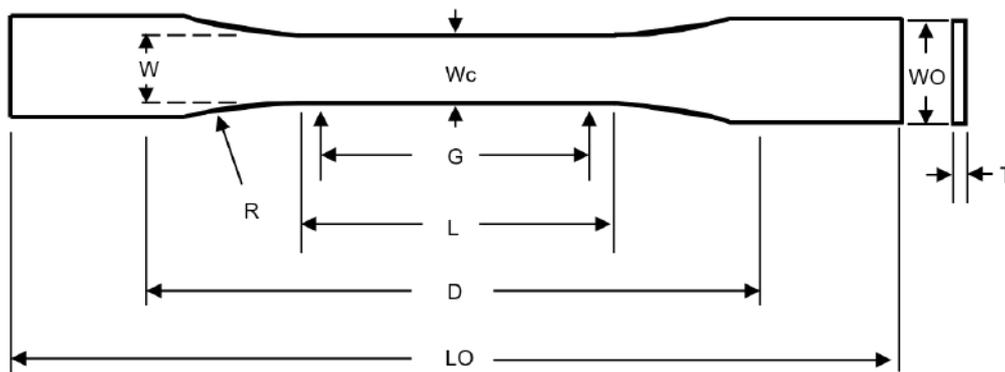
### 3.4.1 Configurações de impressão

Para o setup de impressão foi adotado a velocidade de extrusão 30 rpm e frequência 2000 Hz. A velocidade da rosca e temperatura dos bicos são setadas diretamente no controlador do painel de controle da extrusora. Ao rodar setup de extrusão em sua respectiva rotação, foi adotado os seguintes respectivos valores de temperatura no bico da extrusora:

- Temperatura da Zona 1 - 220°C;
- Temperatura da Zona 2 - 210°C;
- Temperatura da Zona 3 - 200°C.

As dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração foram baseadas na norma ASTM (2014) e são ilustradas na Figura 29 com seus respectivos valores dados na Tabela 7.

Figura 29 – Dimensões para o ensaio de tração, segundo a Norma ASTM D638.



Fonte: Adaptado da Norma ASTM D638.

Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova, segundo a Norma ASTM D638.

Dimensões	Valores (mm)
W	$13 \pm 0,5$
L	$57 \pm 0,5$
Wo	$19 \pm 3,18$
Lo	165
G	$50 \pm 0,25$
D	$115 \pm 0,5$
R	$76 \pm 0,1$
T	$12 \pm 0,4$

Fonte: Adaptado da Norma ASTM D638.

Um resumo dos parâmetros de impressão utilizados para a fabricação dos corpos de prova em ABS é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de impressão.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>
Altura da camada	1,2	mm
Velocidade	15	mm/s
Largura de extrusão	2,83	mm
Preenchimento	100	%
Ângulo raster	45	°
Diâmetro do bico	1,75	mm
Número de camadas	10	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A secagem dos pellets de ABS foi conduzida em uma estufa pelo período de 60 minutos á 90°C, conforme recomendado pelo fabricante como o tempo mínimo adequado.

### 3.5 TESTE DE QUALIDADE DIMENSIONAL

O método para análise dimensional é uma abordagem que permite avaliar a geometria e as dimensões de uma peça em um processo de fabricação. Geralmente, envolve a medição precisa de características específicas da peça, como altura, largura e espessura, utilizando instrumentos de medição adequados, como o paquímetro. O paquímetro é dos instrumentos mais usados na indústria metal-mecânica desde seus primórdios. É comumente usado para medir dimensões internas, externas, de profundidade, distâncias entre centros de furos, etc. Em geral, paquímetros são oferecidos com capacidade de 150, ou 200 mm, embora comprimentos de até 1 m possam ser encontrados no mercado. O mais comum é encontrar instrumentos com duas escalas, uma superior em polegadas (sistema inglês) e uma inferior em mm (sistema métrico).

A análise dimensional busca determinar se as dimensões da peça correspondem às especificações de projeto e se estão dentro das tolerâncias aceitáveis. Nesse etapa, são realizadas medições dimensionais nos corpos de prova, abrangendo parâmetros como altura, largura inferior e largura superior, conforme ilustrado na Figura30.

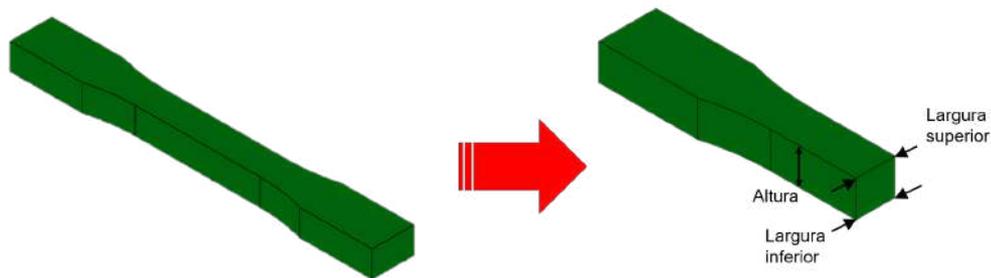
Para realização das medidas foi utilizado paquímetro universal permite medições, em sistema métrico, com resolução de até 0,02 mm.

Os resultados dessa análise podem fornecer informações sobre a qualidade da peça e podem ser usados para tomar decisões em relação ao processo de fabricação ou à necessidade de ajustes e melhorias.

### 3.6 TESTE DE QUALIDADE SUPERFICIAL

Os resultados referentes à rugosidade superficial são apresentados através dos valores de Ra, Rz e Rmax. O parâmetro Ra mensura o desvio médio aritmético do perfil medido em relação à linha central da extensão avaliada. Já o parâmetro Rz corresponde à média das

Figura 30 – Regiões de análise dimensional.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

distâncias entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo de cada seção de amostra (KOZIOR *et al.*, 2020). A profundidade máxima de rugosidade é identificada como  $R_{max}$ , representando a altura máxima entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do perfil de superfície (SREEDHAR; MATHIKUMAR; JOTHI, 2012).

Esses parâmetros são indicadores importantes para a avaliação da textura e acabamento das superfícies analisadas.

### 3.6.1 Microscópio 3D

A topografia da superfície das amostras foi analisada por meio do microscópio Alicona Infinite Focus SL, disponível no Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Esse equipamento é um sistema de medição 3D altamente preciso que utiliza sensores para realizar medições de rugosidade. O microscópio óptico da Alicona possui uma resolução vertical (eixo Z) de 20 nm, com uma lente de aumento de 50x e faixa nominal de medição de 50 mm, 50 mm e 155 mm para os eixos X, Y e Z, respectivamente, como mostra a Figura 31.

Para a obtenção dos resultados topográficos da rugosidade superficial, foram realizadas nove medições na direção vertical das superfícies dos corpos de prova. Durante as medições, uma lente de aumento de 50x foi utilizada, e a varredura com o feixe de luz foi feita o mais perpendicular possível. A área de varredura analisada foi de 6 mm nas coordenadas X e Y onde é representado na Figura 32. Para posicionar o corpo de prova no equipamento, foram utilizados dois eixos de referência perpendiculares entre si para garantir um melhor alinhamento e posicionamento.

Figura 31 – Microscópio confocal de varredura óptica Alicona Infinite Focus SL.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 32 – Direção das coordenadas x e y.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para realização dos teste foi necessário fazer algumas adaptações para realizar a medição da área selecionada do corpo de prova. Para isso, foi aplicada uma camada de pintura com tinta spray TEKBOND na cor grafite sem brilho no corpo de prova, Figura 33. Essa adaptação foi necessária devido a coloração padrão branca e brilhante do filamento, o que inviabilizava a varredura do microscópio.

A decisão de utilizar a tinta spray grafite sem brilho teve como justificativa a eliminação do reflexo da cor do filamento, que ocorria falhas na leitura do equipamento. Com a pintura aplicada, foi possível obter leituras mais precisas e confiáveis da topografia da superfície do corpo de prova, o que é crucial para a análise da rugosidade e outras características relevantes para o estudo. Essa adaptação permitiu que o experimento fosse conduzido de forma mais eficiente e com resultados mais consistentes.

Figura 33 – Corpo de prova com a superfície pintada.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 3.6.2 Rugosímetro

A medição da rugosidade superficial das amostras foi realizada por meio do Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300, um instrumento de medição de rugosidade móvel com impressora térmica integrada, Figura 34. O apalpador deslizante de raio de ponta de  $2\ \mu\text{m}$  possui um curso de medição de 1,75 mm até 17,5 mm com capacidade para  $350\ \mu\text{m}$ ,  $180\ \mu\text{m}$  e  $90\ \mu\text{m}$  e resolução de perfil em 8 nm, e o equipamento foi disponibilizado por meio de uma parceria com o SENAI de Mogi Guaçu-SP, que concedeu acesso ao Laboratório Técnico de Metrologia para a realização dessas medições.

O Rugosímetro Mahr Marsurf M300 é amplamente utilizado para medir a rugosidade de superfícies em diversos materiais, oferecendo precisão e confiabilidade nos resultados. Ele é capaz de fornecer informações detalhadas sobre as irregularidades e texturas das superfícies analisadas. Com o uso deste equipamento, foi possível realizar medições precisas da rugosidade superficial das amostras, proporcionando informações importantes sobre a qualidade do acabamento e a textura das peças produzidas pelo processo de fabricação. Os dados obtidos através do Rugosímetro foram essenciais para a avaliação da qualidade das amostras e para a validação dos resultados obtidos em outras etapas do estudo.

Figura 34 – Rugosímetro portátil MAHR.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

As medições de rugosidade Ra, Rz e R<sub>máx</sub> foram realizadas em cada sequência de corpos de prova, de acordo com os diferentes patamares de temperatura utilizados durante a impressão. Para a avaliação da rugosidade, foi empregado um comprimento de avaliação (Lt) de 1,75 mm e um raio de ponta de 2  $\mu\text{m}$ .

É importante destacar que as medições de rugosidade foram realizadas na direção longitudinal de uma camada do filamento, como ilustrado na Figura 35

Figura 35 – Medição da rugosidade do corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 3.7 TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O dimensionamento e a geometria das amostras utilizadas nesse ensaio seguiram uma norma ASTM D638-14 para ensaios de tração, que visou assegurar que os resultados fossem consistentes e comparáveis. A seção transversal das amostras pode variar dependendo da geometria do material em questão, podendo ser retangular ou circular. Além disso, os procedimentos do ensaio estão em conformidade com as normas estabelecidas para garantir a precisão e a consistência dos resultados.

Em um ensaio de tração uniaxial, a amostra de teste é submetida a uma força de tração controlada ao longo de um único eixo, até que ocorra a sua ruptura. O principal objetivo desse tipo de ensaio é realizar uma caracterização das propriedades mecânicas do material em questão.

São obtidos os parâmetros da força aplicada e o deslocamento da amostra em um ensaio de tração. Com base apenas nesses parâmetros, é possível determinar várias propriedades mecânicas importantes como a curva de tensão e deformação. A tensão é definida como a carga

de tração aplicada dividida pela área da seção transversal original mínima do corpo de prova, dentro dos limites de medição, em um determinado momento. Essa medida é expressa em termos de força por unidade de área, comumente em megapascals. A deformação é a relação entre o alongamento (ou encurtamento) e o comprimento original de um corpo de prova. Em termos simples, é a mudança no comprimento dividida pelo comprimento original e é expressa como uma razão adimensional ASTM (2014).

As propriedades mecânicas das amostras foram determinadas por meio do ensaio de tração, que foi conduzido no Laboratório de Tribologia e Compósitos (LTC) da USP de São Carlos, utilizando um equipamento universal da MTS®, modelo Bionix 662 20H-04, com capacidade de carga axial de 15 KN, conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Equipamento de ensaio de tração MTS®.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Todas as etapas dos ensaios seguiram as diretrizes da norma ASTM D638-14, e a velocidade de ensaio adotada foi de 5 mm/min. Os parâmetros de entrada para o ensaio de tração na máquina foram utilizados os seguintes dados da Tabela 9:

Os ensaios de tração foram conduzidos em temperatura ambiente. A Figura 37 mostra um corpo de prova ABS sendo submetido ao ensaio de tração no equipamento universal da MTS®. Durante os ensaios, os valores da força aplicada e do tempo foram registrados por meio de um software específico também da empresa MTS®, conforme ilustrado na Figura 38.

A partir dos dados de carga e alongamento obtidos durante o ensaio, foram calculados os valores da tensão, deformação e módulo de elasticidade dos corpos de prova. Para garantir a precisão das medidas, as dimensões dos corpos de prova, como largura, espessura e comprimento,

Tabela 9 – Parâmetros de entrada ensaio de tração.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>
Velocidade inicial	5	mm/nin
Ponto final de extensão	40	mm
Espessura	12	mm
Taxa de dados	4	Hz
Largura	13,5	mm
Velocidade secundária	10	mm/min
Comprimento inicial do CDP	57	mm

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

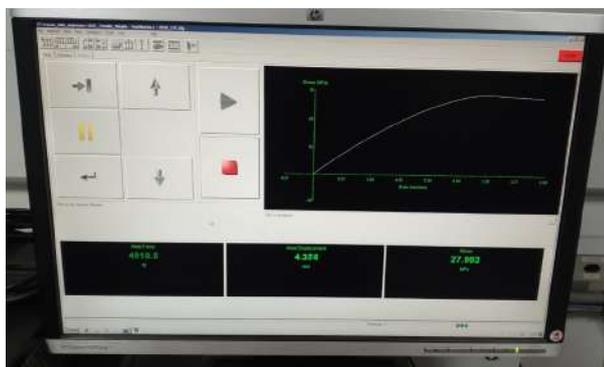
foram cuidadosamente medidas utilizando um paquímetro de alta precisão com resolução de 0,05 mm. Essa atenção aos detalhes foi fundamental para obter resultados confiáveis e consistentes durante os ensaios de tração.

Figura 37 – Teste de tração.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 38 – Interface do software em execução da curva de tensão x deformação.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados e discussões obtidos pelo desenvolvimento do trabalho.

### 4.1 ANÁLISE TÉRMICA MEF

Os resultados obtidos pelas análises térmicas realizadas durante o reprojeto da mesa são apresentados a seguir. Os gradientes de temperatura da mesa de impressão e estrutura foram obtidos para três situações de regime transiente: setpoint de 50°C, setpoint de 90°C e transiente com potência máxima.

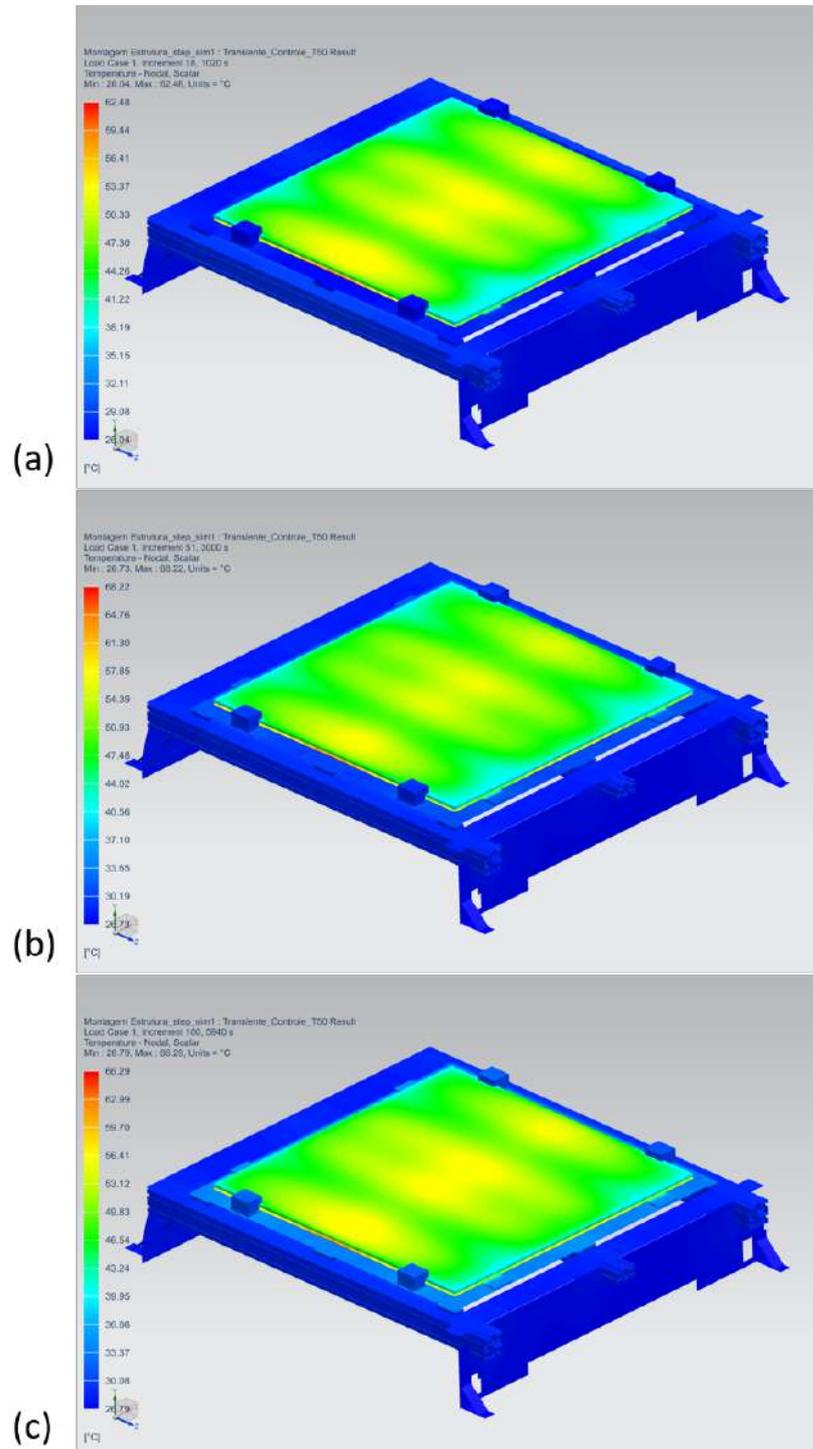
#### 4.1.1 Regime com controle 50°C

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o caso com controle térmico na faixa de temperatura de 50°C. A análise considerou o tempo total de 100 minutos para a simulação, porém com a potência sendo dissipada com base em um controle PID para garantir a temperatura da superfície em 50°C.

A evolução de temperatura deste caso é apresentada na Figura 39 correspondentes aos instantes de 10 min, 50 min e 100 min, respectivamente. Neste caso, os resultados indicam que as camadas de isolamento garantem que a estrutura não sofra com o aquecimento e que a potência instalada é suficiente para garantir a temperatura de interesse sobre a superfície de impressão. Neste caso, os resultados indicam que as camadas de isolamento garantem que a estrutura não sofra com o aquecimento e que a potência instalada é suficiente para garantir a temperatura de interesse sobre a superfície de impressão.

A atuação do controle ativo pode ser verificada nas Figuras 40 e 41 a qual mostra 5 pontos localizados sobre a superfície de impressão e a evolução de temperatura ao longo do tempo em diferentes pontos. Pode-se observar a região central da mesa no ponto E a temperatura de 50 °C é atingida após 20 minutos de operação e permanece atuante para manter a temperatura no set point especificado de 50°C. O pontos medidos na extremidade da mesa não chegaram a temperatura desejada mas é possível notar clara tendência de aumento da temperatura. Vale observar que a temperatura da estrutura da mesa observado na Figura 40 apresentou valores de temperatura em aproximadamente 32°C.

Figura 39 – Gradiente de temperatura no regime de 50°C em (a) 10 min, (b) 50 min e (c) 100 min.

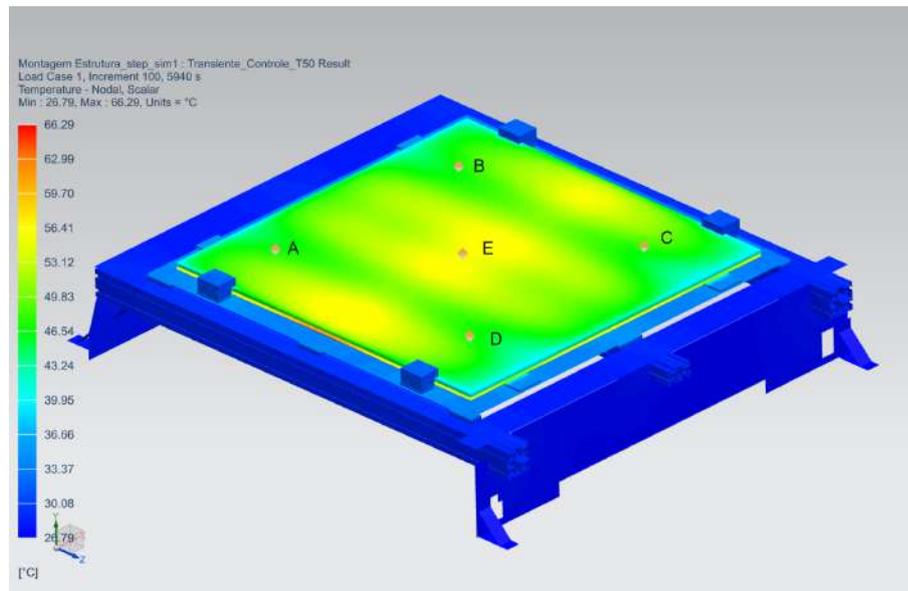


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

#### 4.1.2 Regime com controle 90°C

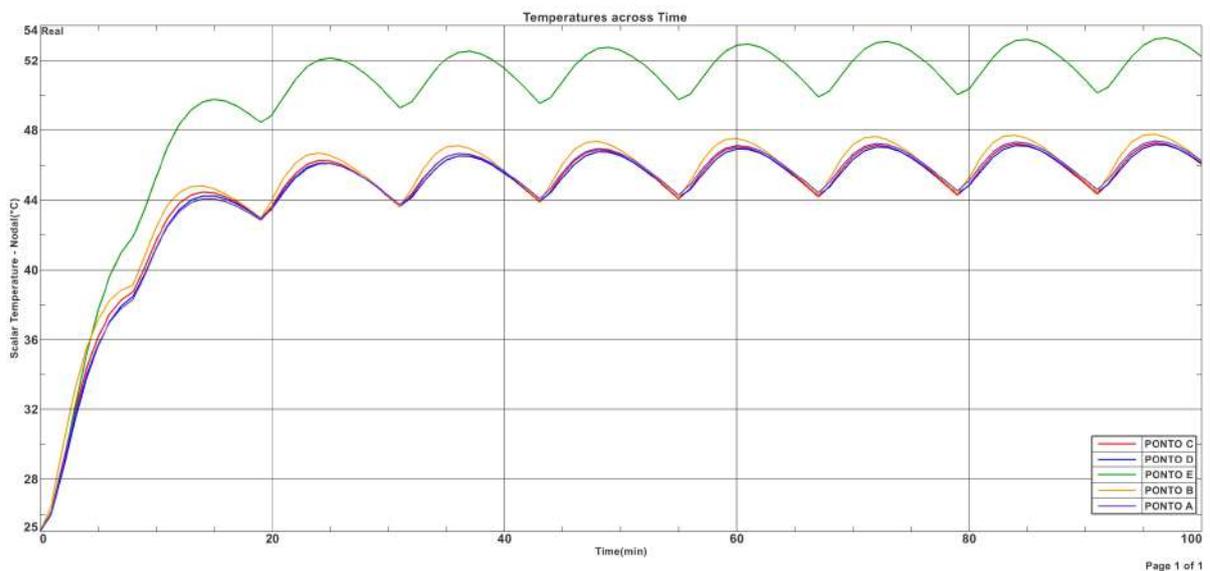
A seguir são apresentados os resultados obtidos para o caso com controle térmico na faixa de temperatura de 90°C. A análise considerou o mesmo tempo total de 100 minutos para a

Figura 40 – Distribuição dos pontos para o regime de 50°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 41 – Gráfico de aquecimento da mesa para o caso com controle em 50°C.

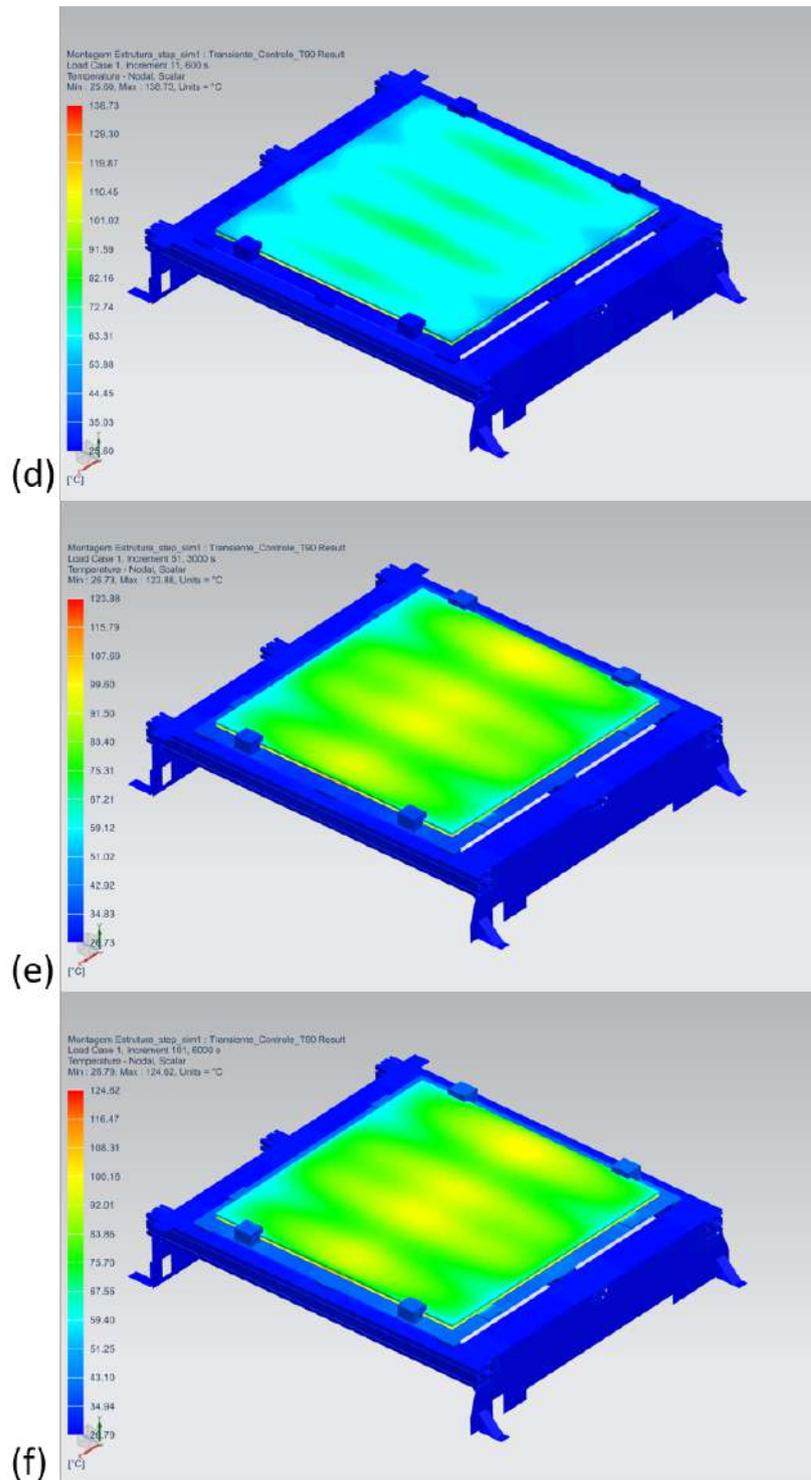


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

simulação. A evolução de temperatura deste caso é apresentada na Figura 42 correspondentes aos instantes de 10 min, 50 min e 100 min, respectivamente. Neste caso, os resultados indicam ainda que as camadas de isolamento garantem que a estrutura que não sofra durante a operação garantindo a temperatura de interesse sobre a superfície de impressão.

A eficácia do controle ativo pode ser observada nas Figuras 43 e 44, que ilustram os pontos de medição na superfície de impressão e a evolução da temperatura ao longo do tempo em diferentes localizações. O ponto J localizado no centro da mesa, demonstra uma clara tendência

Figura 42 – Gradiente de temperatura no regime de 90°C em 10 min, 50 min e 100 min.



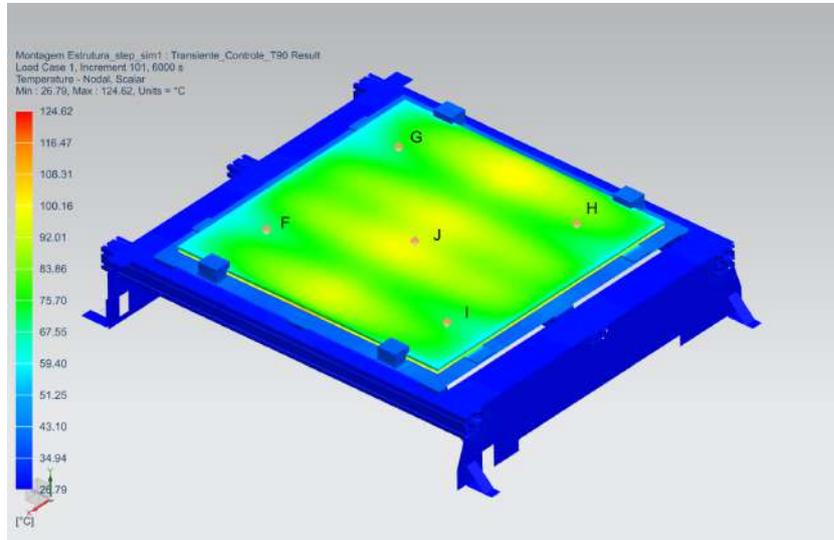
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

de atingir a temperatura alvo de 90°C em cerca de 100 minutos de operação.

Além disso, é possível observar na Figura 43 que a temperatura da estrutura da mesa se estabiliza em torno de 45°C. Isso sugere que o sistema de controle ativo está efetivamente

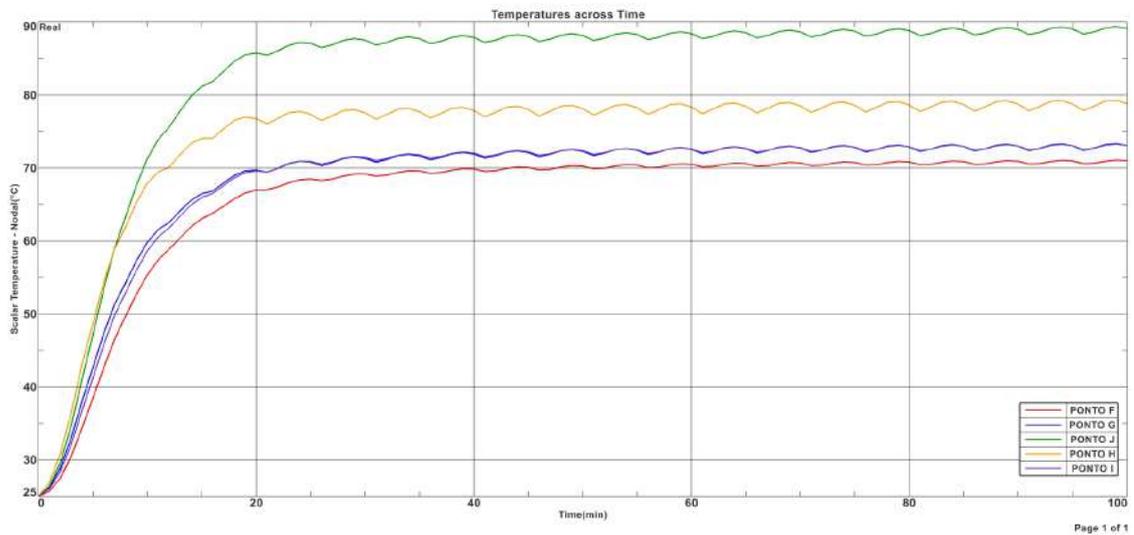
mantendo a temperatura da superfície de impressão em um nível desejado, apesar das variações observadas em diferentes pontos.

Figura 43 – Distribuição dos pontos para o regime de 90°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 44 – Gráfico de aquecimento da mesa para o caso com controle em 90°C.

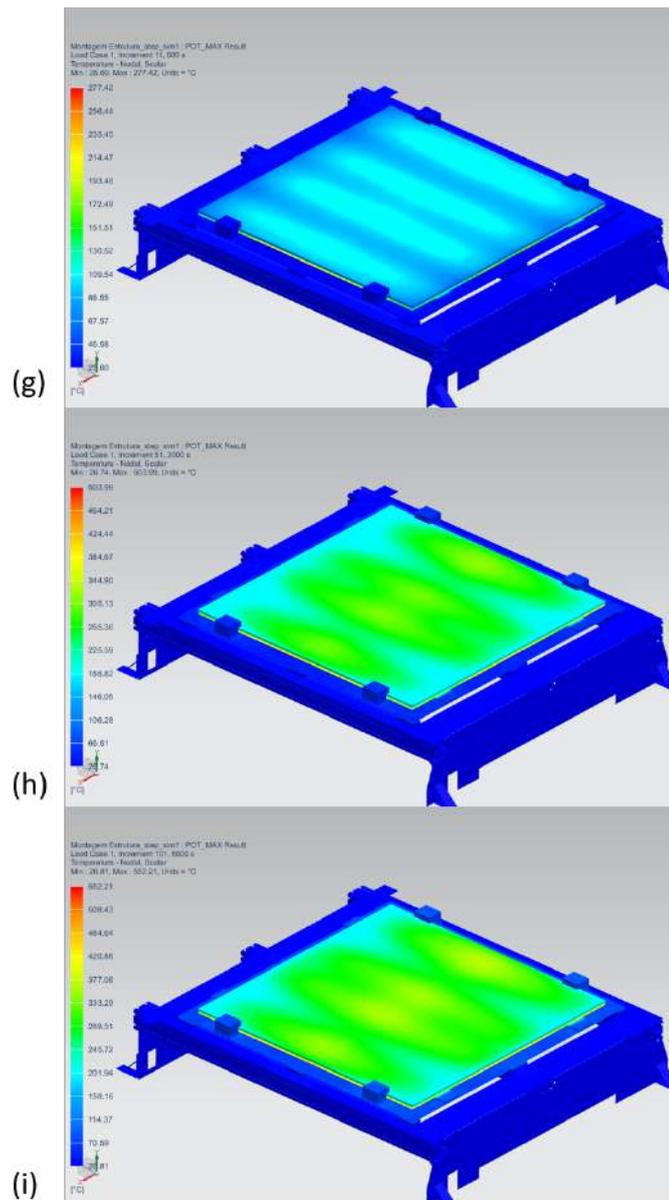


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 4.1.3 Regime sem controle

Na análise em regime transiente com potência máxima (caso sem controle) foi avaliado o aquecimento em diferentes pontos da mesa ao longo do tempo por um período de 100 minutos. Esta análise permitiu avaliar a estrutura da mesa em condições mais severas de temperatura indicando que os isoladores térmicos são capazes de evitar dilatações oriundas dos gradientes térmicos.

Figura 45 – Distribuição de temperatura do caso sem controle em 10 min, 50 min e 100min.



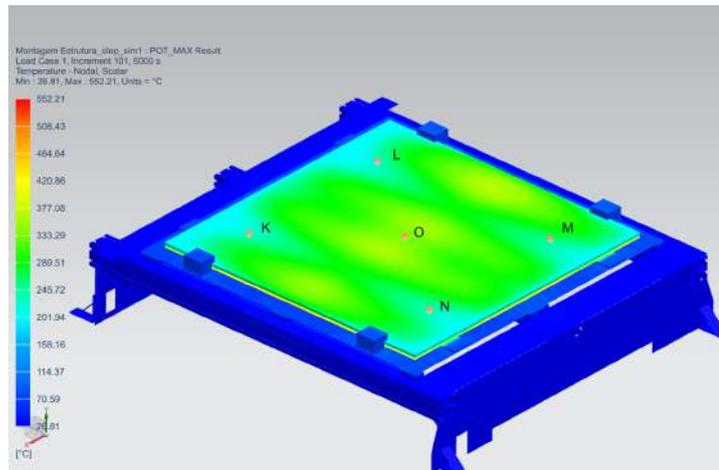
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A evolução de temperatura deste caso pode ser observada na Figura 45 correspondentes aos instantes de 10 min, 50 min e 100 min, respectivamente. Os resultados indicam temperaturas de aproximadamente 328°C na região central superfície de impressão e indicam que os isoladores

são eficientes no isolamento das camadas mantendo a estrutura em temperaturas inferiores a 80°C. Outro ponto verificado é que, durante os 100 minutos com aplicação de potência máxima, as camadas de isolamento de POM e PTFE não devem atingir suas temperaturas limites de operação de 170°C e 327°C, respectivamente.

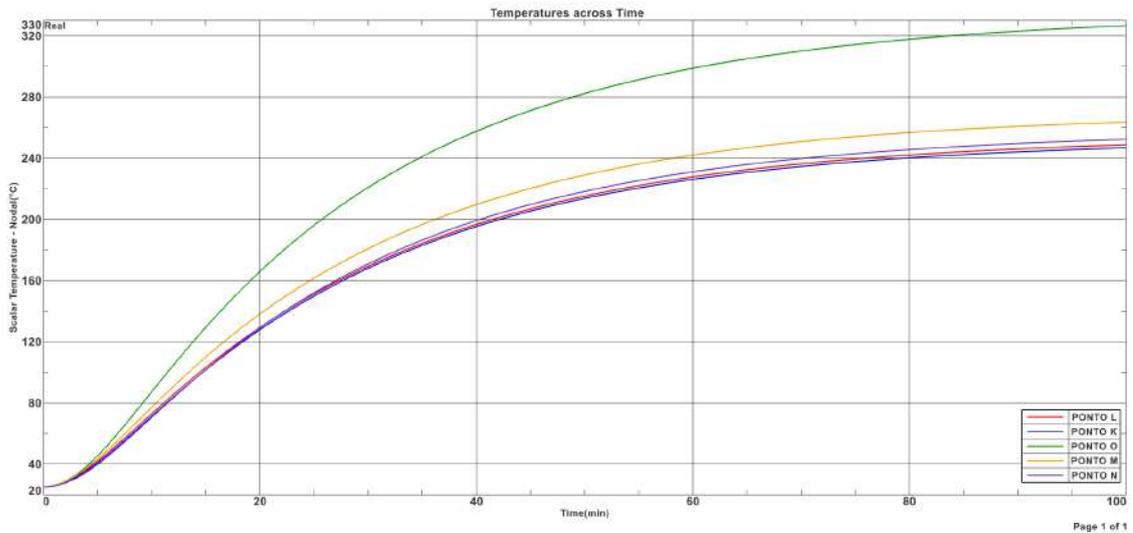
As Figuras 46 e 47 mostram 5 pontos localizados sobre a superfície de impressão da mesa e a evolução de temperatura destes diferentes pontos durante o período de aquecimento com potência máxima.

Figura 46 – Distribuição dos pontos para o caso sem controle.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 47 – Gráfico de aquecimento da mesa para o caso sem controle.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 4.2 TESTES DE AQUECIMENTO

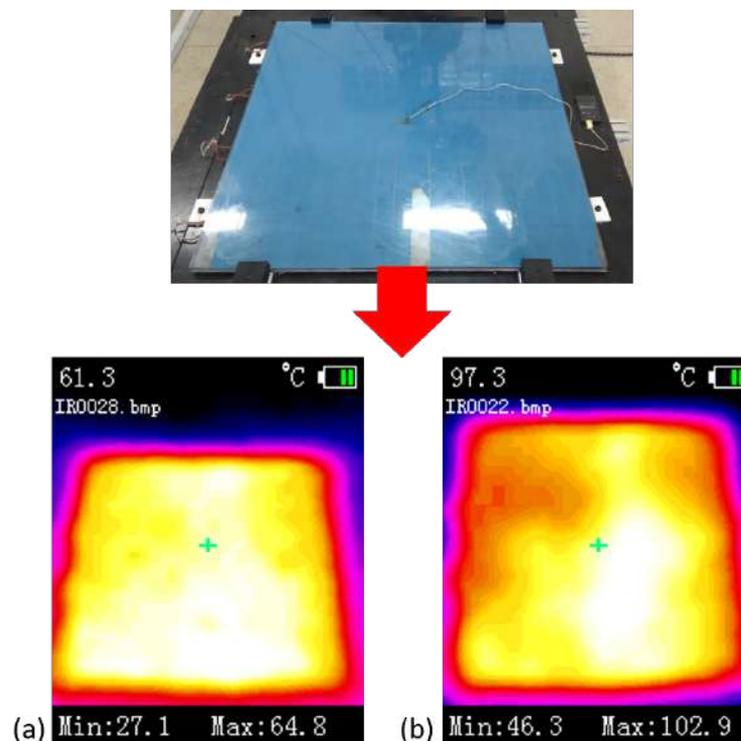
Durante o reprojeto da mesa foram realizados diversos testes de aquecimento do conjunto e suas respectivas medições de temperaturas.

Essas medições de temperatura foram essenciais para validar as modificações implementadas na mesa, especialmente os isoladores térmicos, e assegurar que o aquecimento fosse direcionado exclusivamente para a região de impressão, sem interferir na estrutura e evitar distorções devido às altas temperaturas.

### 4.2.1 Teste preliminar

Este teste foi realizado durante as etapas iniciais de reprojeto da mesa e teve como objetivo avaliar se o subconjunto de aquecimento seria capaz de aquecer a superfície de impressão. Para tal, foi utilizada uma câmera térmica que capturou imagens durante o processo de aquecimento que foi executado com auxílio de apenas 2 das 4 mantas térmicas (totalizando assim 4000 W de potência). A Figura 48 apresenta os resultados obtidos por meio da câmera térmica proporcionou uma visualização detalhada das variações de temperatura ao longo da superfície da mesa durante o teste preliminar de aquecimento. A análise das imagens térmicas revelou padrões de aquecimento uniformes e consistentes, com gradientes de temperatura bem controlados nas diferentes regiões da mesa.

Figura 48 – Teste de aquecimento da mesa com a câmera térmica.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A análise térmica proporcionada pela câmera permitiu uma avaliação qualitativa das características de aquecimento da mesa com apenas duas mantas térmicas, o que contribuiu significativamente para a validação das modificações implementadas.

#### 4.2.2 Teste final

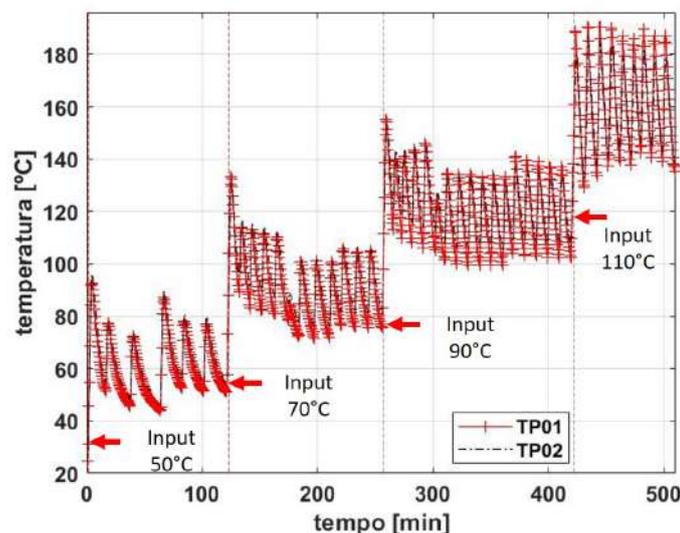
No teste final de aquecimento da mesa, todas as quatro mantas foram ativadas para possibilitar uma análise mais abrangente dos dados obtidos durante os testes.

Os resultados do teste final de aquecimento da mesa apresentou dados eficazes para validação dos isoladores térmicos, demonstrando a capacidade de direcionar o calor de forma adequada e evitar transferências indesejadas para outras partes da estrutura. Observou-se também que o aquecimento foi distribuído de maneira uniforme e proporcional ao longo de toda a superfície da mesa.

Esses resultados são indicativos do sucesso das modificações implementadas no projeto da mesa, permitiu que o aquecimento seja direcionado especificamente para a região de impressão. A uniformidade na distribuição do calor é crucial para assegurar a qualidade do processo de impressão e a integridade das peças produzidas. Dessa forma, o teste final de aquecimento demonstrou a eficiência das alterações realizadas e a capacidade da mesa em atingir e manter as temperaturas desejadas de forma consistente e controlada.

A Figura 49 mostra a evolução de temperatura do termopar localizado na chapa inferior do subconjunto de aquecimento. O gráfico ilustra a oscilação da temperatura ocasionada pelo controle térmico do tipo ON-OFF das mantas de aquecimento e também apresenta os instantes de tempo em que são feitos os inputs das temperaturas de interesse no painel de controle.

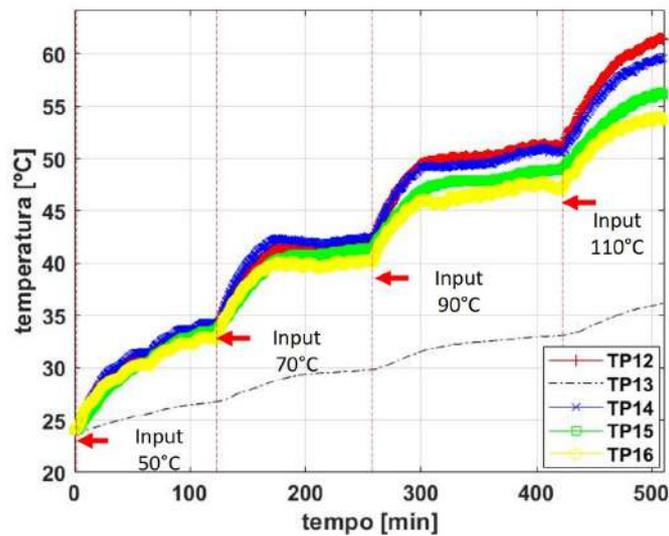
Figura 49 – Teste aquecimento chapa inferior da mesa.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A eficácia dos isoladores térmicos é claramente demonstrada na Figura 50. É notável que o termopar TP13, localizado na parte inferior da estrutura da mesa, exibe uma temperatura significativamente menor no gráfico em comparação com os outros termopares posicionados na parte superior da base. Isso claramente evidencia a eficácia dos isoladores térmicos na primeira camada da estrutura. O gráfico também apresenta os instantes de tempo em que são feitos os inputs das temperaturas de interesse no painel de controle.

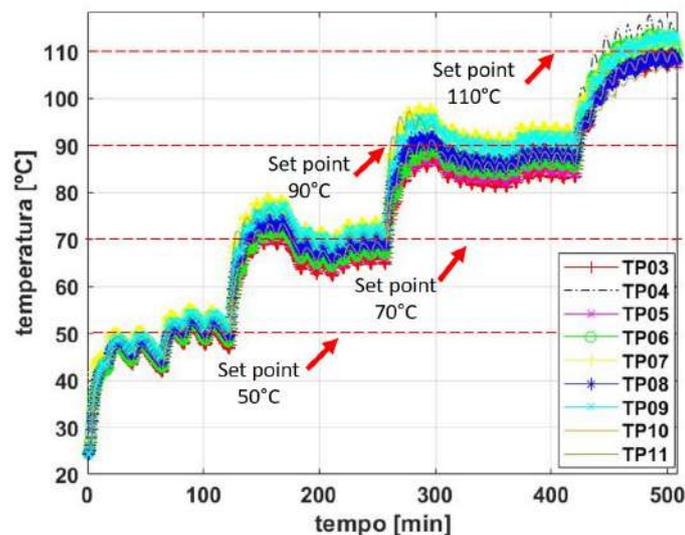
Figura 50 – Teste aquecimento da estrutura da mesa.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 51 ilustra as temperaturas dos termopares localizados sobre a superfície de impressão do vidro. É possível notar que os patamares de temperatura adotados para o teste de aquecimento são alcançados de acordo com set point de temperatura de interesse. Outro aspecto refere-se ao gradiente espacial de temperatura sobre a superfície de impressão. Tal fato pode ser explicado pela irregularidade de contato entre as chapas de aço e as mantas de aquecimento e também pela limitação de pontos de controle de temperatura. No sistema atual é utilizado apenas um ponto de controle para as quatro mantas de aquecimento.

Figura 51 – Teste aquecimento do "sanduíche" da mesa.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 4.3 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.

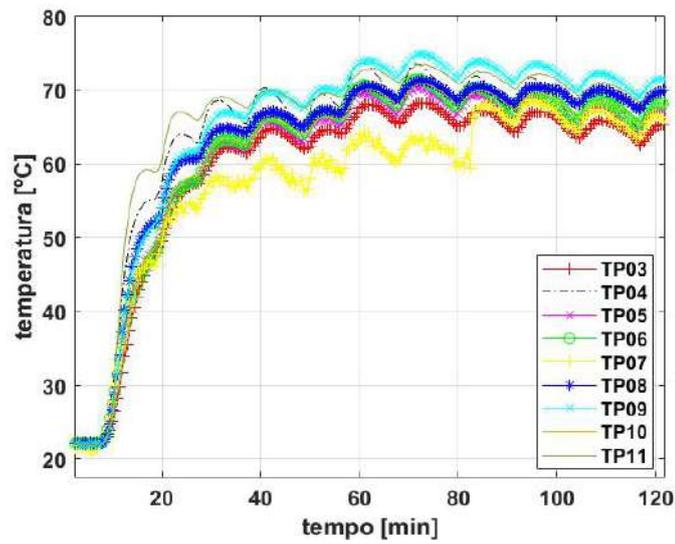
A medição das temperaturas nos patamares estabelecidos na impressão das amostras foi utilizada para avaliar efeito da temperatura do leito de impressão na impressão das camadas das amostras.

A mesa de impressão foi aquecida gradualmente até atingir a temperatura alvo de 70°C. Após a estabilização da temperatura, foram realizadas três impressões de amostras utilizando o material ABS. A Figura 52 apresenta curva de aquecimento das temperaturas medidas pelos termopares posicionados sobre a plataforma de impressão. O termopar TP07 apresentou valores divergentes devido a uma falha do termopar que se despreendeu da mesa, quando observado a falha foi realizado o ajuste do contato da colagem com mesa.

A Figura 53 apresenta as amostras impressas.

Logo após a conclusão da impressão, foi observado que as amostras produzidas sob o patamar de aquecimento de 70°C apresentaram defeitos de empenamento, como pode ser visto na Figura 54.

Figura 52 – Patamar 70°C.



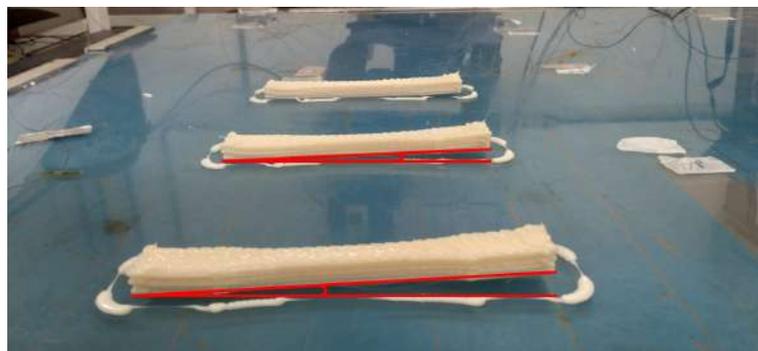
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 53 – Corpos de provas impressos no patamar de 70°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 54 – Empenamento dos corpos de prova no patamar de 70°C

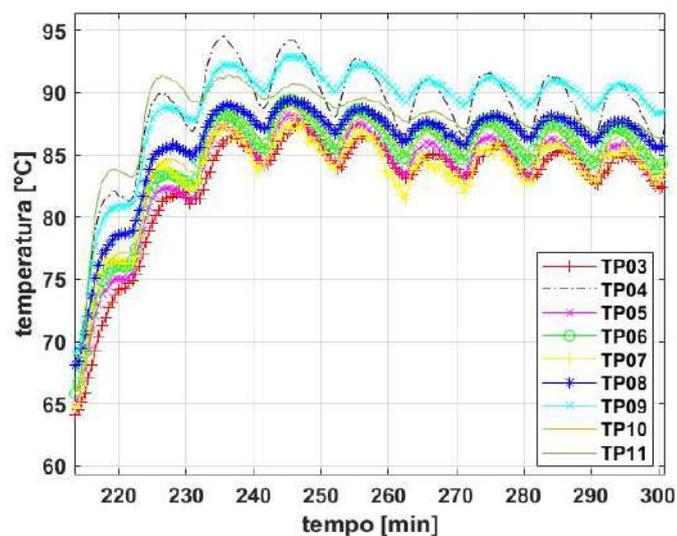


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Considerando as diversas aplicações potenciais da impressão em larga escala, é altamente vantajoso produzir peças utilizando o processo FPM com mínima deformação. Em particular, devido ao fato de que muitas impressoras de grande porte não incorporam um controle térmico ativo para todo o volume de construção, as peças fabricadas por meio do processo FPM frequentemente manifestam deformações significativas, representando um desafio substancial (YU *et al.*, 2021).

Na sequência, a mesa de impressão foi aquecida novamente até atingir a temperatura alvo de 90°C. Após a estabilização da temperatura, foram realizadas a impressão três novas amostras. A Figura 55 apresenta curva de aquecimento das temperaturas medidas pelos termopares posicionados sobre a plataforma de impressão. O termopar TP07 apresentou valores divergentes devido a uma falha do termopar que se despreendeu da mesa, quando observado a falha foi realizado o ajuste do contato da colagem com mesa.

Figura 55 – Patamar 90°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 56 apresenta as amostras impressas.

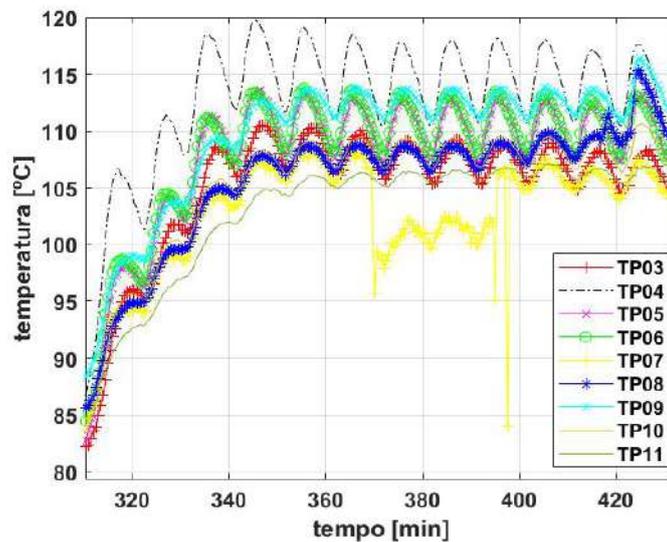
Figura 56 – Corpos de provas impressos no patamar de 90°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Por fim, a mesa de impressão foi aquecida novamente até alcançar a temperatura desejada de 110°C. Após a temperatura se estabilizar, foram realizadas a impressão de três novas amostras. A Figura 57 ilustra a curva de aquecimento das temperaturas, que foram medidas pelos termopares colocados na plataforma de impressão.

Figura 57 – Patamar 110°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 58 apresenta as amostras impressas.

Figura 58 – Corpos de provas impressos no patamar de 110°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

#### 4.3.1 Análise Dimensional

Após a impressão das amostras, foram conduzidas medições dimensionais com o auxílio de um paquímetro, a fim de avaliar a consistência das medidas de acordo com medida nominal de 12,00 mm para altura e 13,00 mm largura inferior e superior. Foram registradas uma medida para cada parâmetro da altura, largura inferior e largura superior de cada amostra. Posteriormente, realizou-se uma análise comparativa dos valores médios e erro relativo em cada patamar de temperatura. As Tabelas 10 11 12 apresenta as medidas coletadas em cada patamar.

Tabela 10 – Resultado dimensional dos corpos de prova no patamar de 70°C.

Parâmetros	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Média	Erro R.
Altura	11,90	11,70	11,95	11,85	1,25%
Largura inf.	13,20	13,25	13,20	13,22	1,67%
Largura sup.	13,45	13,50	13,30	13,42	3,21%

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 11 – Resultado dimensional dos corpos de prova no patamar de 90°C.

Parâmetros	Amostra D	Amostra E	Amostra F	Média	Erro R.
Altura	11,90	11,80	11,90	11,87	1,11%
Largura inf.	13,35	13,20	13,30	13,27	1,92%
Largura sup.	13,35	13,40	13,50	13,42	3,21%

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 12 – Resultado dimensional dos corpos de prova no patamar de 110°C.

Parâmetros	Amostra G	Amostra H	Amostra I	Média	Erro R.
Altura	11,90	11,95	11,95	11,93	0,56%
Largura inf.	13,05	13,15	13,10	13,10	0,77%
Largura sup.	13,35	13,40	13,45	13,40	3,08%

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A análise dos resultados médios das amostras em cada patamar demonstrou que as dimensões se mantiveram dentro das tolerâncias estabelecidas de  $12,00 \pm 0,5$  mm para altura e  $13,00 \pm 0,5$  mm largura, destacou as medidas de altura. A avaliação do erro relativo dos dados revelou uma notável estabilização das dimensões das amostras no patamar de temperatura de 110°C onde apresentou erro relativo abaixo de 1% para os parâmetros de altura e largura inferior, coincidindo mais próximo com as medidas nominais desejadas. Este resultado é consistente com observações anteriores de que os parâmetros de temperatura da mesa têm um impacto significativo na precisão dimensional das amostras.

Esses dados significativos encontra-se respaldo em um estudo realizado por Agarwal *et al.* (2022), que também identificou que os parâmetros de temperatura da mesa exercem um impacto considerável na precisão dimensional das amostras. Além disso, neste mesmo estudo abordou que parâmetros como a espessura da camada, a velocidade de impressão e a densidade de preenchimento indicam também influência significativa nas dimensões dos resultados experimentais.

#### 4.4 QUALIDADE SUPERFICIAL

Os dados de qualidade superficial dos corpos de prova impressos nos diferentes patamares de temperatura são apresentados a seguir.

##### 4.4.1 Rugosímetro

Foram produzidas três amostras em cada patamar de temperatura, e em seguida, as medições de rugosidade foram realizadas ao longo de um filamento das peças de teste. Os valores médios e os desvios padrão das respostas foram calculados e considerados como valores representativos das rugosidades superficiais ( $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$ ) para cada uma das amostras, como é apresentado nas Tabelas 13, 14 e 15

Foi observada uma diferença significativa nos valores médios de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$ ) das amostras impressas no patamar de temperatura de 110°C em comparação com as outras amostras. Além disso, é importante destacar que os valores de desvio padrão para  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$  foram de  $0,017 \mu\text{m}$ ,  $0,100 \mu\text{m}$  e  $0,055 \mu\text{m}$ , respectivamente. Esses valores indicam uma tendência clara de diminuição nos três parâmetros de rugosidade medida à medida que a temperatura aumenta.

Tabela 13 – Rugosidade dos corpos de prova na temperatura 70°C

Parâmetros	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Média	Desv. P	Unidade
Ra	0,356	0,294	0,535	0,395	0,102	$\mu\text{m}$
Rz	1,809	1,838	2,898	2,182	0,507	$\mu\text{m}$
Rmax	2,368	2,838	3,338	2,848	0,396	$\mu\text{m}$

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 14 – Rugosidade dos corpos de prova na temperatura de 90°C.

Parâmetros	Amostra D	Amostra E	Amostra F	Média	Desv. P	Unidade
Ra	0,486	0,295	0,244	0,342	0,104	$\mu\text{m}$
Rz	2,153	1,074	1,375	1,534	0,455	$\mu\text{m}$
Rmax	3,546	1,558	1,813	2,306	0,883	$\mu\text{m}$

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 15 – Rugosidade dos corpos de prova na temperatura de 110°C.

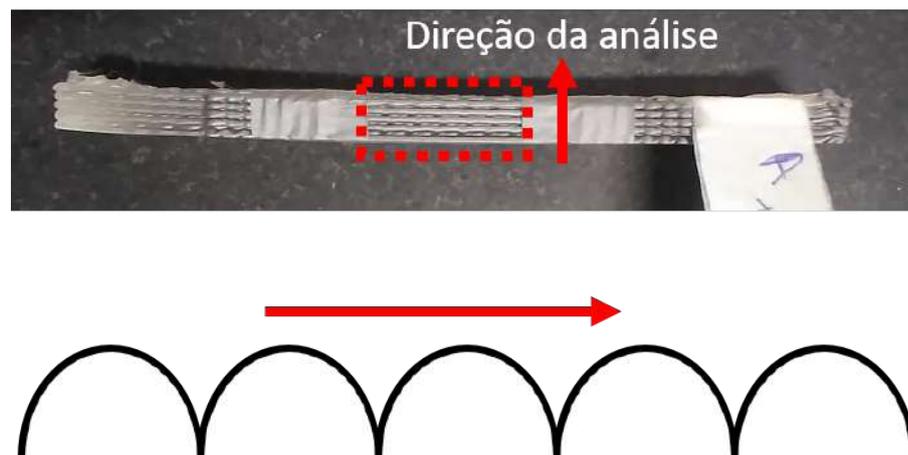
Parâmetros	Amostra G	Amostra H	Amostra I	Média	Desv. P	Unidade
Ra	0,218	0,260	0,239	0,239	0,017	$\mu\text{m}$
Rz	1,126	1,349	1,325	1,267	0,100	$\mu\text{m}$
Rmax	1,630	1,520	1,508	1,553	0,055	$\mu\text{m}$

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

#### 4.4.2 Microscópio

A topografia da superfície da peças impressa em ABS na direção vertical foram analisadas conforme apresentado na Figura 59.

Figura 59 – Região de análise das camadas impressas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 4.4.2.1 Patamar 70°C

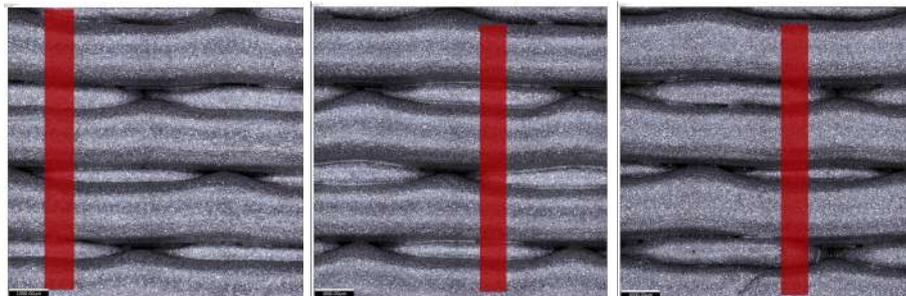
Os resultados das medições de rugosidade foram representados através de imagens 3D da superfície topográfica, as quais estão apresentadas na Figura 60. Além disso, foram fornecidas imagens da área de varredura, conforme ilustrado na Figura 61. Em cada imagem, uma linha vermelha foi traçada utilizando o software de leitura do Alicona, a fim de obter os dados de rugosidade específicos de cada superfície das amostras.

Figura 60 – Superfície topográfica das amostras no patamar de 70°C



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 61 – Imagem da varredura das superfícies dos corpos de prova A, B e C respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 4.4.2.2 Patamar 90°C

Os resultados referentes as medições de rugosidade realizadas com o microscópio são apresentados nas Figuras 64 e 64.

Figura 62 – Superfície topográfica das amostras no patamar de 90°C



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 4.4.2.3 Patamar 110°C

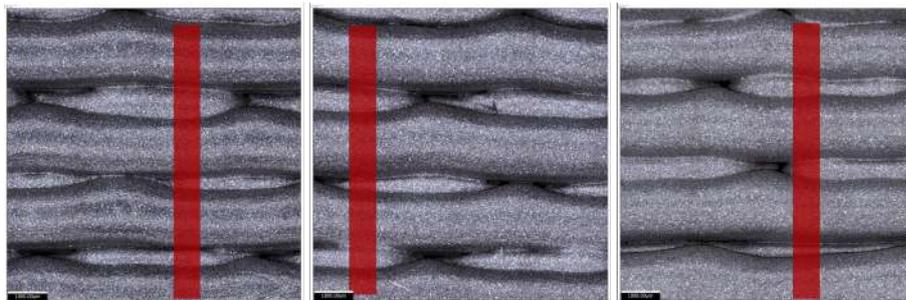
Os resultados referentes as medições de rugosidade realizadas com o microscópio são apresentados nas Tabelas e Figuras 63 e 65.

Figura 63 – Superfície topográficas das amostras no patamar de 110°C



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 64 – Imagem da varredura das superfícies dos corpos de prova D, E e F respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 65 – Imagem da varredura das superfícies dos corpos de prova G, H e I respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados referentes à rugosidade foram obtidos a partir dos dados gráficos do perfil de rugosidade, coletados por meio do equipamento de medição microscópica Alicona. Esse processo forneceu os valores das rugosidades Ra, Rz e Rmáx, além dos desvios correspondentes para cada amostra. Cada amostra passou por uma análise de perfil de rugosidade. A Tabela 16 resume os valores das medidas de rugosidade.

Tabela 16 – Rugosidade dos corpos de prova.

<b>Amostras</b>	<b>Ra</b>	<b>Rz</b>	<b>Rmáx</b>	<b>Desvios Ra</b>	<b>Desvios Rz</b>	<b>Unidade</b>
A 70°C	205,53	667,28	765,15	7,07	26,60	μm
B 70°C	208,63	649,94	839,55	7,35	32,49	μm
C 70°C	213,92	672,47	992,66	17,78	36,15	μm
D 90°C	203,28	566,51	640,83	12,97	43,84	μm
E 90°C	201,29	581,38	793,33	11,19	33,39	μm
F 90°C	204,58	626,56	1088,02	2,44	15,56	μm
G 110°C	207,98	667,89	1112,23	4,72	40,96	μm
H 110°C	195,12	574,83	1051,43	6,14	8,05	μm
I 110°C	199,89	569,74	827,73	1,64	7,3	μm

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

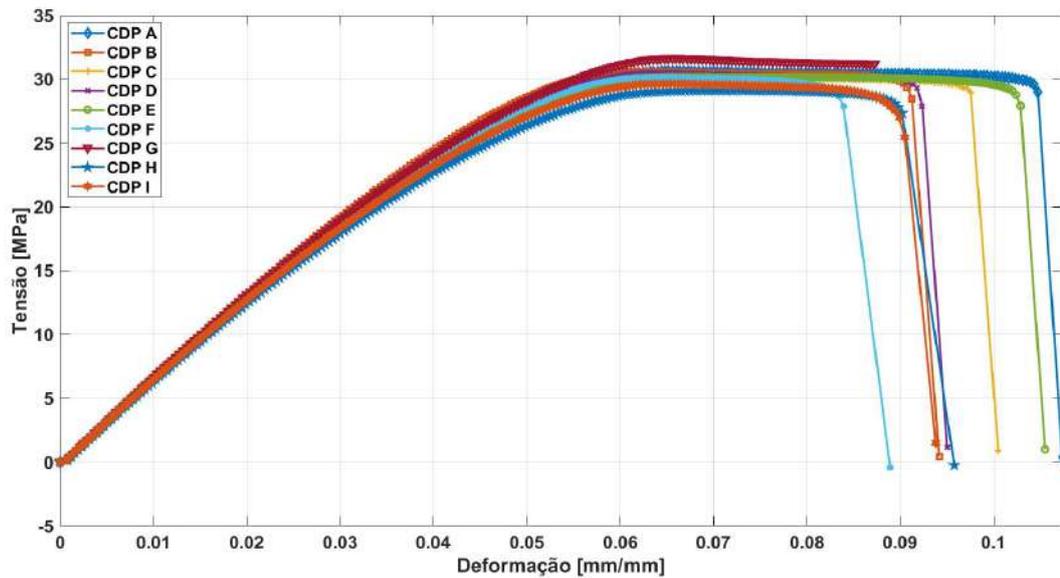
A análise dos dados presentes na Tabela 16 evidencia que a amostra B apresentou o maior valor de rugosidade média (Ra), atingindo 208,62 μm, enquanto as amostras H e I demonstrou menor valores de rugosidade média, registrando 195,12 μm e 199,89 μm respectivamente. Nota-se uma notável redução na rugosidade média (Ra) das amostras quando submetidas ao patamar de temperatura de 110°C. Uma observação semelhante é evidenciada na amostras H e I apresentaram valores bem baixos de rugosidade média (Rz) em comparação com as outras amostras. Por outro lado, os valores de profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) para as amostras no patamar de 110°C apresentam os maiores valores identificados. Além disso, os dados ressaltam que a amostra I exibe os menores desvios nas medidas de rugosidade (Ra e Rz) com valores de 1,64 μm e 7,3 μm respectivamente.

#### 4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os dados de resistência mecânica dos corpos de prova obtidos a partir dos ensaios de tração são apresentados a seguir. A Figura 66 ilustra as curvas de tensão-deformação dos nove corpos de prova impressos nos diferentes patamares de temperatura.

É perceptível que não se manifestaram diferenças substanciais nas curvas de tensão-deformação ao se comparar os três distintos patamares de temperatura empregados na configuração da impressão, como ilustrado na Tabela 17. No entanto, é possível discernir valores de tensão de ruptura notavelmente superiores no patamar de 70°C. Essa observação pode ser atribuída ao padrão de deposição das camadas nos corpos de prova. De maneira semelhante, os valores do

Figura 66 – Curvas de ensaio de tração.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

módulo de elasticidade não revelaram divergências significativas entre os diferentes patamares de temperatura.

Tabela 17 – Valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade.

Amostra	$\sigma_R$ (MPa)	$E$ (GPa)
A 70°C	30,61	0,733
B 70°C	30,59	0,765
C 70°C	30,20	0,759
D 90°C	30,51	0,752
E 90°C	30,18	0,755
F 90°C	30,14	0,751
G 110°C*	31,64	0,758
H 110°C	29,14	0,723
I 110°C	29,63	0,738

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

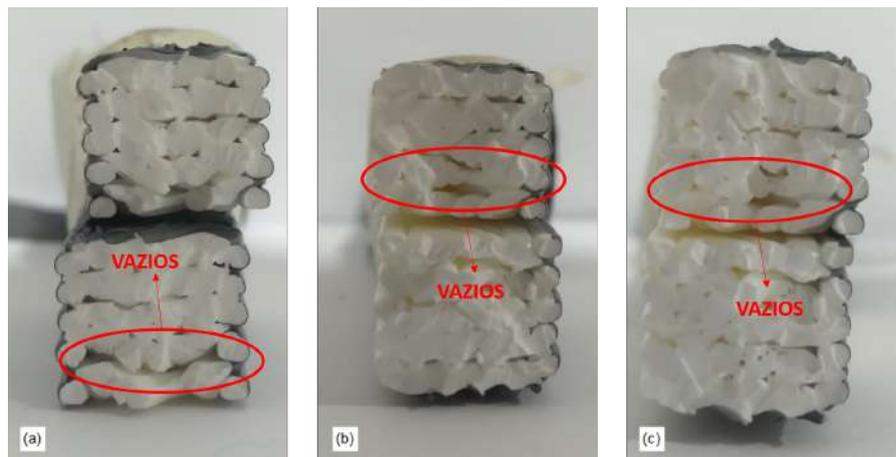
\*A amostra CDP G não chegou a fraturar totalmente a ponto de quebrar devido a um sobreaquecimento no equipamento que parou durante o ensaio.

A análise comparativa das seções transversais nas áreas de fratura de cada amostra foi realizada com o objetivo de identificar possíveis fatores que influenciaram na tensão de ruptura. Uma interpretação plausível para esse fenômeno é a observação de que todas as amostras apresentaram uma presença mais acentuada de vazios no filamento, especialmente nas primeiras camadas em contato com a mesa de impressão. Além disso, foi identificado um outro defeito notável, caracterizado como defeitos de bolhas, nas amostras G, H e I apresentadas nas Figuras

67, 68 e 69.

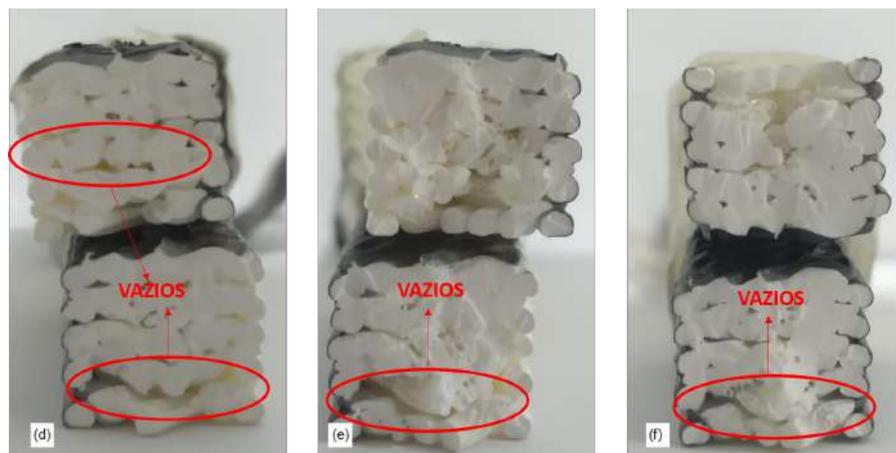
Esses defeitos visíveis podem sugerir que os valores de tensão de ruptura obtidos no patamar de temperatura de 110°C sejam inferiores em comparação às amostras impressas sob diferentes condições. A presença dessas imperfeições estruturais, como vazios e bolhas, pode ter enfraquecido a integridade das amostras produzidas a 110°C, levando a uma menor resistência à tração. Isso pode ser resultado de uma distribuição não uniforme das forças e tensões ao longo da amostra, devido à presença desses defeitos.

Figura 67 – Vista da seção transversal das amostras no patamar de 70°C.



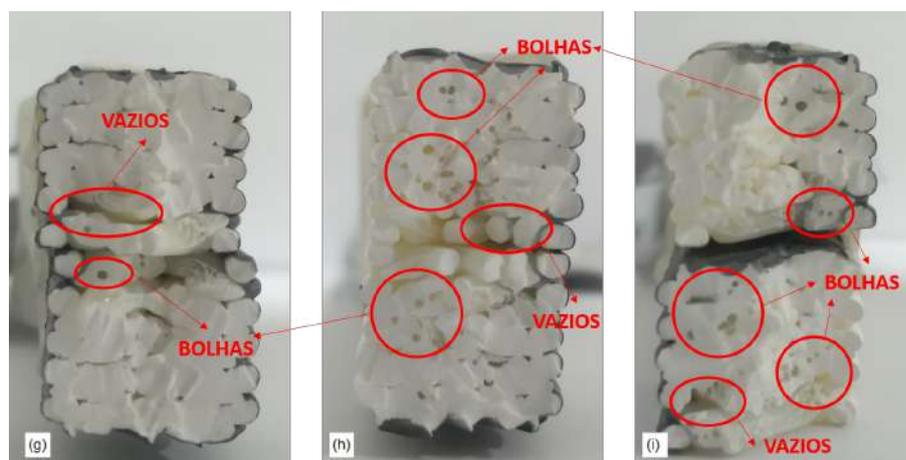
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 68 – Vista da seção transversal das amostras no patamar de 90°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 69 – Vista da seção transversal das amostras no patamar de 110°C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 5 CONCLUSÕES

Os efeitos da temperatura sobre a resistência mecânica e qualidade superficial de componentes poliméricos fabricados pela técnica de extrusão na manufatura aditiva representam atualmente temas de diversas pesquisas. O melhor entendimento destes efeitos tem o potencial de contribuir significativamente para a melhoria das técnicas de fabricação, a otimização de produtos e o desenvolvimento de aplicações mais eficientes e duráveis.

Neste trabalho realizou-se uma investigação sobre a influência da temperatura da base de uma mesa de impressão sobre resistência mecânica e qualidade superficial de peças impressas pela técnica FPM com material polimérico ABS. A mesa de impressão faz parte de uma célula de manufatura composta por um robô da marca Yakawa, modelo Motoman® GP88, integrado com uma extrusora monorosca da marca AX Plásticos®.

Com base nas investigações conduzidas e nos resultados obtidos, destacam-se às seguintes conclusões:

- A etapa de reprojeto da mesa de impressão utilizando o modelo térmico de elementos finitos trouxe resultados significativos. Esse modelo permitiu uma previsão precisa das temperaturas na base de impressão sob diferentes condições, desde as desejáveis até as mais extremas. Isso viabilizou uma avaliação minuciosa da capacidade da estrutura da mesa de lidar com essas variações térmicas. Os resultados dessas análises foram essenciais para validar a eficácia do reprojeto e da montagem da nova mesa de impressão na célula de manufatura. Ao alcançar uma configuração que conseguiu manter os patamares de temperatura desejados sem causar distorções na estrutura, pôde-se confirmar o sucesso do processo de reprojeto a mesa.

A utilização do modelo térmico de elementos finitos demonstrou ser uma ferramenta valiosa no planejamento e otimização de sistemas térmicos, como a mesa de impressão, garantindo não apenas a eficácia operacional, mas também a integridade estrutural em face das variações de temperatura.;

- Testes preliminares de aquecimento do subconjunto foram realizados e os resultados obtidos comprovaram a possibilidade de controle de temperatura em diferentes patamares;
- Gradientes térmicos de temperatura sobre a base de impressão foram observados indicando que, para sua minimização, uma melhoria do controle térmico faz-se necessária. Como alternativa sugere-se um controle térmico do tipo PID independente para cada manta de aquecimento;
- A impressão de corpos de prova nos patamares de 70°C, 90°C e 110°C foi realizada permitindo a posterior avaliação da qualidade superficial e resistência mecânica;

- A qualidade superficial dos corpos de prova foi realizada a partir de medições dimensionais e de rugosidade. Os resultados obtidos indicam uma tendência de diminuição dos parâmetros de rugosidade a medida em que a temperatura da base tende ao valor de referência sugerido pelo fabricante. A análise das amostras produzidas em diferentes patamares de temperatura revelou informações importantes sobre a rugosidade da superfície ao longo de um filamento. Observou-se que os valores de desvio padrão de rugosidade Ra, Rz e Rmáx apresentaram uma tendência de diminuição no patamar de temperatura de 110°C em comparação com os outros patamares. Esse resultado sugere que temperaturas mais elevadas podem contribuir para uma redução na rugosidade superficial. Além disso, os valores de rugosidade Ra e Rz nas análises das superfícies topográficas apresentaram valores menores, indicando uma consistência nos resultados das medições de rugosidade nos patamares de temperatura mais alta. Esse fato reforça a confiabilidade das medições e das conclusões tiradas a partir delas. Já na análise dimensional das amostras fabricadas em diferentes patamares de temperatura proporcionou dados interessantes sobre a estabilidade das dimensões das amostras. Os resultados indicaram que, em geral, as amostras fabricadas no patamar de temperatura de 110°C apresentaram uma estabilização mais próxima das medidas nominais desejadas em comparação com os outros patamares;
- A resistência mecânica foi avaliada por meio de ensaios de tração dos corpos de prova. A análise das propriedades mecânicas das amostras impressas em diferentes patamares de temperatura não apresentou resultados esperados para o patamar de 110°C. Embora tenham sido observadas pequenas diferenças significativas nas curvas de tensão-deformação entre os três patamares de temperatura configurados para a impressão, foi possível notar valores de tensão de ruptura consideravelmente maiores no patamar de 70°C. Essa tendência pode ser parcialmente explicada pelos parâmetros de impressão adotados para os corpos de prova que tenderam a solicitar o material preferencialmente na direção longitudinal dos filamentos. Além disso, foi realizada uma análise comparativa das seções transversais na região de fratura das amostras e foi possível observar uma maior presença de vazios no filamento das amostras no patamar de 110°C, o que foi possível evidenciar como defeitos de bolhas. Um indicativo possível dessas questões pode estar relacionado a falha durante o processamento dos pellets durante a secagem. Outra potencial falha pode estar relacionada ao parâmetro de temperatura do bico da extrusora estiver acima do recomendado, resultando na formação de bolhas nas camadas dos filamentos. Esses defeitos podem ser indicativos para os valores de tensão de ruptura serem inferiores nesse patamar em relação aos demais.

Essas observações ressaltam a importância de controlar adequadamente os parâmetros de impressão, especialmente a temperatura da mesa, para evitar a formação de defeitos estruturais que possam comprometer as propriedades mecânicas das peças produzidas. Além disso, destaca-se a necessidade contínua de investigar e otimizar os processos de

impressão para garantir a qualidade e a resistência das peças fabricadas por meio da tecnologia FPM.

Para investigações futuras sobre a resistência mecânica sugere-se avaliar a adesão das camadas por meio de ensaios de cisalhamento.

## REFERÊNCIAS

- AGARWAL, K. M. *et al.* Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of abs specimens printed using fused deposition modelling (fdm). **Sensors International**, Elsevier, v. 3, p. 100149, 2022.
- ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 118, n. 1-3, p. 385–388, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/ASTM 52900**: Manufatura aditiva - princípios gerais - terminologia. Rio de Janeiro, 2018. 25 p.
- ASTM. **ASTM D638-14**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, PA, 2014. 15 p.
- CHOHAN, J. S. *et al.* Optimization of FDM printing process parameters on surface finish, thickness, and outer dimension with ABS polymer specimens using taguchi orthogonal array and genetic algorithms. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2022, 2022.
- COOGAN, T. J. **Fused deposition modeling (FDM) part strength and bond strength simulations based on healing models**. Tese (Tese de Doutorado) — University of Massachusetts Lowell, 2015.
- COOGAN, T. J.; KAZMER, D. O. Healing simulation for bond strength prediction of FDM. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, p. 551–561, 2017.
- DIZON, J. R. C. *et al.* Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive manufacturing**, Elsevier, v. 20, p. 44–67, 2018.
- DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 228–235, 2014.
- GARDNER, J. M. *et al.* Environment control in additive manufacturing of high-performance thermoplastics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 119, n. 9-10, p. 6423–6433, 2022.
- GORDELIER, T. J. *et al.* Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, p. 953–971, 2019.
- JO, W.; KWON, O.-C.; MOON, M.-W. Investigation of influence of heat treatment on mechanical strength of FDM printed 3D objects. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 24, n. 3, p. 637–644, 2018.
- KHAN, M.; MISHRA, S. Minimizing surface roughness of abs-fdm build parts: An experimental approach. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 26, p. 1557–1566, 2020.
- KHANAFER, K. *et al.* Thermal analysis of fused deposition modeling process based finite element method: Simulation and parametric study. **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications**, Taylor & Francis, v. 81, n. 3-6, p. 94–118, 2022.

- KOZIOR, T. *et al.* Quality of the surface texture and mechanical properties of FDM printed samples after thermal and chemical treatment. **Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering**, v. 66, n. 2, 2020.
- KUMAR, M. B.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. **Thin-Walled Structures**, v. 159, p. 107228, 2021.
- KUMAR, S. **Additive Manufacturing Processes**. 1st. ed. Switzerland AG: Springer Cham, 2020. 205 p. ISBN 978-3-030-45088-5.
- LAU, K.-T. *et al.* Effect of print bed's heat flow on curling and surface roughness of FDM-printed ABS sample. **Jurnal Teknologi**, v. 85, p. 211–222, 2023.
- MG94, S. C. R. **TYPICAL PROPERTY VALUES**. 2022. Disponível em: <[https://www.sabic.com/en/products/documents/cycolac-resin\\_mg94\\_americas\\_technical\\_data\\_sheet/en](https://www.sabic.com/en/products/documents/cycolac-resin_mg94_americas_technical_data_sheet/en)>. Acesso em: 10/01/2023. Citado na página 25.
- NGO, T. D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172–196, 2018. ISSN 1359-8368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817342944>>.
- NOURGHASSEMI, B. Surface roughness estimation for fdm systems. 2021.
- NYIRANZEYIMANA, G. *et al.* Optimization of process parameters in fused deposition modeling of thermoplastics: A review. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Wiley Online Library, v. 52, n. 6, p. 682–694, 2021.
- PAKKANEN, J. *et al.* About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing. In: CAMPANA, G. *et al.* (Ed.). **Sustainable Design and Manufacturing 2017**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 776–785. ISBN 978-3-319-57078-5.
- PRICCI, A.; TULLIO, M. D. de; PERCOCO, G. Analytical and numerical models of thermoplastics: A review aimed to pellet extrusion-based additive manufacturing. **Polymers**, v. 13, n. 18, 2021. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/18/3160>>.
- RANE, R. **Enhancing Tensile Strength of FDM Parts Using Thermal Annealing and Uniaxial Pressure**. Tese (Doutorado), 2019.
- SHAH, J. *et al.* Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 104, n. 9-12, p. 3679–3693, 2019.
- SHAIK, Y.; SCHUSTER, J.; SHAIK, A. **A scientific review on various pellet extruders used in 3D printing FDM processes**. **OALib**. 08: 1–19. 2021.
- SHANMUGAM, V. *et al.* The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing. **Polymer testing**, Elsevier, v. 93, p. 106925, 2021.
- SOARES, J. B. *et al.* Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 24, n. 8, p. 1305–1316, 2018.

- SREEDHAR, P.; MATHIKUMAR, M. C.; JOTHI, G. Experimental investigation of surface roughness for fused deposition modeled part with different angular orientation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2012.
- SUN, Q. *et al.* Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, v. 14, p. 72–80, 2008.
- TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, p. 192–204, 2014.
- WANG, P.; ZOU, B.; DING, S. Modeling of surface roughness based on heat transfer considering diffusion among deposition filaments for FDM 3D printing heat-resistant resin. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 161, p. 114064, 2019.
- WANG, Z. *et al.* A framework for large scale fused pellet modeling (FPM) by an industry robot. In: UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. **2015 International Solid Freeform Fabrication Symposium**. [S.l.], 2015.
- WENG, Z. *et al.* Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials & Design*, Elsevier, v. 102, p. 276–283, 2016.
- WHYMAN, S. M. **Design and development of a small-scale pellet extrusion system for 3D printing biopolymer materials and composites**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — School of Engineering and Advanced Technology, Massey University, Auckland, New Zealand, 2018. Disponível em: <<https://mro.massey.ac.nz/handle/10179/14659>>. Acesso em: 14 jul. 2022.
- YU, N. *et al.* Effects of auxiliary heat on the interlayer bonds and mechanical performance of polylactide manufactured through fused deposition modeling. *Polymer Testing*, Elsevier, v. 104, p. 107390, 2021.