

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

VALTER CESAR GOVONI

**PROCESSO DE AQUECIMENTO POR RADIAÇÃO COM
LÂMPADAS INFRAVERMELHAS PARA MANUFATURA
ADITIVA**



SÃO CARLOS-SP

2025

VALTER CESAR GOVONI

**PROCESSO DE AQUECIMENTO POR RADIAÇÃO COM LÂMPADAS
INFRAVERMELHAS PARA MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta

São Carlos-SP
2025



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 Valter Cesar Govoni, realizada em 24/04/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta (UFSCar)

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato (UFU)

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço às pessoas que se interessaram pelo trabalho, e que enxergaram, no trabalho, algum ponto que irá melhorar a vida da sociedade. Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta e ao Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki. Eles sempre me atenderam e me guiaram, tornando os problemas mais fáceis de serem sanados. Aos servidores e colegas do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar, por constituírem o ambiente acadêmico e nos auxiliarem na caminhada do saber. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

RESUMO

No moderno processo de fabricação, as pesquisas por novos materiais e por diferentes modos de fabricação tem se intensificado, com o propósito de aumentar a produção, a qualidade e facilidade de montagem de peças mais complexas. Uma dessas tecnologias é a Manufatura Aditiva, que também recebe outros nomes, como: Impressão 3D, modelagem 3D, *autofab*, prototipagem rápida, que começou a surgir a partir da década de 1980 com a finalidade de produzir protótipos tridimensionais, e atualmente ingressou na manufatura final de produtos através da criação física de um modelo digital tridimensional, depositando sucessivas camadas de material, até a obtenção da peça finalizada. Apesar de já existirem diversos tipos de impressão 3D, todas se baseiam no mesmo princípio de deposição por camadas, mas está em constante modernização, variando apenas o material depositado. Diante desse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo investigar o efeito da temperatura nas características de resistência mecânica e qualidade superficial das peças impressas pela técnica FPM (*Fused Pellet Modeling*), empregando o polímero ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*). Para tal fim, foi desenvolvido um sistema ainda não usual de aquecimento complementar de baixo custo usando lâmpadas infravermelhas integradas à célula de manufatura de impressão 3D de grande porte. O principal objetivo é verificar de que forma a temperatura adicional pode melhorar a resistência mecânica e a qualidade superficial das peças de grande volume produzidas. E também, conforme a peça vai sendo construída, sensores fazem a leitura em tempo real da temperatura dessa peça e via conexão sem fio, os valores dessas temperaturas medidas são enviados para um gravador de dados que é um computador montado remotamente próximo da célula de manufatura, onde poderão ser analisados em tempo real ou, posteriormente, na forma de tabelas ou gráficos.

Palavras-chave: Manufatura aditiva grande porte. Aquecimento lâmpada infravermelho. Acabamento superficial.

ABSTRACT

In the modern manufacturing process research for new materials and different manufacturing methods has intensified with the purpose of increasing production, quality and easy of assembly of parts more complex. One of these technologies is 3D Printing, also known as Manufacturing Additive, which began to emerge in the 1980s with the purpose of producing prototypes three-dimensional, and currently joined in the final manufacture of products through the physical creation of a three-dimensional digital model depositing successive layers of material, until obtaining the finished piece. Despite already although there are several types of 3D printing, they are all based on the same principle of deposition by layers, but is constantly modernizing, only the material deposited varies. In this context, the present research aims to investigate the effect of temperature on the mechanical strength and surface quality characteristics of parts printed using the FPM (Fused Pellet Modeling) technique, using the ABS (acrylonitrile butadiene styrene) polymer. To this end, a still unusual low-cost complementary heating system was developed using infrared lamps integrated into a large-scale 3D printing manufacturing cell. The main objective is to verify how additional temperature can improve the mechanical resistance and surface quality of large-volume parts produced. Also, as the part is being built, sensors read the temperature of the part in real time, and via wireless connection, the values of these measured temperatures are sent to a data recorder, which is a computer mounted remotely near the manufacturing cell, where they can be analyzed in real time or later, in the form of tables or graphs.

Keywords: Large-scale additive manufacturing. Infrared Lamp heating. Surface finishing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funcionamento do processo MA.	14
Figura 2 – Previsão de mercado de impressão 3D por ano.	15
Figura 3 – Célula de manufatura aditiva robotizada.	18
Figura 4 – Evolução da MA e materiais usados.	21
Figura 5 – Diferentes tipos e abordagens para fabricação aditiva baseada em extrusão.	22
Figura 6 – Processo da difusão molecular entre duas camadas.	22
Figura 7 – Visão do processo de empenamento.	24
Figura 8 – Diagrama do experimento.	25
Figura 9 – Fotos do equipamento e representação do modelo da parede hexagonal.	26
Figura 10 – Fotos da parede hexagonal para o experimento com lâmpada infravermelha.	27
Figura 11 – Fotos da montagem experimental.	27
Figura 12 – Esquemático da área de impressão aquecida por lâmpadas infravermelhas.	28
Figura 13 – Direções de impressão.	29
Figura 14 – Ângulos raster.	30
Figura 15 – Ângulos raster.	30
Figura 16 – Dimensões do corpo de prova.	31
Figura 17 – Medidas paralelas e perpendiculares do índice de rugosidade superficial.	31
Figura 18 – Resultados dos testes elásticos e de tração.	32
Figura 19 – Resistência nos eixos XY e Z.	32
Figura 20 – Diagrama em blocos do processo de aquecimento, leitura e gravação dos dados.	33
Figura 21 – Lâmpada e respectivo refletor, sendo: a) parábola que rege a curvatura do refletor; b) refletor e lâmpada; c) suporte articulado.	34
Figura 22 – Módulo controlador de potência - <i>Dimmer</i>	35
Figura 23 – Diagrama reduzido da instrumentação e IOT.	35
Figura 24 – Sensor de temperatura MLX90614.	36
Figura 26 – Diagrama elétrico do Módulo Eletrônico Microcontrolado.	37
Figura 25 – Módulo Microcontrolado.	38
Figura 27 – Diagrama em blocos software.	39
Figura 28 – Diagrama em blocos do Módulo Eletrônico Microcontrolado.	39
Figura 29 – Programa auxiliar de comunicação entre o Arduino e o Excel.	40
Figura 30 – Detalhamento das zonas de aquecimento da extrusora.	41
Figura 31 – Foto dos pellets no funil da extrusora.	43
Figura 32 – Desenho da placa de ABS desenvolvida para os testes.	43
Figura 33 – Foto vista geral montagem na célula de manufatura robotizada.	44

Figura 34 – Imagem estilizada da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) vista frontal; b) vista superior representando a área efetiva de impressão aquecida pela radiação.	45
Figura 35 – Fotos detalhadas da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) vista frontal; b) vista lateral; c) detalhes do bico da extrusora e sensor.	46
Figura 36 – Foto detalhada do posicionamento do sensor IR junto ao bico da extrusora.	47
Figura 37 – Desenho da estrutura de parede fina de ABS desenvolvida para os testes.	47
Figura 38 – Imagem estilizada da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) aquecimento unilateral; b) aquecimento bilateral.	48
Figura 39 – Fotos da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) aquecimento unilateral; b) aquecimento bilateral.	49
Figura 40 – Comparação das placas de ABS impressas.	50
Figura 41 – Foto do empenamento do Teste-1.	51
Figura 42 – Gráfico das temperaturas do Teste-2.	52
Figura 43 – Foto do empenamento do Teste-2.	53
Figura 44 – Gráfico das temperaturas do Teste-3.	53
Figura 45 – Foto do empenamento do Teste-3.	54
Figura 46 – Gráfico das temperaturas do Teste-4.	54
Figura 47 – Foto do empenamento do Teste-4.	55
Figura 48 – Resultado do Teste-1. Corpo de prova de parede fina impresso sem o sistema complementar de aquecimento por lâmpadas infravermelhas.	56
Figura 49 – Impressão com excesso de aquecimento no topo de uma das paredes.	57
Figura 50 – Primeiro resultado do Teste-2. Impressões com aquecimento unidirecional por Lâmpadas infravermelhas.	58
Figura 51 – Segundo resultado do Teste-2. Impressões com aquecimento unidirecional por Lâmpadas infravermelhas.	59
Figura 52 – Terceiro resultado do Teste-2. Impressões com aquecimento unidirecional por Lâmpadas infravermelhas.	60
Figura 53 – Resultado do Teste-3. Impressões com aquecimento bidirecional por Lâmpadas infravermelhas fixas.	61
Figura 54 – Resultado do Teste-4. Impressões com aquecimento bidirecional por Lâmpadas infravermelhas móveis.	61
Figura 55 – Gráficos das variações da temperatura no ponto médio da parede do corpo de prova.	62
Figura 56 – Foto da montagem em bancada, sendo: a) vista geral; b) e c) vistas do posicionamento dos sensores sobre o corpo de prova.	70
Figura 57 – Figura estilizada da montagem do pré-teste.	71
Figura 58 – Plataforma de aquisição de dados.	71

Figura 59 – Corpos de prova utilizados, sendo: a) foto real; b) desenho estilizado do mesmo e a posição dos sensores; c) foto real; d) desenho estilizado do mesmo e a posição dos sensores.	72
Figura 60 – Cronograma do Teste-1A.	74
Figura 61 – Teste-1A.	74
Figura 62 – Cronograma do Teste-1B.	75
Figura 63 – Teste-1B.	75
Figura 64 – Cronograma do Teste-1C.	76
Figura 65 – Teste-1C.	76
Figura 66 – Cronograma do Teste-2.	77
Figura 67 – Teste-2.	77
Figura 68 – Gráfico da leitura do sensor e da média dos termopares.	78
Figura 69 – Gráfico do desvio padrão entre a leitura do sensor e a média dos termopares.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do ABS	42
Tabela 2 – Configurações da impressão	43
Tabela 3 – Resultados obtidos	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LEA	Laboratório de Engenharia Aplicada
MA	Manufatura aditiva
IOT	Internet of Things
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FPM	Fused Pellet Modeling
PWM	Pulse Wave Modulation
IR	Infrared
LCD	Liquid Crystal Display
IHM	Interface Homem Máquina
IDE	Integrated Development Environment
USB	Universal Serial Bus
PCL	Policaprolactona
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PET	Polietileno Tereftalato
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Polylactic Acid
PP	Polypropylene
PETT	Polyethylene coTrimethylene Terephthalate
CAD	Computer Aided Design
PLX-DAQ	Parallax Data Acquisition

SUMÁRIO

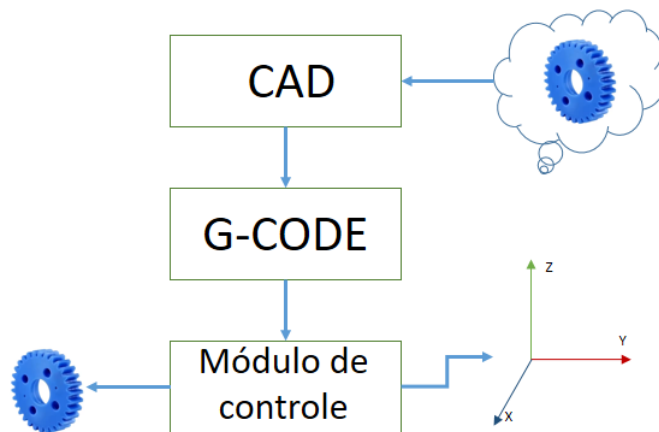
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	INDÚSTRIA 4.0 E MA	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	MANUFATURA ADITIVA	19
2.1.1	Influência na adesão entre camadas	20
2.1.2	Controle da temperatura	23
2.2	AQUECIMENTO POR LÂMPADAS INFRAVERMELHAS	24
2.3	RESISTÊNCIA, ACABAMENTO E CARACTERIZAÇÃO	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	INSTRUMENTAÇÃO PARA O AQUECIMENTO E MONITORAMENTO DA TEMPERATURA	34
3.1.1	Descrição do bloco de aquecimento	34
3.1.2	Descrição do bloco de aquisição e gravação dos dados	35
3.2	PLACA DA COLETA DO SINAL, VISUALIZAÇÃO DOS DADOS E AR- MAZENAMENTO REMOTO	37
3.3	SOFTWARE UTILIZADO	38
3.4	ARMAZENAMENTO DE DADOS	39
3.5	PRÉ-TESTES	40
3.6	USO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO JUNTO À CÉLULA DE MANU- FATURA ADITIVA DE GRANDE PORTE	40
3.6.1	Testes de impressão de uma placa plana de ABS utilizando apenas o sistema de aquecimento por radiação infravermelha (mesa desligada dos aquecedores elétricos).	42
3.6.2	Teste de impressão do corpo de prova de parede fina utilizando o sistema de aquecimento por radiação infravermelha, utilizando a mesa aquecida (mesa ligada aos aquecedores elétricos).	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.0.1	Testes de impressão de uma placa plana de ABS utilizando apenas o sistema de aquecimento por radiação infravermelha (mesa desligada dos aquecedores elétricos)	50
4.0.2	Teste de impressão do corpo de prova de parede fina aquecida por radia- ção infravermelha, utilizando a mesa de impressão aquecida pelo método convencional.	55

5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – PRÉ-TESTES	69
A.1	DESENVOLVIMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL	69
A.1.1	Metodologia do pré-teste	72
A.1.2	Comparação dos valores das leituras entre sensor e termopares	77
A.1.3	Resultados do pré-teste	78
	APÊNDICE B – PROGRAMA	80

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de objetos a partir de um design pré-definido pode ser realizada por meio da técnica de Manufatura Aditiva (MA), também denominada Impressão 3D ou Prototipagem Rápida, cuja invenção é atribuída a Steven Scott Crump em 1989. Segundo a definição estabelecida pela *International Standards Organization* e pela *American Society for Testing and Materials Standards*, trata-se de um conjunto de processos tecnológicos nos quais materiais são unidos para construir peças com base em dados provenientes de um modelo CAD tridimensional, mediante deposição sucessiva de camadas, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Funcionamento do processo MA.



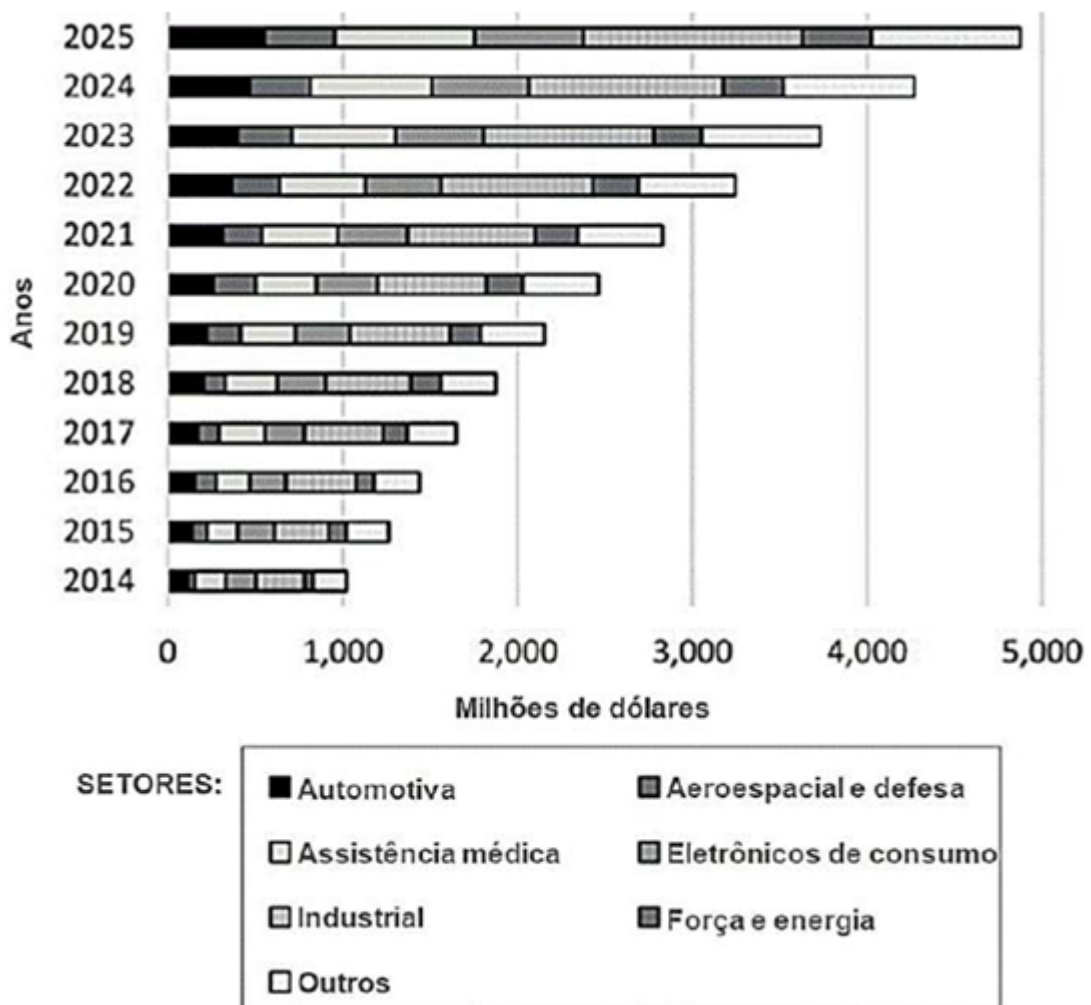
Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo se inicia com a criação de um modelo digital tridimensional auxiliado por computador (CAD). Após isso, o formato da peça é convertido para o arquivo *G-Code*, ou Código-G, que comanda os movimentos da máquina. Uma extrusora derrete um material, normalmente um termoplástico, transformado na forma de cordões, que são depositados camada sobre camada, perfazendo fisicamente o objeto imaginado (MISHRA *et al.*, 2025).

Esta técnica está conectada com o inovador modelo da indústria 4.0, onde já ocorre a integração da extrusora a uma plataforma robótica que provou ser viável e vantajosa. O sistema oferece flexibilidade, proporcionando às empresas um modelo de geração de produtos em um intervalo reduzido de tempo. As projeções indicam que essa tendência deverá crescer e estará presente nos próximos anos.

No atual estágio de desenvolvimento, diversos materiais estão sendo estudados para servirem de matéria-prima para uso na MA, incluindo metais, polímeros e cerâmicas podem ser usadas como matéria-prima para produzir peças únicas com baixo custo. Polímeros como policaprolactona (PCL), ácido polilático (PLA) e tereftalato de polietileno (PET) são os mais utilizados (ISLAM *et al.*, 2024).

Figura 2 – Previsão de mercado de impressão 3D por ano.



Fonte: Adaptado de Gordelier et al.(2019).

Dentre as diversas técnicas de manufatura aditiva, destaca-se a técnica FPM (*Fused Pellet Modeling*) na qual materiais poliméricos são fundidos e depositados em camadas para gerar a geometria final desejada (SANTANA *et al.*, 2018). Também, muito praticado, é o processo FFF (*Fused Filament Fabrication*) que faz a extrusão de um filamento liquefeito através do bocal de uma cabeça de impressão e consiste em utilizar o desenho da peça pronta em um *software* específico de desenho para a fabricação da mesma. Neste processo, basicamente tem-se um polímero (que pode estar na forma de filamento ou grânulos) que é derretido em uma extrusora e vai sendo depositado, em sucessivas camadas sobrepostas, seguindo uma geometria espacial a uma certa velocidade controlada via *software*.

Um dos grandes desafios da manufatura aditiva FPM refere-se à garantia de manutenção da qualidade superficial e resistência mecânica das peças produzidas. A formação de ligações entre os filamentos poliméricos é impulsionada pela energia térmica do material extrudado,

portanto o histórico de temperatura das interfaces desempenha um papel fundamental na qualidade da ligação e, portanto, nas propriedades mecânicas do produto final. Em geral, quando a temperatura do filamento depositado permanece acima da temperatura de transição vítrea (T_g) por longos períodos de tempo, a difusão intermolecular ocorre através da interface garantindo melhor adesão entre camadas. No entanto, no caso de peças maiores, o tempo de impressão de uma camada pode ser longo e reduzir a temperatura da superfície abaixo da T_g do polímero, prejudicando a ligação entre camadas. Tal problemática tende a ser mais acentuada no caso da impressão de grandes volumes, uma vez que os gradientes térmicos associados tendem a ser maiores na medida em que o material impresso se afasta do plano da plataforma de impressão.

Para minimizar os gradientes térmicos em regiões afastadas da plataforma de impressão e auxiliar na manutenção de faixas de temperatura de interesse, diversas pesquisas utilizam o aquecimento complementar do impresso por meio de lâmpadas infravermelhas. A radiação infravermelha auxiliar aplicada ao polímero na área de deposição ao longo do trajeto de impressão aquecerá o material, favorecendo a difusão molecular e melhorando o aspecto da interface depositada. Consequentemente, a técnica de aquecimento eliminará defeitos estruturais e ajudará a melhorar a resistência mecânica.

1.1 INDÚSTRIA 4.0 E MA

Segundo Dilberoglu *et al.* (2017), na nova era da utilização da indústria 4.0, a utilização de competências de produção modernas no contexto de integrar novas tecnologias de informação desempenham um papel importante na competitividade econômica, com o objetivo de se criar fábricas inteligentes. Além disso, o futuro da indústria será direcionado para a utilização de processos em combinação. Sendo conhecida como manufatura híbrida, será possível se produzir produtos com melhor qualidade e resistentes à fadiga, ou seja, o crescente interesse na fabricação híbrida leva a várias combinações de processos de fabricação além dos processos de MA convencionais. Uma vantagem extra dessa tecnologia é que torna-se possível detectar em tempo real a temperatura do material extrudado e que vai sendo depositado, pois a ligação entre camadas é o ponto crítico da formação e acabamento razoável do produto, além da sua variação ao longo do tempo de impressão, o que pode levar por exemplo a um cancelamento do processo de impressão, caso o valor da temperatura varie muito além do esperado. Devido a isso, já foi criado monitoramento de uma determinada região de impressão por meio de câmeras de temperatura infravermelha, porém alguns problemas podem ocorrer, como a dificuldade de se focar a câmera em uma determinada região apenas, aliado à interferência da cabeça de impressão (LEWIS; MOORE *et al.*, 2021).

Conforme os meios de produção caminham em direção à industrialização 4.0, os robôs estão cada vez mais presentes nos meios de produção. Portanto, a junção de robôs com a MA vem ganhando destaque, pois a nova indústria é flexível e os robôs, quando integrados com a MA permitem essa adequação. Ajustes automáticos de hardware e software, braços robóticos e

comunicação entre robôs de MA estão mudando os processos de fabricação (TOSHEV *et al.*, 2024).

A integração da extrusora à plataforma de MA robótica provou ser viável e vantajosa, oferecendo flexibilidade de processo e capacidade de produção aprimoradas se comparadas aos sistemas FDM existentes atualmente. Além de que, com a instalação de um controlador PID e uma comunicação de dados eficiente entre plataformas robóticas, o campo da manufatura aditiva abrirá novas possibilidades para a fabricação de peças complexas em larga escala.

Alguns estudos foram realizados usando-se a plataforma robótica conjugada com impressão de objetos de grande porte. No trabalho de Pulquerio, Barbosa e Shiki (2025), medidas dimensionais e modelos matemáticos de regressão foram utilizados para se adequar os parâmetros do processo para o fatiamento e a impressão de um objeto em 3D de grande porte, usando o polímero PLA. Os valores precisos da temperatura da mesa de impressão podem melhorar a resistência mecânica e a qualidade das peças produzidas, além da influência do aparecimento de gradientes térmicos na MA de peças de ABS (GONÇALVES *et al.*, 2024).

Outro ponto de interesse, é que com o aquecimento global, novas técnicas de fabricação tem entrado em estudo, para diminuir o impacto ao meio ambiente, e a técnica de MA, em contraste com a técnica de injeção em molde, tem sido estudo de alguns autores, além de ser um fato decisivo em relação a questões econômicas (MIDREZ *et al.*, 2024).

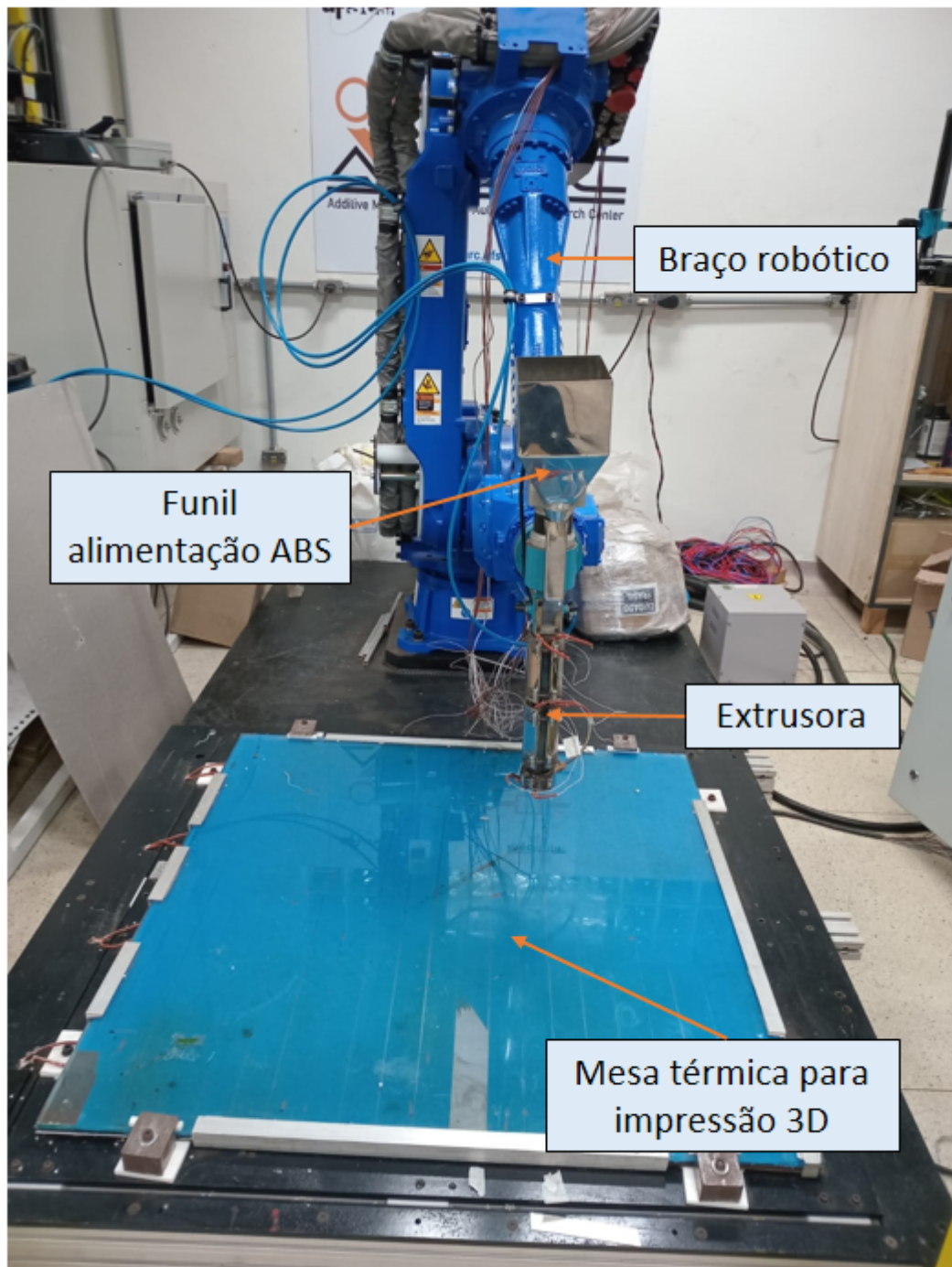
Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo principal desenvolver e implementar um sistema de aquecimento usando lâmpadas infravermelhas para garantir a qualidade do material na fabricação de peças de grande porte, além de que o valor de temperatura lido por meio de sensores, será monitorado e armazenado em um gravador de dados para posterior análise (*datalogger*), e também será enviado via comunicação sem fio para a rede de computadores. O projeto é conjugado com o processo de envio do sinal recebido pelo sensor, via *wireless*, para celulares ou outros computadores que abrirão portas para melhorias futuras onde o processo poderá estar conectado à rede e enviando os resultados via internet, podendo ser adaptado para a nova tecnologia em automação inteligente.

Para tal, foi utilizada uma célula de manufatura localizada no Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar que é composta por um robô da marca Yaskawa modelo Motoman® GP88 com controlador YRC1000 acoplado com uma extrusora monorosca da marca AX Plásticos®. 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. O material fundido na extrusora é depositado sobre uma mesa de impressão com controle térmico que permite a manutenção de patamares de temperatura de interesse na superfície.

A Figura 3 mostra a foto da célula de manufatura robotizada, onde se observa a extrusora conectada ao braço robótico. O funil alimentador de matéria-prima funciona por gravidade,

onde o material ao adentrar na extrusora é fundido na temperatura adequada de deposição. A mesa térmica de impressão se encontra no nível de referência para o controlador do robô. Outros acessórios, como mangueiras de refrigeração e a estufa de secagem da matéria-prima, se encontram em segundo plano na foto.

Figura 3 – Célula de manufatura aditiva robotizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentadas as utilidades atuais e perspectivas futuras da MA, os tipos de materiais e modos de extrusão, a influência da temperatura na cura do material e de que forma o processo complementar de aquecimento usando lâmpada infravermelho pode ajudar a melhorar as qualidades físicas do material impresso.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Os avanços na tecnologia em geral sempre são precedidos por dificuldades e problemas até então desconhecidos. A busca contínua por melhorias nas técnicas de fabricação, como redução de custos e melhor qualidade de produção, tem levado a novas descobertas para se amenizar esses problemas pois o processo de MA está sendo usado em muitos setores distintos de produção. No trabalho de Alami *et al.* (2023), MA é uma técnica que consiste em criar objetos juntando camadas de material no decorrer do tempo, onde as partículas de diferentes camadas sofrem um processo de interação de difusão por ação do calor ou produtos químicos, e o processo é repetido e ainda mais camadas são adicionadas. O processo de MA resulta em uma estrutura 3D complexa Volpato (2021), dependendo de como as camadas são vinculadas uma de cada vez. Como fica evidente no termo, o processo de manufatura aditiva integra a adição de matérias-primas para criar um design leve e robusto, geralmente livre de parafusos ou rebites.

Segundo Islam *et al.* (2024) avanços na tecnologia e na indústria de manufatura trouxe a necessidade de novidades e alternativas sustentáveis e econômicas para a produção de peças de baixo custo e em grandes quantidades. Por isso, tem sido usada em muitos setores, especialmente na área aeroespacial e na automobilística, onde 33% da MA é voltada para essas indústrias, e pode ser empregado para prototipagem rápida, criação de componentes e peças. Também é usado na criação de arcadas dentárias, biomedicina, arquitetura, área artística, têxtil, brinquedos, e até na fabricação de paredes e casas (KLOFT *et al.*, 2021) por meio de robôs especializados em imprimir concretos (BARJUEI *et al.*, 2022).

Existem diferentes tipos de tecnologia de manufatura aditiva, sendo os principais tipos a: Estereolitografia (SLA), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS) e a Fused Deposition Modeling (FDM). Esta última é a mais usada principalmente por *hobistas* devido a seu baixo custo, e é a técnica empregada na célula de Manufatura Robotizada onde foi feito o estudo.

Em relação à adoção da técnica, estudo publicado no "*Journal of Manufacturing Process*", revela o aumento no número de publicações de manufatura aditiva baseada em extrusão desde o ano de 2010. O gráfico demonstrado na Figura 4(a) representa o número de publicações em relação a MA baseada no processo de extrusão. A partir do ano 2020 houve um decaimento

das publicações devido a situação sanitária global que ocorreu na época, quando houve um decréscimo das pesquisas e publicações. A Figura 4(b) representa o número de publicações nos últimos 5 anos, ou seja, entre os anos de 2018 a 2022 onde é representado o material mais citado nos artigos, sendo que o material mais utilizado foram os polímeros (ALTIPARMAK *et al.*, 2022). A facilidade de obtenção dos polímeros ABS e PLA e a sua característica maleável e a grande faixa de trabalho fizeram esses materiais terem preferência dos demais. O PLA é um polímero termoplástico biodegradável e pode ser produzido a partir de fontes naturais renováveis como o açúcar de milho, batata e cana de açúcar um baixo impacto ambiental sem poluir o meio ambiente (NASER; DEIAB; DARRAS, 2021). Já o ABS é um polímero termoplástico obtido a partir de transformações de substâncias derivadas do petróleo, portanto, é um material de origem não renovável e é utilizado em uma variedade de aplicações devido às suas melhores propriedades mecânicas, invulnerabilidade química e acessibilidade. O PETG tem crescido em popularidade e tem uma temperatura de amolecimento maior do que o PLA. PEGT é um tipo de PET semi-cristalino. PP já é relativamente mole em relação a outros materiais. (CRESS *et al.*, 2021).

Segundo Gonzalez-Gutierrez *et al.* (2018), existem três modos de extrusão usados em MA, os mecanismos de alimentação são por pistão, filamento ou por rosca de fuso, conforme mostrado na Figura 5. O princípio básico da tecnologia da extrusão envolve o carregamento e a liquefação do material, pressionando o material através de um orifício pela aplicação de uma força ou pressão, aplicada sobre o material derretido que será depositado na forma de um filete ou cordão sobre uma camada já existente sobre a base de impressão. Por ser uma técnica que envolve muitas variáveis, essas precisam trabalhar em consonância para que os resultados sejam satisfatórios. Segundo Ahmad, Javaid e Haleem (2024), diversos parâmetros, entre eles a orientação de impressão, altura das camadas, ângulo raster, espaço vazio, velocidade de impressão, porcentagem de preenchimento e temperatura de extrusão são fatores que diretamente influenciam as propriedades mecânicas das peças produzidas pela técnica FPM.

2.1.1 Influência na adesão entre camadas

No processo de MA pela técnica FDM, a ligação entre cada camada de material depositado depende da energia térmica do material extrusado (SUN *et al.*, 2008). Porém, principalmente em impressões de grande porte, a diferença de temperatura entre camadas é que vai determinar a qualidade da difusão e consequentemente a qualidade do produto final. A solidificação e ligação entre as camadas é um fator importante a se considerar, pois assim se formará uma estrutura densa em que a forma e dimensões sejam exatamente as mesmas dos dados especificados no desenho efetuado no *software* CAD. A qualidade da adesão dependerá da área do pescoço formado entre as camadas e do entrelaçamento molecular. A Figura 6 mostra o processo de formação do entrelaçamento molecular: (a) contato entre superfícies; (b) formação do pescoço; (c) difusão molecular na interface e entrelaçamento.

Figura 4 – Evolução da MA e materiais usados.



(a)



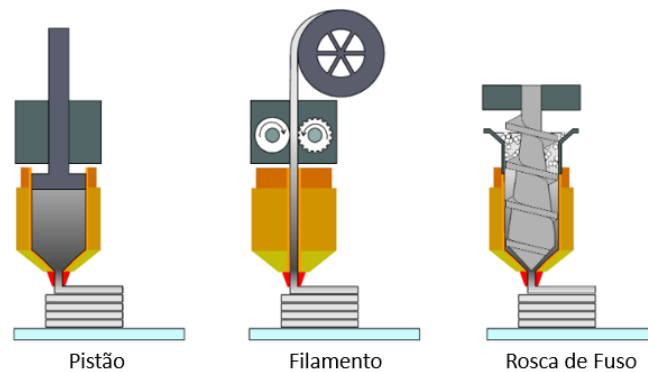
(b)

Fonte: Adaptado de Altıparmak *et al.* (2022).

Para garantir a formação de adesão entre camadas, é necessário que a camada anterior já previamente depositada esteja acima da temperatura vítrea (T_g) do material que está sendo depositado (KHANAFER *et al.*, 2022). A força de ligação dependerá da energia de adesão/coesão e tem ligação direta com a área do pescoço formada entre as camadas (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

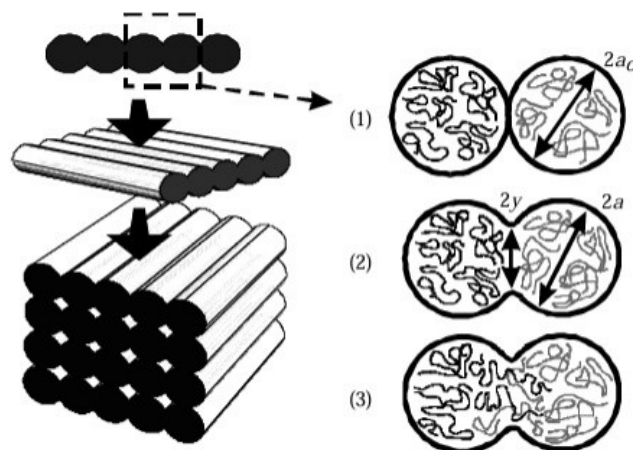
Para ocorrer a difusão das cadeias moleculares, a temperatura deve estar ligeiramente acima da temperatura de transição vítrea (T_g), o que leva a um alargamento do pescoço formado entre cada camada e a um aumento da difusão molecular, aprimorando assim as propriedades mecânicas (SUN *et al.*, 2008). As características físicas da peça MA pela técnica de extrusão

Figura 5 – Diferentes tipos e abordagens para fabricação aditiva baseada em extrusão.



Fonte: Adaptado de Gonzalez-Gutierrez *et al.* (2018).

Figura 6 – Processo da difusão molecular entre duas camadas.



Fonte: Adaptado de Sun et al. 2018.

dependerá da força de vínculo entre camadas vizinhas. A direção mais crítica em relação a adesão entre camadas, é justamente na direção Z de impressão, onde ocorre a somatória da interação entre camadas. As características físicas da peça fabricada pela técnica de extrusão dependerá da força de vínculo entre camadas vizinhas. De acordo com um texto de Castelló-Pedrero *et al.* (2024), os fatores que afetam a adesão entre camadas são muitos, entre eles a temperatura da extrusora, da mesa de impressão e da câmara de impressão, diâmetro e peso das camadas. A altura das camadas também é uma variável que pode ser ajustada no software de controle da impressora 3D e interfere no acabamento superficial da peça, pois diminui o efeito de escada, principalmente nas regiões convexas das peças. Camadas mais finas deixam a peça mais suavemente acabada. Já o uso de camadas mais altas deixam uma ondulação maior na direção perpendicular da impressão. Quanto mais finas as camadas a serem impressas, maior o tempo de impressão. Assim, as camadas mais grossas são impressas rapidamente.

2.1.2 Controle da temperatura

Existem duas fontes de calor que devem fornecer um valor crítico de temperatura, que são a temperatura da extrusora e da mesa de impressão. No presente estudo, por se tratar de uma impressora de MA por técnica FDM de grande porte, totalmente exposta às influências externas, como ventos e variações de temperatura ambiente, idealizou-se uma fonte de calor adicional usando-se lâmpadas infravermelhas.

Cada material polimérico, por serem formados por composições químicas muito diferentes, acabam tendo seus próprios parâmetros de temperatura. Como exemplo, o PLA é um polímero, porém feito de amido de milho, já o ABS tem composição à base de petróleo.

Portanto, a composição química da matéria-prima influencia diretamente sua temperatura vítrea (T_g), que é aquela onde ocorre a transição do material do estado vítreo no qual as moléculas da fase amorfa não possuem mobilidade para um estado "maleável" e dúctil em que as moléculas da fase amorfa possam ter mobilidade, possibilitando o processo de extrusão. Por isso, cada tipo de polímero é aquecido a uma temperatura diferente. Quando a temperatura de extrusão é muito baixa, o material derretido não flui adequadamente, causando lacunas, entupimentos e não aderência à mesa. Ao contrário, se for muito alta, o material pode se degradar e a peça terá uma fragilidade maior além do surgimento de "oozing" (aparecimento de fiapos).

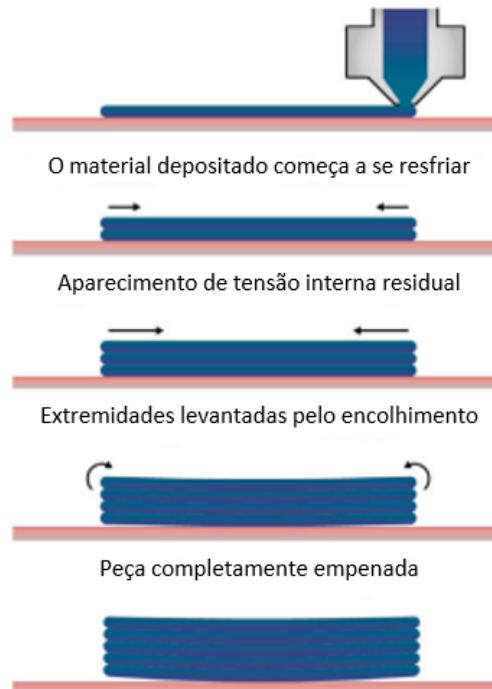
Além da temperatura da extrusora, cada tipo de polímero requer uma temperatura específica de aquecimento da mesa. Uma mesa aquecida na temperatura adequada garante que a primeira camada fique bem firme e a peça não se solte durante a impressão, pois Choi *et al.* (2016) determinou que existe uma temperatura ótima da mesa de impressão que contribui para a diminuição de erros de formato. Se a temperatura for muito elevada, isso faz com que as primeiras camadas da impressão sejam derretidas e a peça acaba por sair esparramando.

Em se tratando de manufatura aditiva de grande porte, com volumes acima de $1 m^3$, pesquisas realizadas através de análises dimensionais e de microscopia, determinou-se a necessidade de um controle preciso da temperatura da mesa de impressão e que variações afetam diretamente a qualidade da peça impressa (GONÇALVES *et al.*, 2024).

Uma deformação frequente que ocorre principalmente no material ABS, é conhecida por "warping", ou empenamento surge sempre que alguma parte da peça começa a se desprender da mesa e se deformar. Esse problema ocorre pois quando a impressão começa as camadas inferiores estão próximas à mesa, recebendo calor dessa. Então, elas permanecem aquecidas durante toda a impressão. Já as camadas sobrepostas a essa primeira, vão se resfriar, gerando uma contração, fazendo com que essa camada puxe as inferiores no sentido central da peça, principalmente nas extremidades, Zhou *et al.* (2020), Samy *et al.* (2021), e é mais recorrente em impressoras 3D abertas, sujeitas ao resfriamento natural do ambiente. Muitos estudos foram feitos para se detectar as causas do empenamento, que ocorrem principalmente nos cantos das peças Brion, Shen e Pattinson (2022), porém, de modo geral, o grau de empenamento depende

de fatores como a temperatura da mesa de impressão, tipo de material e número de camadas e o tamanho da peça (SALUJA; XIE; FAYAZBAKSH, 2020).

Figura 7 – Visão do processo de empenamento.



Fonte: Adaptado de: Brion et al. 2022.

De acordo com Santana *et al.* (2018) citado em um artigo na "Revista Matéria" foram comparadas as propriedades mecânicas, térmicas e químicas do PLA e PETG indicando onde cada um pode ser utilizado com melhores resultados. Termicamente, o PLA possui uma temperatura vítrea entre 55 a 65 °C e quando semicristalino um ponto de fusão no intervalo de 170 a 180 °C.

2.2 AQUECIMENTO POR LÂMPADAS INFRAVERMELHAS

Segundo Çengel (2007), a radiação infravermelha possui uma frequência menor do que a frequência da luz vermelha, que é a menor das frequências das luzes visíveis. É um tipo de radiação não prejudicial por não ser de caráter ionizante, e sim de excitação molecular. A propagação da radiação infravermelha ocorre em linhas retas, a partir de sua fonte, se espalhando igualmente em todas as direções, sendo que a intensidade da radiação a partir de uma fonte em um ponto é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte (SCHIMIDT *et al.*, 2006).

$$I \propto k/d^2 \quad (1)$$

Onde: I = Intensidade, k é uma constante de proporcionalidade e d = distância.

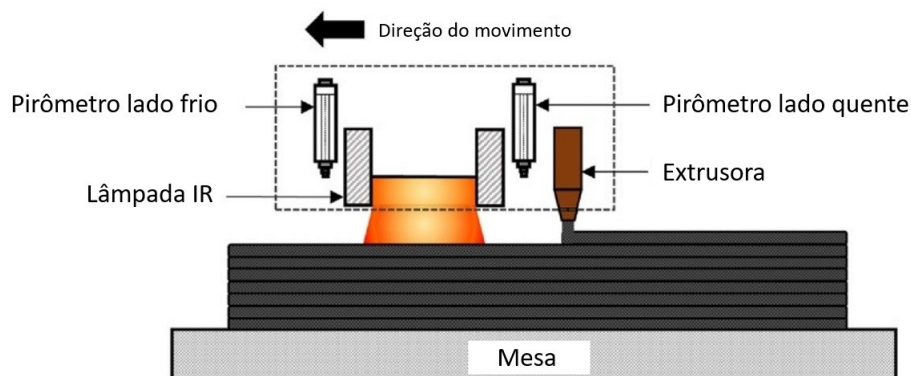
Por conseguinte, a distância entre o corpo de prova a ser aquecido e a distância desta até a fonte de calor deve ser levada em questão nos testes a serem efetuados, pois a variação da

distância levará a resultados diferentes, que podem ser catalogados e estudados posteriormente via análise gráfica.

A cor da luz que possui maior temperatura é aquela cuja frequência da onda é ligeiramente menor que a da luz vermelha, daí vindo então a origem do seu nome, e cuja radiação foi a partir de então estudada para ser usada como uma forma de aquecimento (OLIVEIRA; SILVA, 2014).

Muitos trabalhos utilizaram o sistema de aquecimento via lâmpada infravermelha para melhorar a adesão entre camadas com o propósito de aumentar a adesão, pois, quando no processo de impressão as camadas vão sendo sucessivamente depositadas na direção Z, o tempo de deposição entre uma camada e a seguinte pode durar até alguns minutos, principalmente em se tratando de manufatura aditiva de grande porte, resultando em uma dureza mecânica do material que pode ser até 50 a 70% do que nas direções X e Y (NYCZ *et al.*, 2020). Nesses estudos, tanto a temperatura da cabeça da impressora quanto a velocidade de impressão foram mantidas constantes, variando-se apenas a temperatura ocasionada por aquecimento infravermelho em determinadas regiões, e por resfriamento em outras.

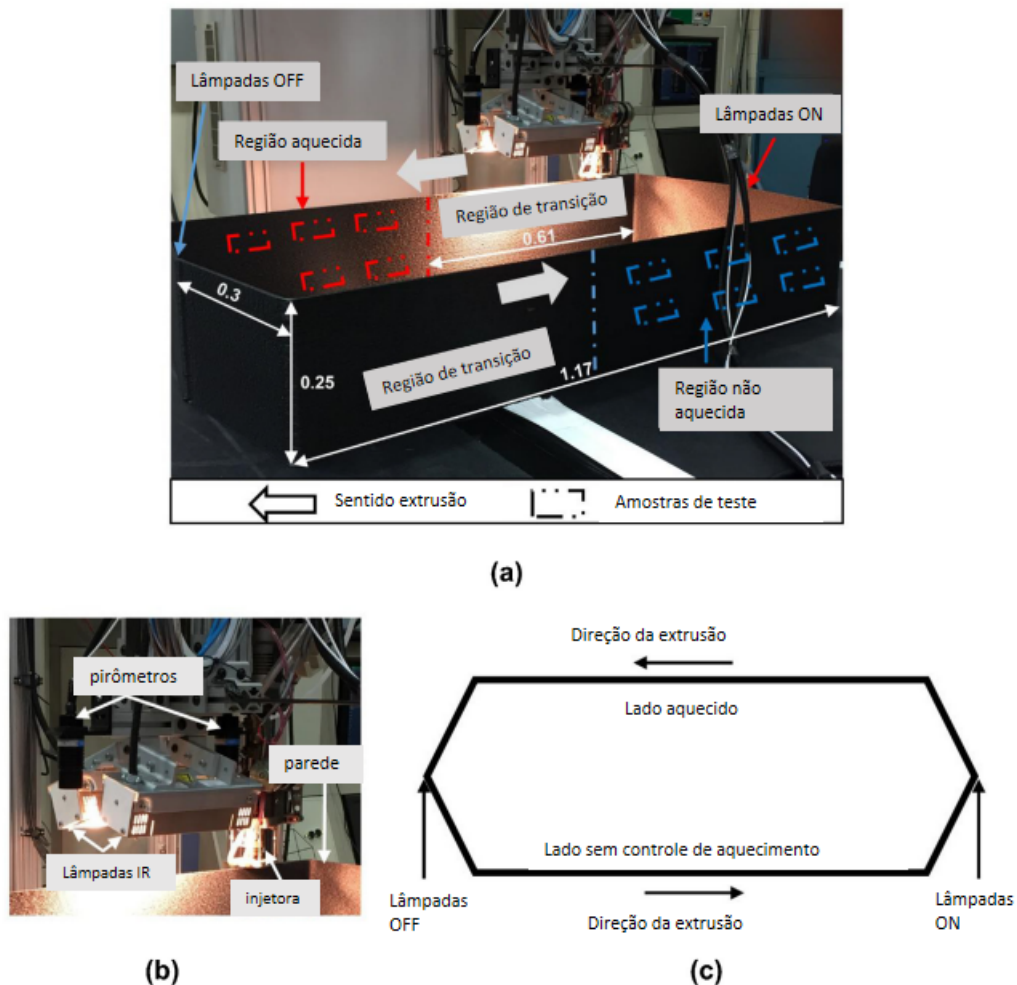
Figura 8 – Diagrama do experimento.



Fonte: Adaptado de: Kishore et al. 2017.

O experimento, mostrado na Figura 8, estudou o efeito de se aquecer a última camada já impressa antes da deposição da camada seguinte logo acima através do uso de lâmpada infravermelha. O aparato se movia em conjunto e consistia em um pirômetro medindo a temperatura antes do aquecimento da lâmpada e um segundo pirômetro após a passagem da lâmpada, medindo a temperatura ocasionada pela lâmpada. Foi construída uma parede no formato hexagonal, sendo que um lado era impresso com a lâmpada acesa, e no outro lado era impresso com a lâmpada apagada. A Figura 9(a) representa o *setup* geral, a Figura 9(b) o aparato de aquecimento e a Figura 9(c) o modelo da parede hexagonal. Os testes feitos revelaram que o aquecimento por técnica infravermelha em Manufatura Aditiva de Grande Porte é uma sugestão para a melhoria na resistência entre camadas. Porém, nesse estudo, a potência da lâmpada infravermelha, no período em que ficava ligada, permaneceu com o valor de sua potência constante, não havendo

Figura 9 – Fotos do equipamento e representação do modelo da parede hexagonal.



Fonte: Adaptado de: Kishore et al. 2017.

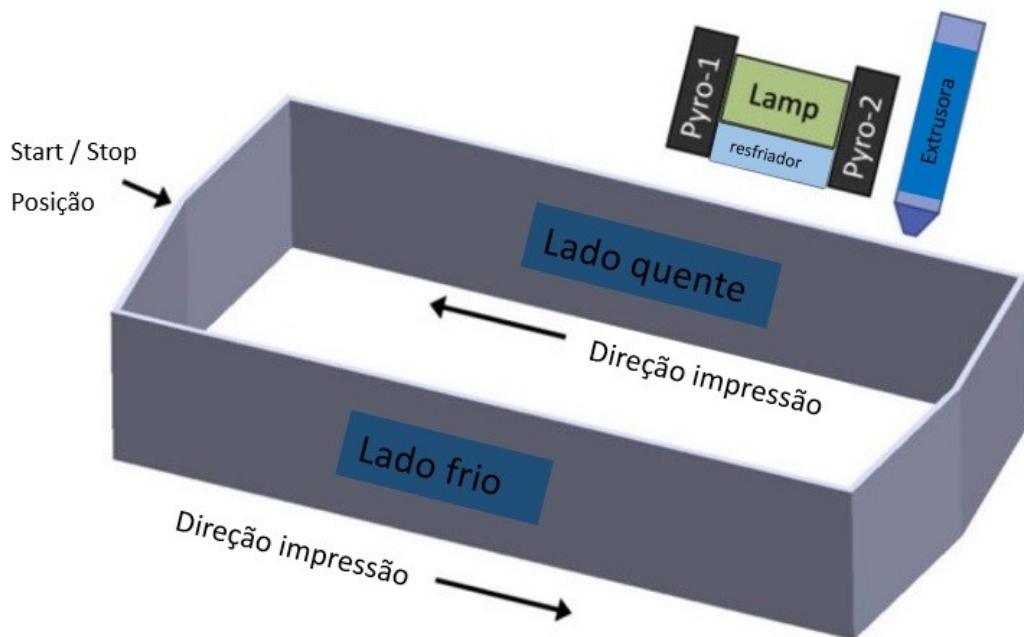
um controle dessa temperatura (KISHORE *et al.*, 2017).

Quando é feita a deposição de um material que está sendo injetado pelo bico da extrusora e sendo depositado em cima de uma camada já existente, podem ocorrer variações na qualidade da ligação que se forma entre as camadas, principalmente se o intervalo entre deposições for muito grande. É a temperatura local, justamente no ponto onde se formou o pescoço entre camadas, a responsável pela movimentação da cadeia de polímeros, responsável pela soldagem das camadas adjacentes, porém, essa temperatura cai abaixo da de transição vítrea em um tempo menor de 2 segundos, o que interrompe a interdifusão (SOLA *et al.*, 2023), daí a necessidade de se manter a temperatura a um nível adequado por um tempo maior.

Um outro método experimental, mostrado na Figura 10, usa uma lâmpada infravermelha conjugada com um *cooler* resfriador, conjugados em um único módulo em um Sistema de Impressão 3D de Grande Porte montando uma parede também na forma hexagonal, onde no

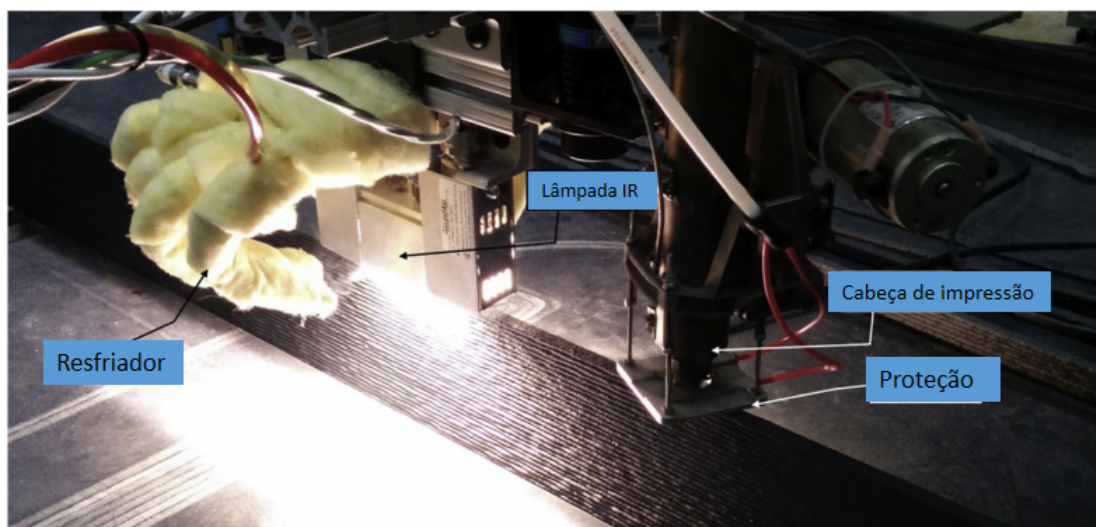
lado quente da parede a lâmpada infravermelha era ligada e as temperaturas antes e depois do aquecimento da camada já existente eram medidas, simulando assim um caso em que o tempo de impressão entre camadas era pequeno. No lado frio da parede, a lâmpada infravermelha era desligada e o *cooler* fazia o resfriamento da camada já impressa, simulando um caso em que o tempo de impressão entre camadas era bem grande. A Figura 11 mostra a montagem. O experimento demonstrou ser um modo efetivo de se aumentar a resistência entre camadas (NYCZ *et al.*, 2020).

Figura 10 – Fotos da parede hexagonal para o experimento com lâmpada infravermelha.



Fonte: Adaptado de Nycz *et al.* (2020).

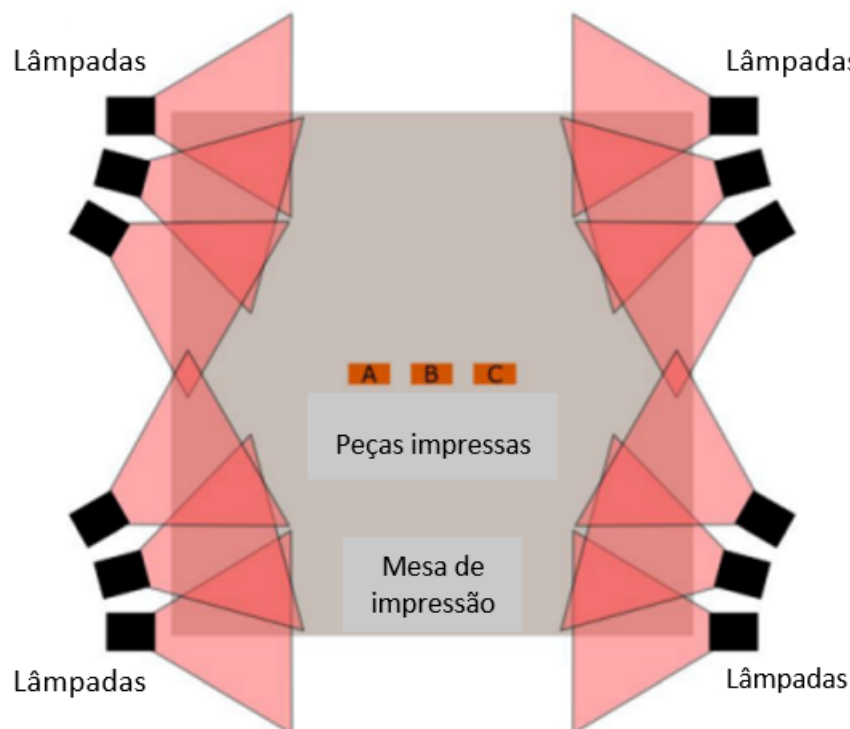
Figura 11 – Fotos da montagem experimental.



Fonte: Adaptado de Nycz *et al.* (2020).

Sistemas de impressoras de código aberto estão sendo desenvolvidos para fabricantes *makers* mas estão limitadas a trabalharem com baixas temperaturas de transição vítrea e baixa temperatura de impressão, o que limitaria o uso de materiais que necessitam de valores mais altos de temperaturas. Portanto, impressoras aquecidas com energia infravermelha focada na peça, permitirá ao material atingir a temperatura desejada, além de reduzir o consumo de energia elétrica de aquecimento tradicional usando resistências (GARDNER *et al.*, 2022). A Figura 12 mostra o desenho esquemático da montagem.

Figura 12 – Esquemático da área de impressão aquecida por lâmpadas infravermelhas.



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

2.3 RESISTÊNCIA, ACABAMENTO E CARACTERIZAÇÃO

Embora a impressão 3D tenha crescido nos últimos anos, ela ainda apresenta algumas desvantagens se comparadas com os modos de fabricação tradicionais como a usinagem, pois algumas características mecânicas como rugosidade, precisão, módulo elástico e resistência à tração final da peça ainda precisam sofrer melhorias. Alguns fatores principais que afetam a qualidade são a altura e espessura das camadas, velocidade de impressão, orientação do ângulo de impressão e temperatura.

Espessura da camada: As peças são impressas camada por camada, sendo que a espessura é definida no código do fatiador da impressora. Sendo assim, é a somatória física das camadas que vão determinar o tamanho da peça impressa na direção do eixo Z. Assim, uma espessura bem fina das camadas seria o ideal, pois gera um produto com menor rugosidade, mas o

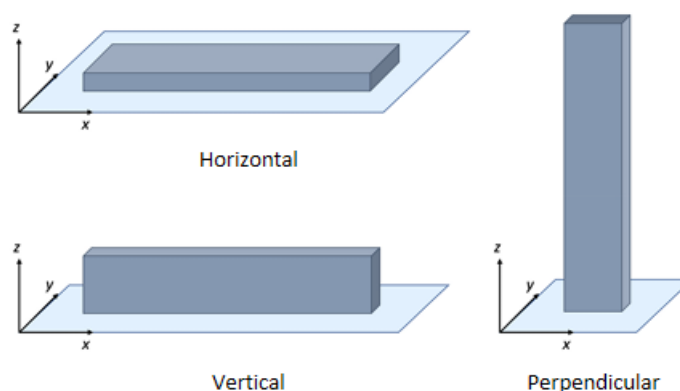
tempo de impressão aumentaria muito. A espessura da camada é um importante parâmetro que influencia nas características mecânicas do material (SYRLYBAYEV *et al.*, 2021). As variações de espessura da parede e a altura da camada afetam muito a rugosidade (YADAV *et al.*, 2023). Porém, em relação à resistência e tração, em algumas pesquisas executadas com ABS e PLA, o fato de aumentar a espessura da camada não necessariamente melhorava a resistência à tração, pois outros fatores, como densidade do material e temperatura, são fatores determinantes (SHARMA; SHARMA; KALA, 2019), (RANKOUHI *et al.*, 2016).

Velocidade de impressão: A velocidade tem grande importância nas propriedades mecânicas. Se for muito alta, acima de 80mm/s, não dará tempo de ocorrer a fusão e o entrelaçamento dos filamentos no processo de difusão, porém se a velocidade for mais baixa do que 20 mm/s, o material adquirirá melhores qualidades mecânicas, mas o tempo de impressão aumentará muito (MIAZIO, 2019). Uma sugestão de aumento de velocidade de impressão foi a de se colocar duas ou mais extrusoras trabalhando em paralelismo para a confecção de uma mesma peça (TAIWO; PAUL; HICKS, 2024).

Orientação da impressão e ângulo raster: O parâmetro do ângulo raster é um elemento que oferece resultados otimizados na manufatura aditiva. É um parâmetro que determina o ângulo dos trajetos seguidos durante a deposição das camadas.

Muitas limitações mecânicas nas propriedades físicas estão relacionadas geralmente ao tipo de material, tipo de processamento e geometria do impresso (RANE, 2019). Alguns outros fatores que influenciam muito essas características do produto acabado são a direção do sentido de impressão e o ângulo *raster*. A resistência mecânica, qualidade superficial podem sofrer variação da forma como o modelo foi posicionado para imprimir.

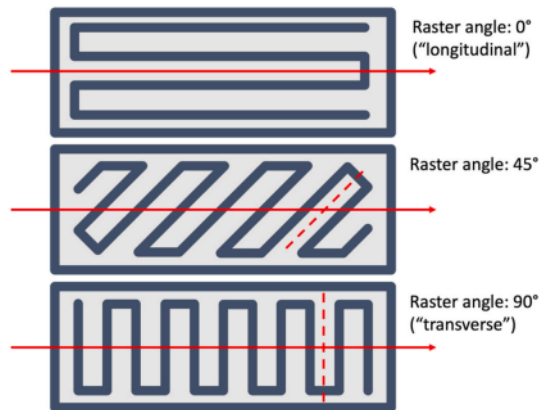
Figura 13 – Direções de impressão.



Fonte: Adaptado de Hanon et al. (2020).

Estudos realizados determinaram o efeito da direção de impressão e da variação do ângulo *raster* na qualidade da peça. Nesses estudos, os corpos de prova foram manufaturados de acordo com a geometria padronizada da norma ASTM e posteriormente foram feitos testes

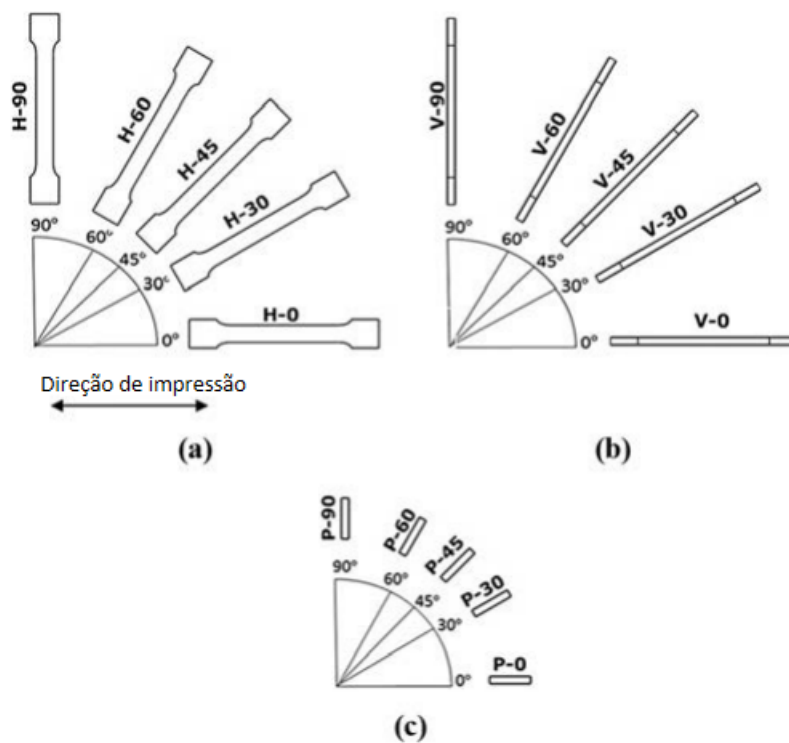
Figura 14 – Ângulos raster.



Fonte: Adaptado de Durgun et al. (2014).

de tração e deformação mecânica. A Figura 13 mostra as direções de impressão, sendo elas as direções horizontal, vertical e perpendicular. Já a Figura 14 representa três ângulos raster mais usados.

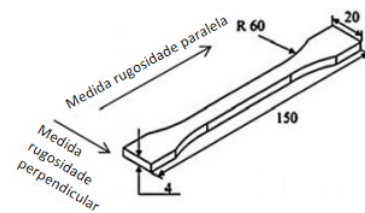
Figura 15 – Ângulos raster.



Fonte: Adaptado de Durgun et al. (2014).

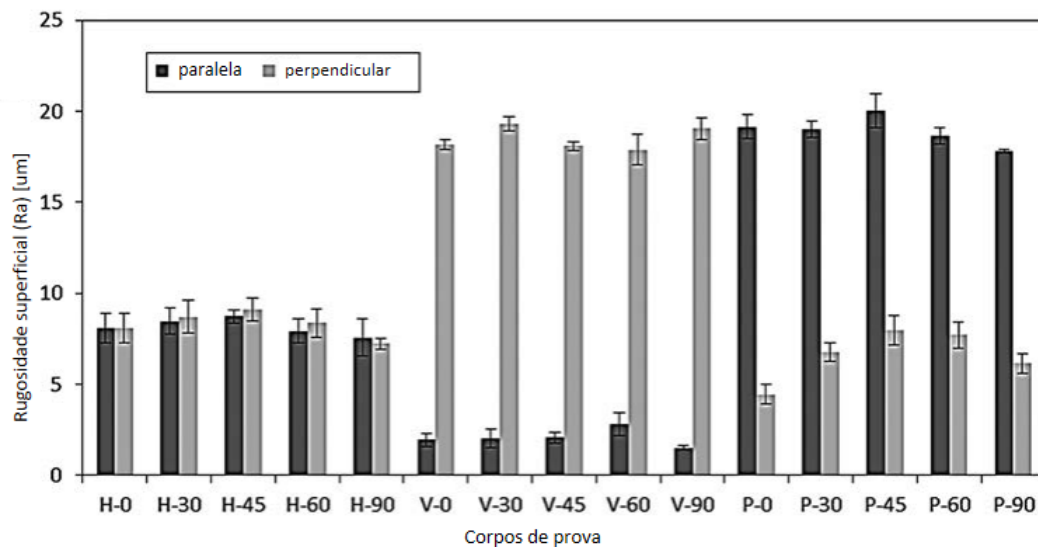
No experimento realizado, cinco corpos de prova de tração com diferentes ângulos raster (0°, 30°, 45°, 60°, 90°), representados na Figura 15, foram foram construídos para três

Figura 16 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Adaptado de Durgun et al. (2014).

Figura 17 – Medidas paralelas e perpendiculares do índice de rugosidade superficial.

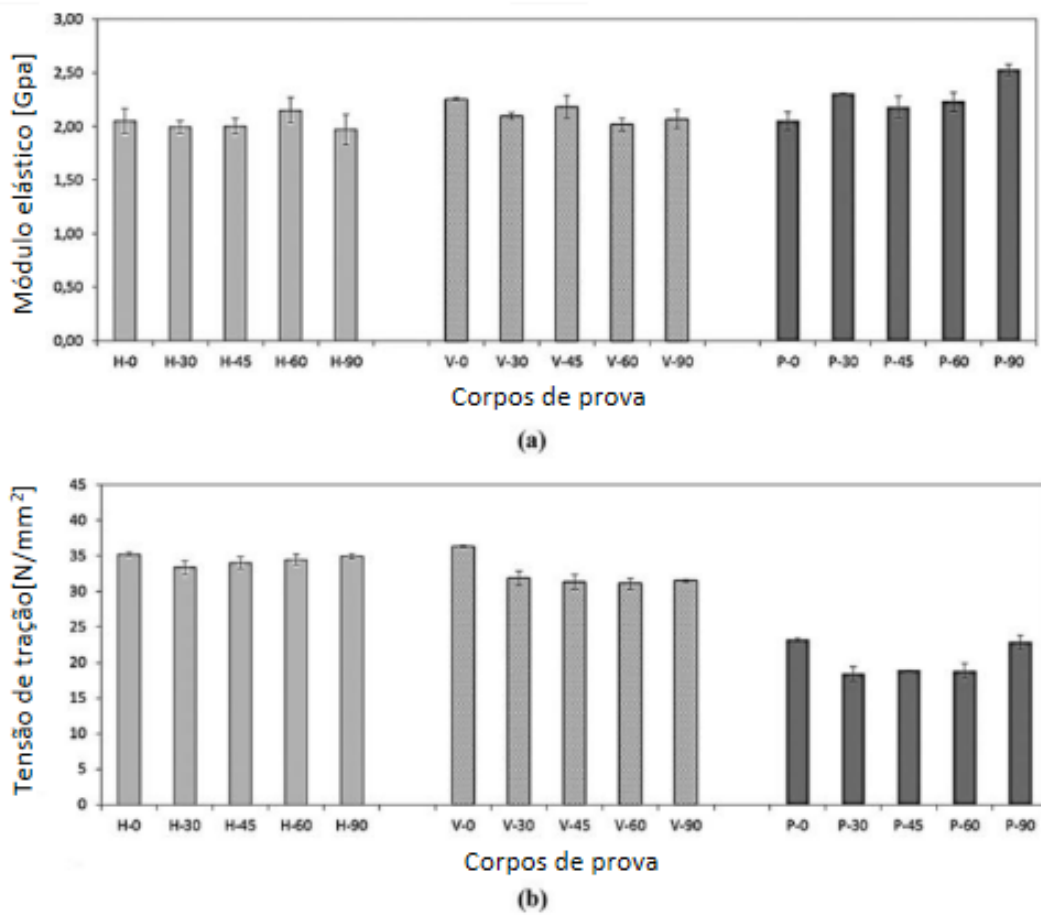


Fonte: Adaptado de Durgun et al. (2014).

orientações de construção (horizontal, vertical e perpendicular) e testados quanto a rugosidade da superfície, resistência à tração e flexão. O material usado foi o ABS, e as medidas foram tomadas tanto na direção perpendicular quanto paralela ao corpo de prova (DURGUN; ERTAN, 2014). Concluiu-se, segundo análise gráfica do índice de rugosidade, que a superfície mais lisa foi obtida na medida do modelo vertical com a medida feita na direção vertical e em particular, o módulo de elasticidade na medida perpendicular deu um alto valor se comparado com as medidas horizontal e vertical, porém a medida de tração deu um baixo valor. Disso resulta que na impressão 3D usando a técnica FDM, as peças produzidas possuem propriedades físicas como tensão e tração que variam dependendo da direção em que são medidas. Por isso elas são mais fortes nas direções XY do que na direção Z. O eixo Z é o mais fraco por causa da separação entre camadas, onde a delaminação ocorre com mais frequência (LAMBERT, 2014).

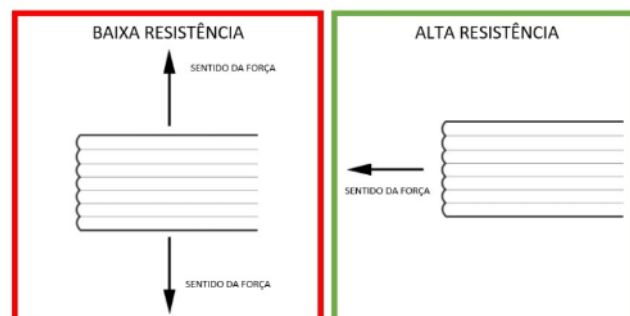
Também, ambos autores, Ziemian, Sharma e Ziemian (2012) e Casavola *et al.* (2019), fizeram comparações com diferentes ângulos raster e concluíram que os melhores resultados foram encontrados com ângulos raster de 0° , e os piores com ângulo raster de 90° devido à relação de adesão entre camadas.

Figura 18 – Resultados dos testes elásticos e de tração.



Fonte: Adaptado de Durgun et al. (2014).

Figura 19 – Resistência nos eixos XY e Z.



Fonte: Adaptado de: 3DLAB-Soluções em impressões 3D.

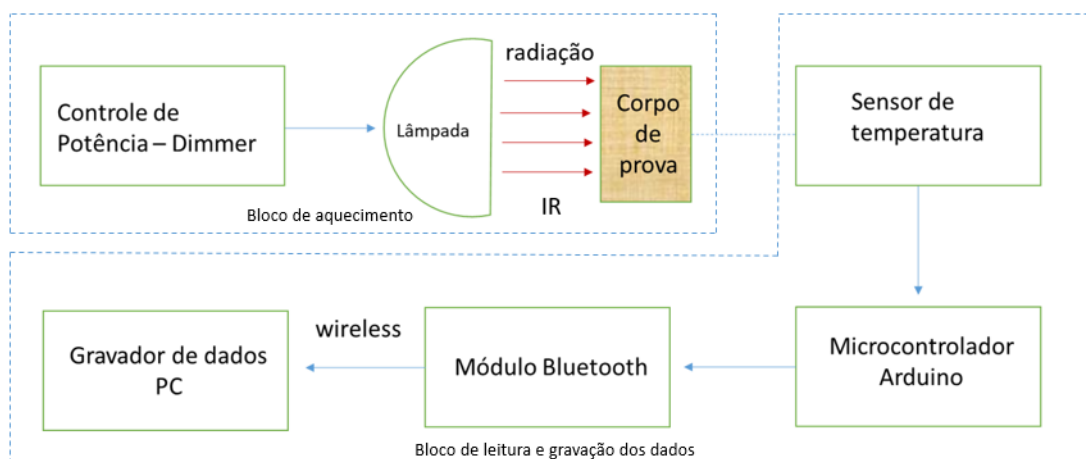
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A radiação IR auxiliar aplicada ao polímero na área de deposição ao longo do caminho de impressão aquecerá o material, favorecendo a difusão molecular e melhorando o aspecto da interface depositada. Conseqüentemente, a técnica de aquecimento eliminará defeitos estruturais e ajudará a melhorar a resistência mecânica (LEWIS; MOORE *et al.*, 2021). Para o estudo e avaliação dessa modalidade de aquecimento, foi montado um dispositivo de aquecimento e verificação do comportamento da temperatura no momento da impressão, e os dados são armazenados para a posterior geração de gráficos de Temperatura x Tempo. O sistema é constituído por dois blocos, podendo operar em conjunto (aquecimento e verificação da temperatura), ou separadamente, conforme as necessidades. O diagrama em blocos da Figura 20 mostra uma visão em blocos geral do processo. Em linhas gerais, o funcionamento é o seguinte:

No **bloco de aquecimento**, o controlador de potência é ajustável, podendo dessa forma controlar a potência da lâmpada emissora de radiação infravermelha, que se encontra em um refletor específico, aquecendo, dessa forma, o corpo de prova (no caso do presente trabalho, peças de ABS ou PLA).

No **bloco de leitura e gravação dos dados**, um sensor de temperatura sem contato faz a leitura da temperatura da peça e envia um sinal elétrico correspondente ao valor da temperatura para um microcontrolador, onde o sinal é convertido em um valor de temperatura, que pode ser visualizado em um visor ou enviado, via módulo Bluetooth, para um gravador de dados.

Figura 20 – Diagrama em blocos do processo de aquecimento, leitura e gravação dos dados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

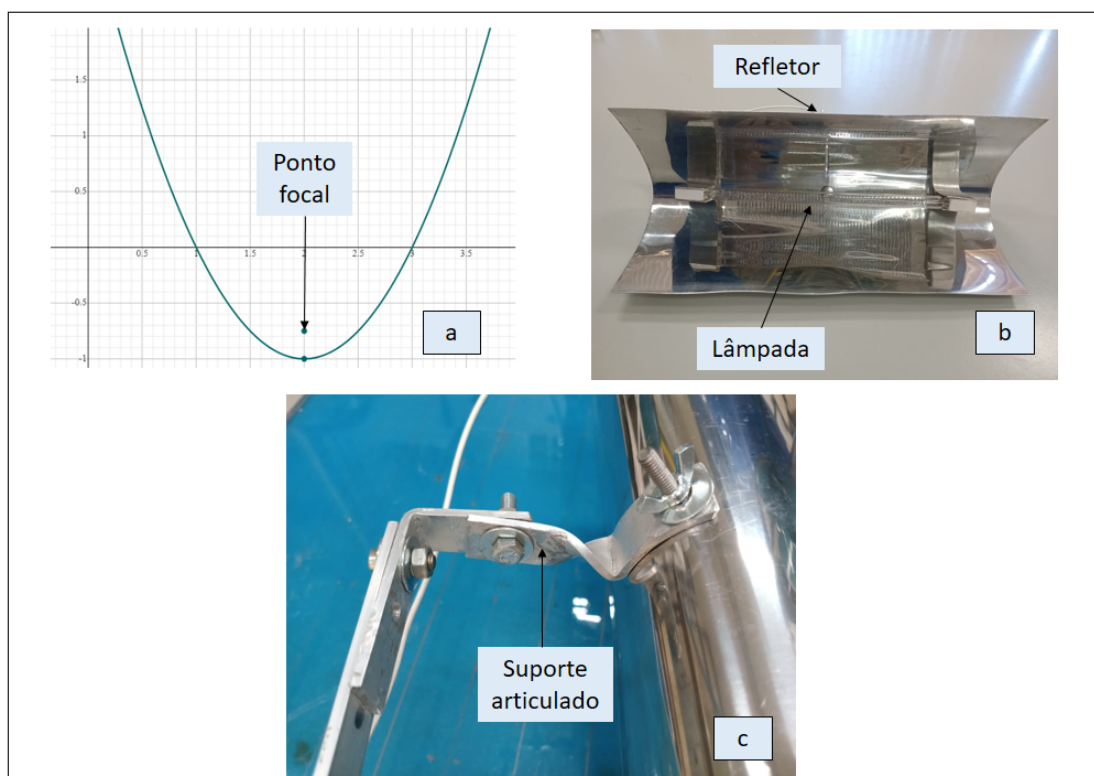
3.1 INSTRUMENTAÇÃO PARA O AQUECIMENTO E MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

3.1.1 Descrição do bloco de aquecimento

Para os testes preliminares e sua instalação na célula de Manufatura Aditiva, utilizou-se a seguinte montagem:

- Emissor de radiação infravermelha: Uma lâmpada tubular emissora de radiação infravermelha (IR) da marca "Lite Thonics", 120 V / 500 W, modelo SK15 instalada no ponto focal de um refletor parabólico confeccionado com chapa de aço Inox polida, garantindo um melhor aproveitamento da radiação na direção desejada. Empiricamente, e por questões de adequações técnicas, a curvatura do refletor seguiu, o formato da parábola, gerado pela equação quadrática $y = x^2 - 4x + 3$, representada na Figura 21(a), com a lâmpada posicionada aproximadamente no ponto focal da mesma. Na Figura 21(b), é representada a foto do refletor com a lâmpada instalada, e na Figura 21(c), o suporte articulado da mesma.

Figura 21 – Lâmpada e respectivo refletor, sendo: a) parábola que rege a curvatura do refletor; b) refletor e lâmpada; c) suporte articulado.

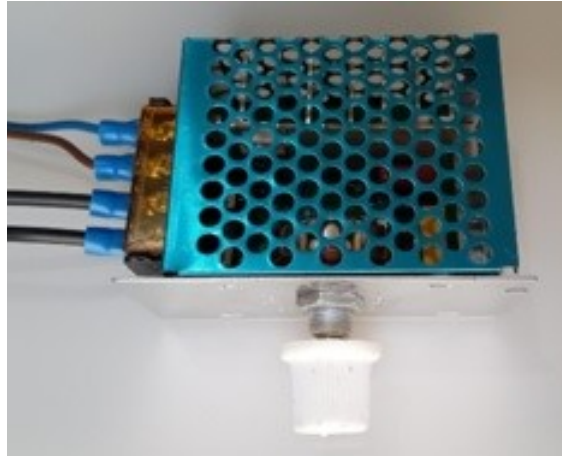


Fonte:Elaborada pelo autor.

- *Dimmer* controlador de potência: Um *dimmer* de 2000 W foi usado para controlar a potência emitida pela lâmpada, podendo com isso conseguir uma temperatura ideal para o

trabalho. Variando-se manualmente um potenciômetro, se consegue variar a potência das lâmpadas, desde um valor desligado até o seu máximo.

Figura 22 – Módulo controlador de potência - *Dimmer*

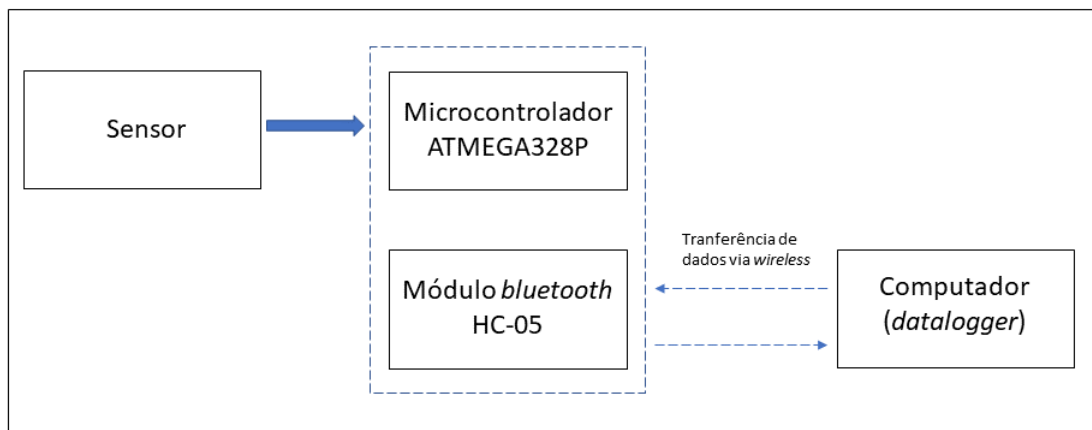


Fonte:Elaborada pelo autor.

3.1.2 Descrição do bloco de aquisição e gravação dos dados

O diagrama reduzido mostra, em linhas gerais, a instrumentação mínima necessária que foi utilizada para a coleta dos dados de temperatura ao longo do tempo. Os componentes mostrados em destaque na Figura 23 foram montados em uma placa específica para prototipagem eletrônica, sendo robusta e de rápida e fácil montagem. A placa microcontrolada contém o microcontrolador Arduino Nano que recebe o sinal do sensor, o processa e o envia via conexão sem fio *bluetooth*, para o computador, onde os dados podem ser lidos em tempo real ou armazenados para posterior análise. Também, incorporado a ela, se encontra o visor LCD.

Figura 23 – Diagrama reduzido da instrumentação e IOT.

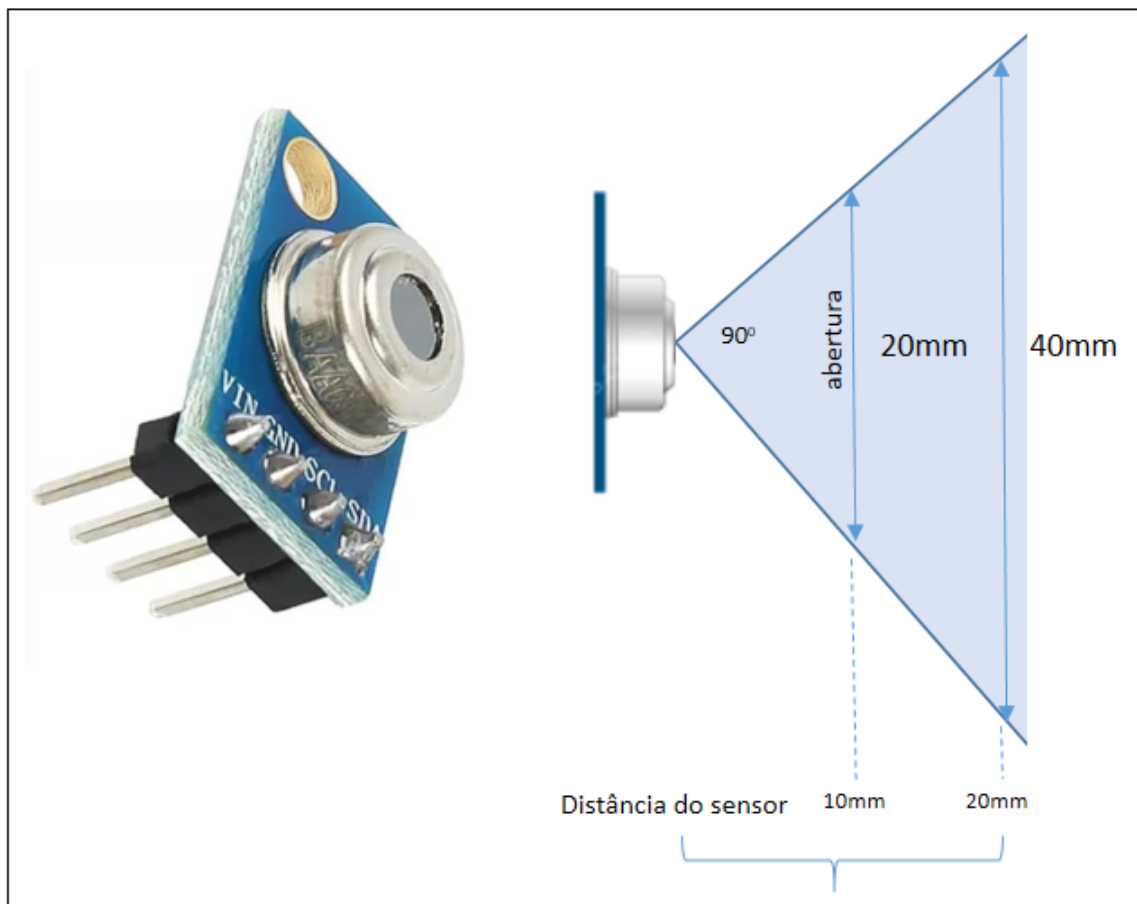


Fonte: Elaborada pelo autor.

- Sensor de temperatura IR MLX90614 - Este sensor faz a análise térmica da temperatura. É um componente que detecta a temperatura corporal ou de objetos por infravermelho a distância, sem ser necessário o contato direto com o objeto ao qual desejamos saber a temperatura, sendo uma tecnologia acessível de baixo custo. O campo de visão do sensor é da forma de um cone com abertura de aproximadamente 90° . Isto significa que se a distância do objeto aumenta de 10 mm, o diâmetro da área lida aumenta para 20 mm.

Especificações: Constituído por um controlador MLX90614ESF; Saída com resolução de 10 bit PWM; Faixa de temperatura de -40 a 125°C ; Precisão de aproximadamente $0,5^\circ\text{C}$; Tensão de operação entre 3 a 5 VDC.

Figura 24 – Sensor de temperatura MLX90614.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Microcontrolador Arduino: O Arduino Nano é uma plataforma constituída pelo microcontrolador Atmel ATMEGA328P, é compatível com uma infinidade de componentes, sensores e módulos presentes no mercado, sendo ideal para se conectar a sensores de temperatura. Os microcontroladores Arduino são programados em linguagem C/C++ com alguns comandos próprios e seu ambiente de desenvolvimento o Arduino IDE.

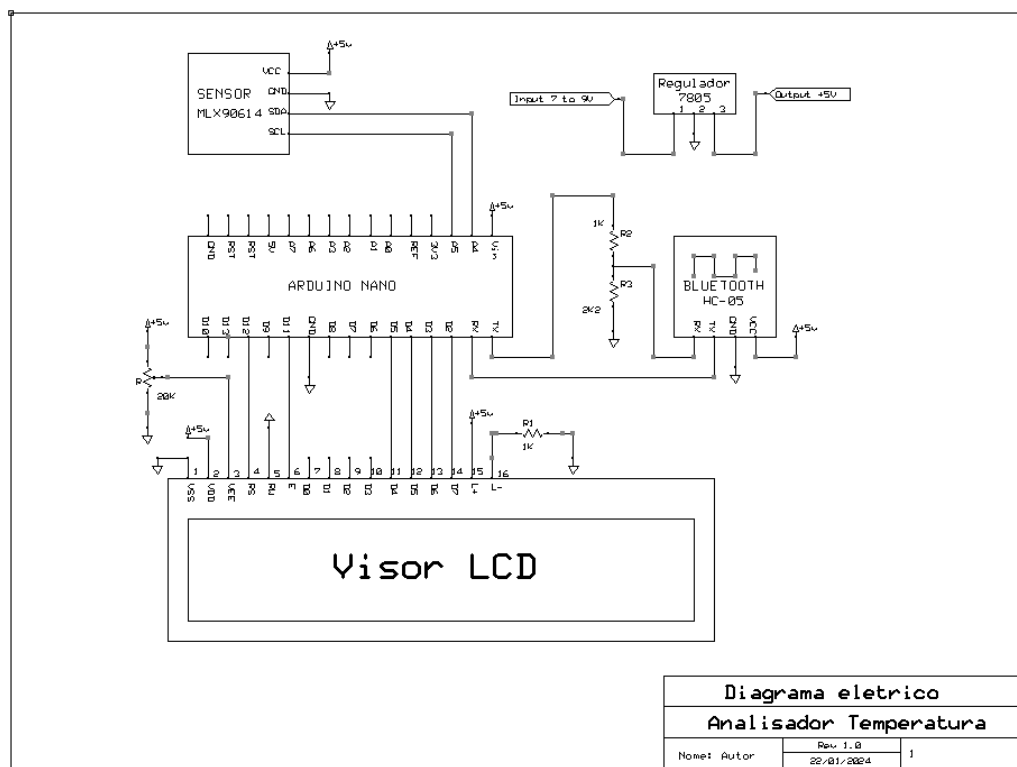
- **Módulo Bluetooth:** É um módulo para a comunicação de dados sem fio e é usado na criação de comunicação *wireless* para troca de informação entre dispositivos que se encontram próximos entre si, até uma distância de 10 m.

3.2 PLACA DA COLETA DO SINAL, VISUALIZAÇÃO DOS DADOS E ARMAZENAMENTO REMOTO

Os componentes eletrônicos foram montados em uma placa padrão desenvolvida para prototipagem eletrônica.

- **Módulo Eletrônico Microcontrolado:** A placa analisadora de temperatura é constituída pelo microcontrolador Arduino Nano que faz a leitura da temperatura da peça via sensor MLX90614 e envia essa informação tanto para o visor LCD onde pode ser feita uma mensuração *onboard* instantânea do valor da temperatura ou também via comunicação *bluetooth* para um computador onde os valores da variação de temperatura podem ser registrados e transformados em gráficos para posterior análise. No microcontrolador, o *firmware* é reprogramável, e pode ser reescrito conforme for sendo necessário.

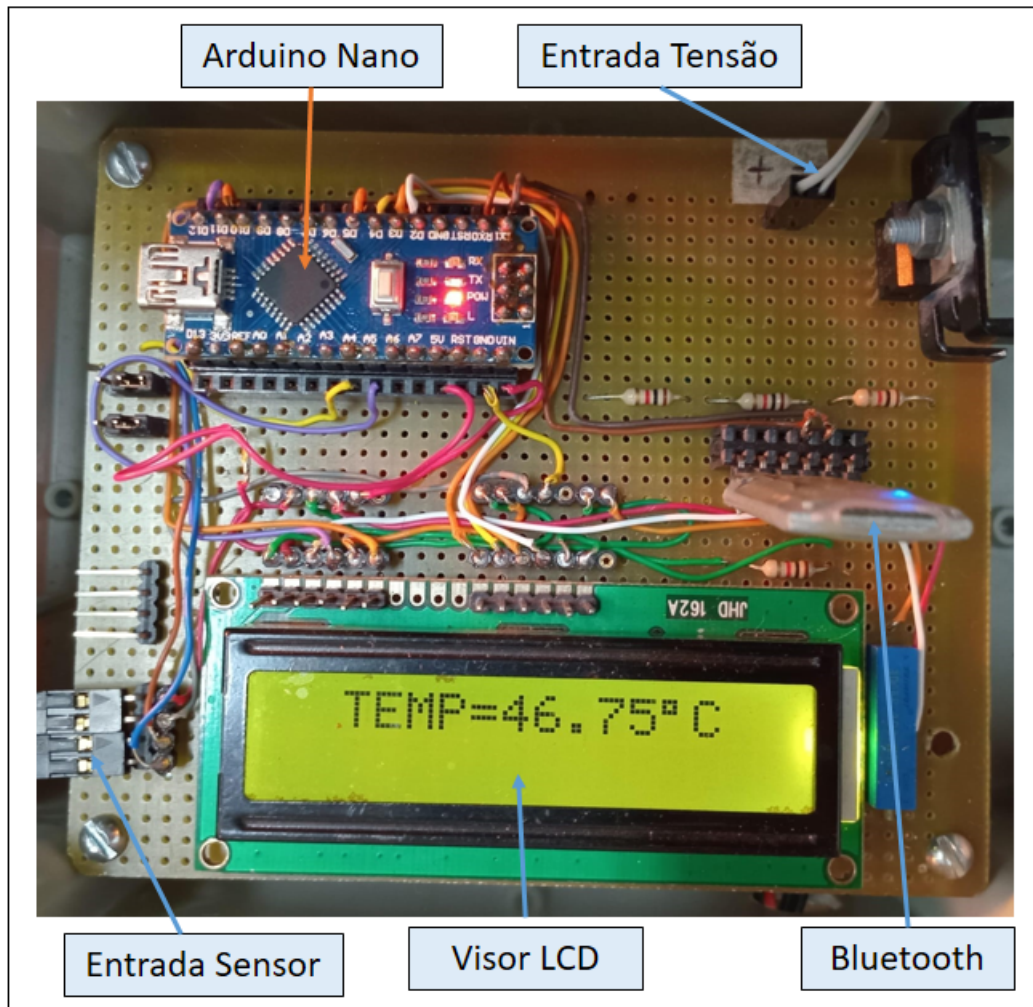
Figura 26 – Diagrama elétrico do Módulo Eletrônico Microcontrolado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Explicação da placa: Nela foi montado o circuito eletrônico de aquisição e envio dos dados para o PC, cujo diagrama foi desenhado usando o *software* ExpressSCH, e contém os seguintes componentes, excetuando-se os já mencionados:

Figura 25 – Módulo Microcontrolado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

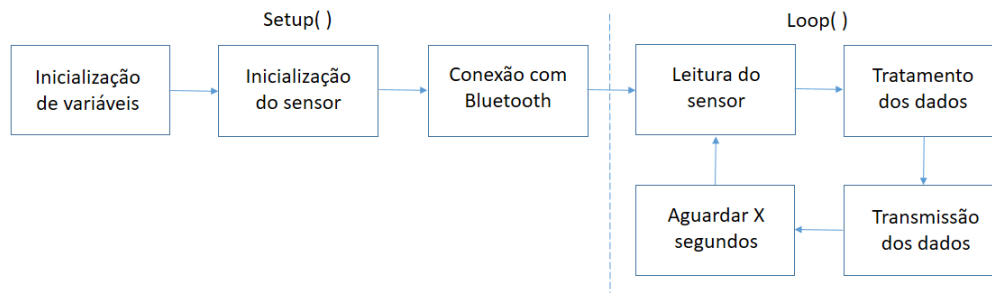
- Visor LCD: O visor LCD serve como um modo de exibição visual para exibir caracteres, letras e números, usado em projetos em que o usuário precisa de uma resposta visual. Ou seja, é possível visualizar números, sinais que indicam o que está sendo realizado no projeto, e quais dados estão sendo transmitidos. Especificações: LCD 16x2 JHD162A, contando com 16 colunas e 2 linhas de escrita.
- Regulador de tensão: O regulador de tensão LM7805, recebe a tensão elétrica vinda da fonte, e adequa essa tensão para a alimentação dos componentes da placa e do sensor infravermelho.

3.3 SOFTWARE UTILIZADO

O código utilizado foi escrito na linguagem C utilizando-se o Arduino IDE 1.8.5. e se encontra no APÊNDICE B. De forma resumida, após a inicialização do sensor e da conexão com o módulo bluetooth, na etapa de *setup*, o Arduino entra em um *loop* infinito no qual

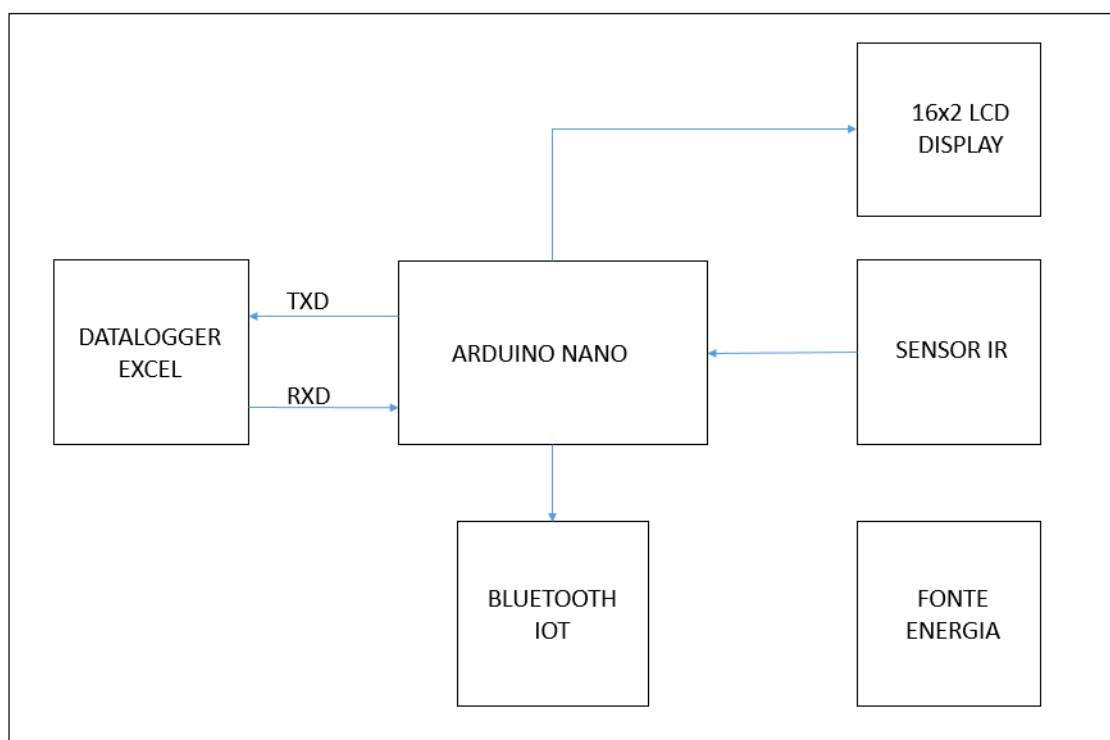
realiza a leitura do sensor, tratamento e envio dos dados. Existe a opção de mudança entre os tempos de aquisição, simplesmente através de uma chave.

Figura 27 – Diagrama em blocos software.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Diagrama em blocos do Módulo Eletrônico Microcontrolado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 ARMAZENAMENTO DE DADOS

- Registro de dados (*datalogger* Excel): Todo microcontrolador conectado a qualquer sensor e a porta serial de um computador pode enviar dados diretamente para o Excel, representando graficamente os dados na medida que chegam em tempo real usando como interface

o software PLX-DAQ. Através do PLX-DAQ, qualquer microcontrolador conectado a um sensor, pode em tempo real enviar seus dados diretamente para uma planilha Excel. Optou-se pelo software Excel para o registro e geração dos gráficos dos dados coletados, por ser um aplicativo mundialmente conhecido e de fácil manuseio. Com os dados na planilha, é possível utilizar as facilidades desse software e construir um gráfico com o par de coordenadas Tempo e Temperatura (DWORAKOWSKI *et al.*, 2016).

Figura 29 – Programa auxiliar de comunicação entre o Arduino e o Excel.



Fonte: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>.

3.5 PRÉ-TESTES

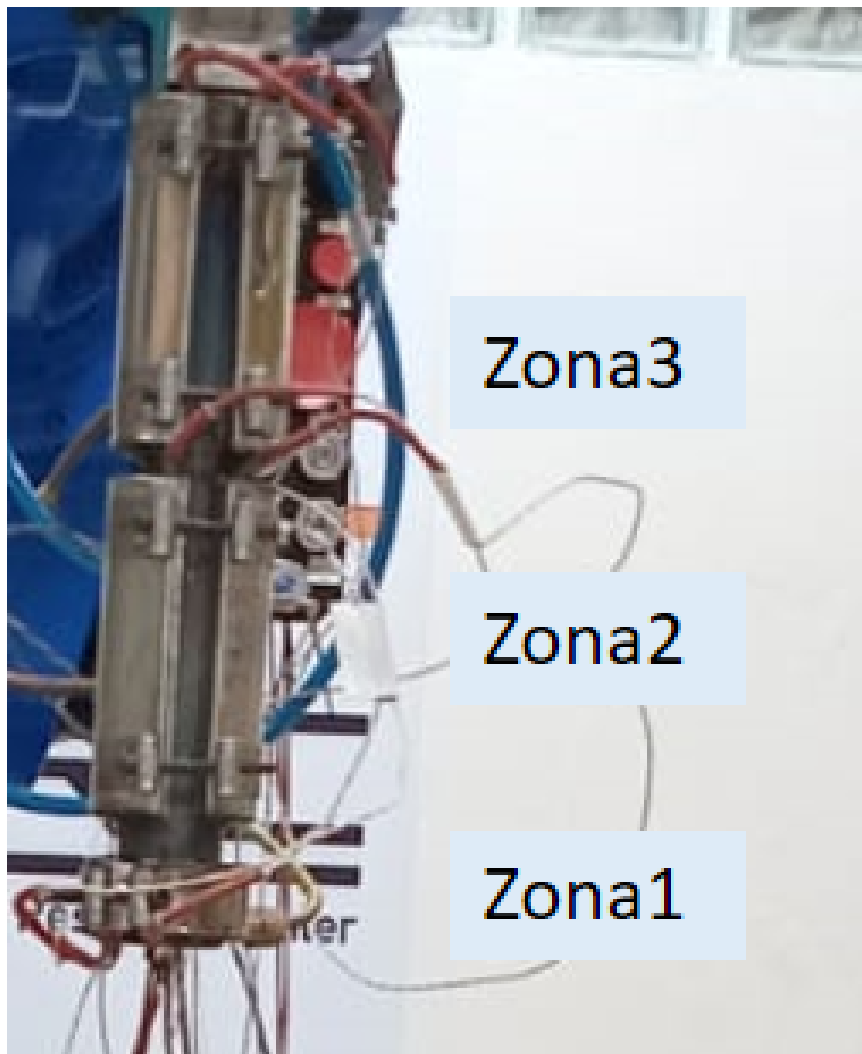
Devido ao fato do sistema desenvolvido para o aquecimento de materiais poliméricos através da radiação por lâmpadas infravermelhas em MA de grande porte e a medição da temperatura em determinados pontos do material, ser uma modalidade ainda recente, a literatura ainda é escassa e não se encontram dados experimentais para se utilizar como referência, foi desenvolvida uma bancada de testes para um estudo preliminar dos efeitos. Os pré-testes se encontram no APÊNDICE A.

3.6 USO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO JUNTO À CÉLULA DE MANUFATURA ADITIVA DE GRANDE PORTE

Para a investigação dos efeitos da temperatura ocasionado pela radiação das lâmpadas infravermelhas sobre a qualidade estrutural na impressão FPM, foi utilizada a célula de manufatura aditiva de grande porte instalada no Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA) do departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Uma primeira gama de testes foi de impressão de uma placa plana de ABS sobre a mesa aquecida somente pela radiação infravermelha. Um segundo teste foi a impressão de uma estrutura cobóide de parede fina, sofrendo o aquecimento tanto da mesa quanto das lâmpadas infravermelhas. Foram desenvolvidos sistemas de sustentação para as

lâmpadas de infravermelho, que fossem de montagem e desmontagem rápida e prática. A célula de manufatura é composta pelo robô marca Yaskawa, modelo Motoman®GP88 que foi integrado com uma extrusora monorosca da marca AX Plásticos®e de uma mesa térmica de vidro de dimensões 1000 mm x 1000 mm x 9,5 mm. A extrusora é alimentada por gravidade, através de um funil, com o material polimérico na forma de grânulos, sendo eles o ABS, PLA e PCL. Os grânulos, na extrusora, passam por três zonas de aquecimento, Figura 30, onde o material é fundido para em seguida ser depositado sobre a mesa de impressão, seguindo uma trajetória previamente carregada no controlador do robô. Nos testes feitos, a extrusora foi calibrada para que o material ABS fosse depositado na temperatura de 210 °C. O robô está equipado com um controlador YRC1000 responsável por gerenciar a trajetória através da ação do software G-code, onde parâmetros como velocidade de impressão e diâmetro de filete são configurados.

Figura 30 – Detalhamento das zonas de aquecimento da extrusora.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos experimentos, utilizou-se material polimérico no formato de grãos (*pellets*) acrilonitril-butadieno-estireno (ABS) do fabricante SABIC, chamada resina Cycolac MG94 (MG94, 2022), resina especialmente projetada para ser processada por técnicas de extrusão e injeção. A resina

ABS Cycolac MG94 possui alta resistência à fadiga e requer uma temperatura de impressão entre 205 e 245 °C. As propriedades mecânicas desse material são fornecidas pelo fabricante, Tabela 1, e são essenciais para a calibragem dos parâmetros de impressão.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do ABS

Propriedades	Valores	Unidades
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

3.6.1 Testes de impressão de uma placa plana de ABS utilizando apenas o sistema de aquecimento por radiação infravermelha (mesa desligada dos aquecedores elétricos).

Na técnica FPM de impressão 3D, diversos fatores são usados e configurados para se alcançar uma qualidade ideal, como por exemplo, a configuração da impressora, até a do fatiamento da peça, cada detalhe é de extrema importância para se obter boas impressões. A aderência adequada das primeiras camadas do filamento sobre a mesa da impressora vai assegurar uma estabilidade durante o processo. Para se determinar se o corpo de prova fosse empenar ou descolar da mesa usando o sistema complementar de aquecimento pelas lâmpadas infravermelhas, foi desenvolvido um aparato de aquecimento e leitura da temperatura tanto da mesa de impressão, quanto da primeira camada de ABS, portanto, um corpo de prova de formato retangular plano foi a geometria escolhida para o estudo de possíveis descolamentos e empenamentos.

Nesse experimento foi feita a impressão de 4 corpos de prova no formato retangular, de uma placa de ABS de medidas 270 mm de comprimento por 180 mm de largura e 3 mm de espessura, cujo desenho está representado na Figura 32.

O diâmetro do bico extrusor é de 1,75mm, rotação da extrusora de 30 RPM, fator de preenchimento de 100%, velocidade de impressão de 25 mm/s e altura de camada de 1,2 mm. As peças constando de 2 camadas com ângulo raster de 45 graus. O tempo de impressão de cada amostra foi de aproximadamente 32min36s. A distância entre a face do sensor e o nível horizontal do bico da injetora foi regulada para 30 mm, e foi montado de tal forma que faz a leitura da dianteira do bico, ou seja, do material antes de ser depositada a camada de ABS.

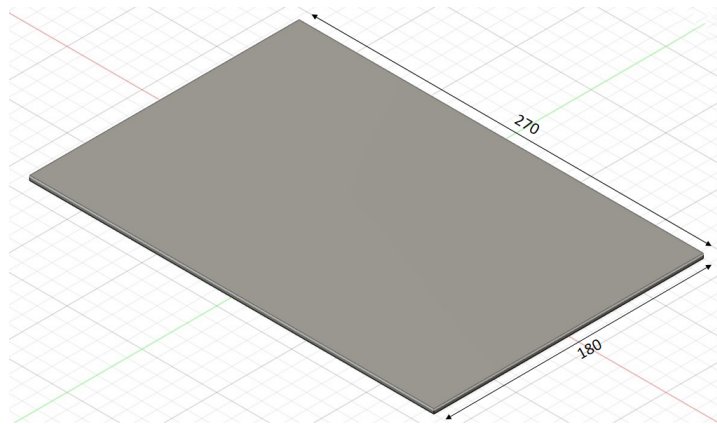
Em relação à disposição geométrica das lâmpadas, o experimento foi montado conforme consta na foto da vista geral da Figura 33, na imagem estilizada da Figura 34 e nas fotos detalhadas da Figura 35. A altura (h) das lâmpadas em relação a mesa foi estabelecida em 190 mm e a distância (d) entre lâmpadas foi estabelecida em 400 mm. Esses valores foram escolhidos após detectado que essa disposição seria o suficiente para aquecer a mesa de impressão a uma

Figura 31 – Foto dos pellets no funil da extrusora.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Desenho da placa de ABS desenvolvida para os testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

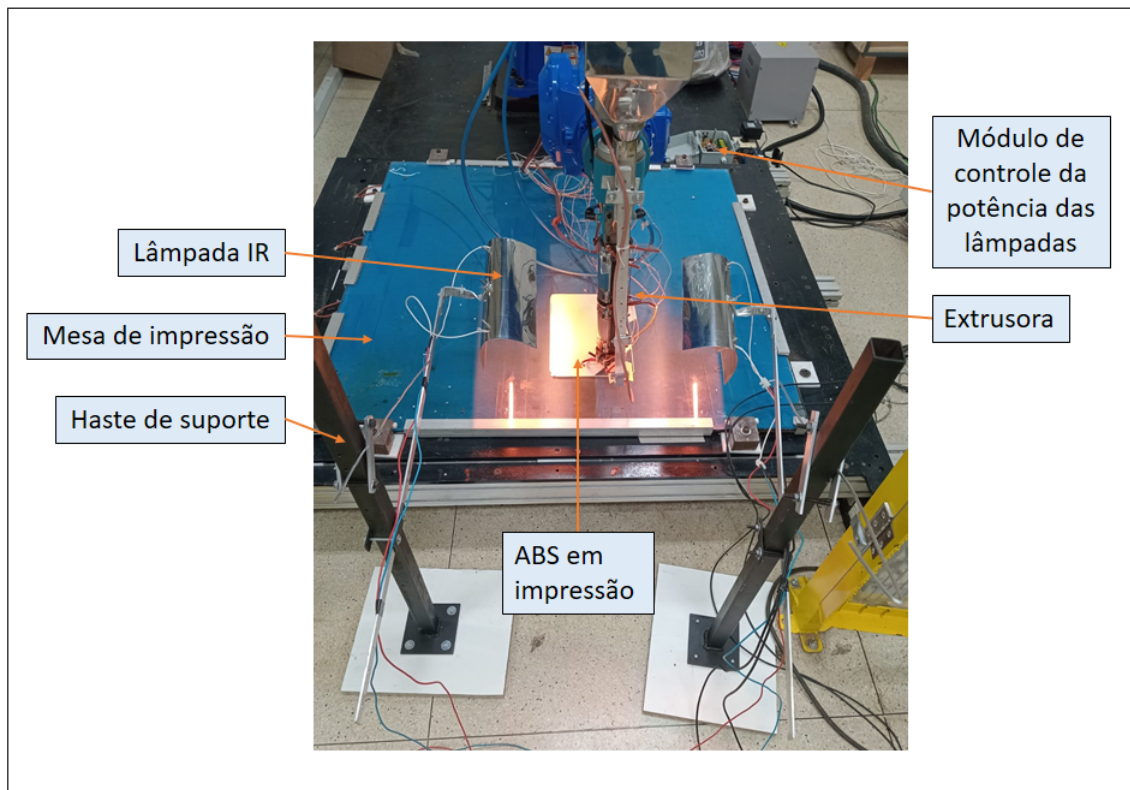
Tabela 2 – Configurações da impressão

Propriedades	Valores	Unidades
Diâmetro bico extrusora	1,75	mm
Rotação	30	RPM
Velocidade impressão	25	mm/s
Altura camada	1,2	mm
Ângulo raster	45	graus
Fator preenchimento	100	%

temperatura acima de 90 °C. A área sobre a mesa de impressão que recebia a radiação, tinha uma superfície quadrada de aproximadamente 500 mm de lado, o suficiente para acomodar uma

impressão de tamanho razoável, visto se tratar de uma célula de MA robotizada de grande porte.

Figura 33 – Foto vista geral montagem na célula de manufatura robotizada.



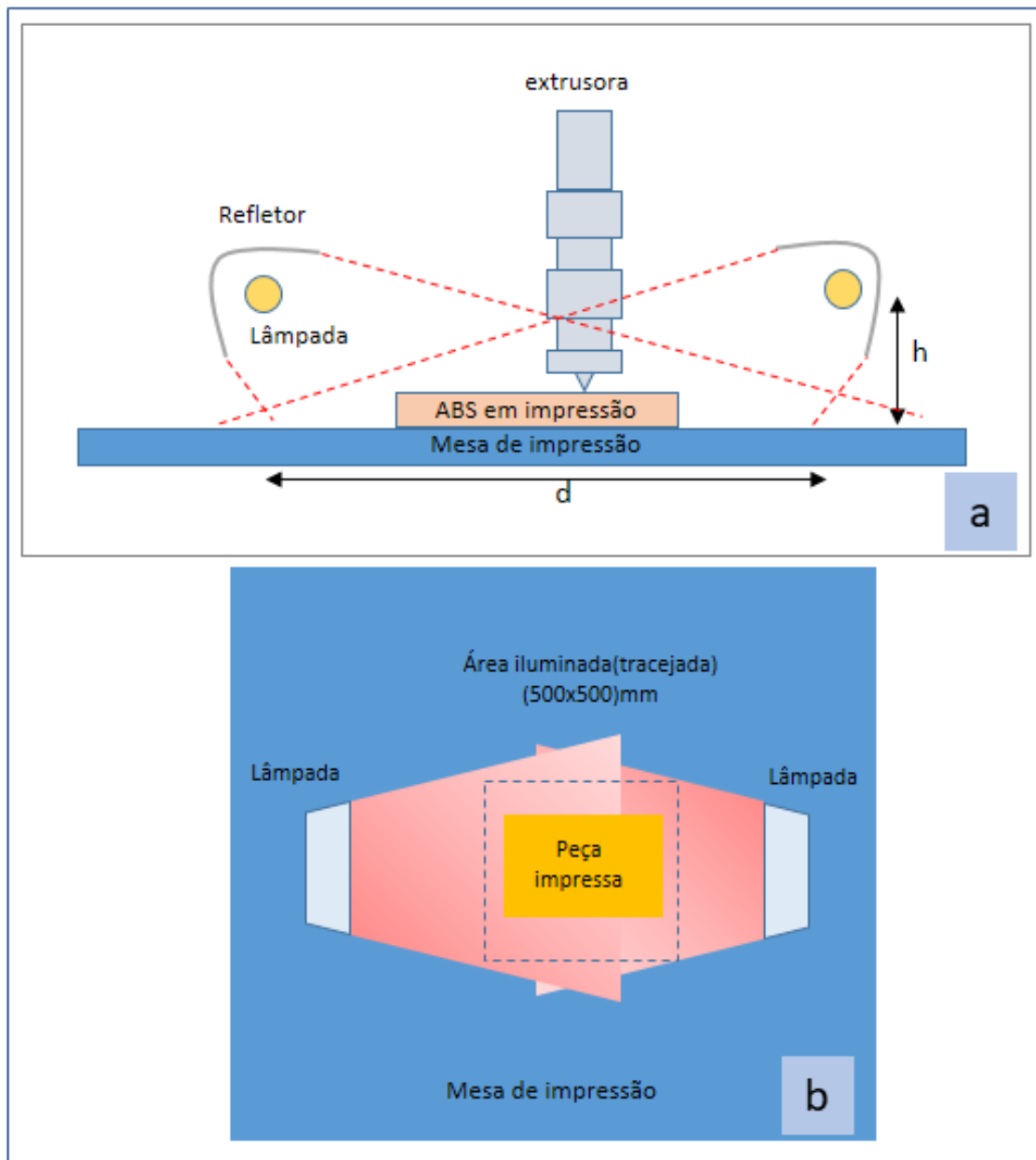
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse experimento, as duas lâmpadas, instaladas conforme mostrado na Figura 33(a) e 33(b), forneciam radiação infravermelha, inicialmente, apenas para a mesa de impressão. Porém, conforme o material impresso ia sendo depositado (pois se trata de um corpo de prova constituído por duas camadas), a radiação aquecia tanto o material ABS depositado, quanto a mesa de impressão. Controlou-se a potência das lâmpadas, para que a temperatura tanto da mesa quanto do material ABS ficasse por volta de 90 °C. Devido ao movimento de deslocamento do sensor por sobre a mesa e sobre a primeira camada do material já impresso, isso resultou em medidas de temperaturas que variaram de um ponto a outro. Utilizou-se uma taxa de amostragem de uma aquisição de temperatura a cada 10 s. Os valores foram coletados e gravados em uma planilha Microsoft Excel e posteriormente convertidos em gráficos de temperatura versus tempo pelo software *GNU Octave*. A média das temperaturas foram calculadas com base nessas planilhas.

3.6.2 Teste de impressão do corpo de prova de parede fina utilizando o sistema de aquecimento por radiação infravermelha, utilizando a mesa aquecida (mesa ligada aos aquecedores elétricos).

Objetos constituídos por paredes com espessuras muito finas são difíceis de serem impressas, principalmente em impressoras de grande porte. Essa espessura mínima, se não

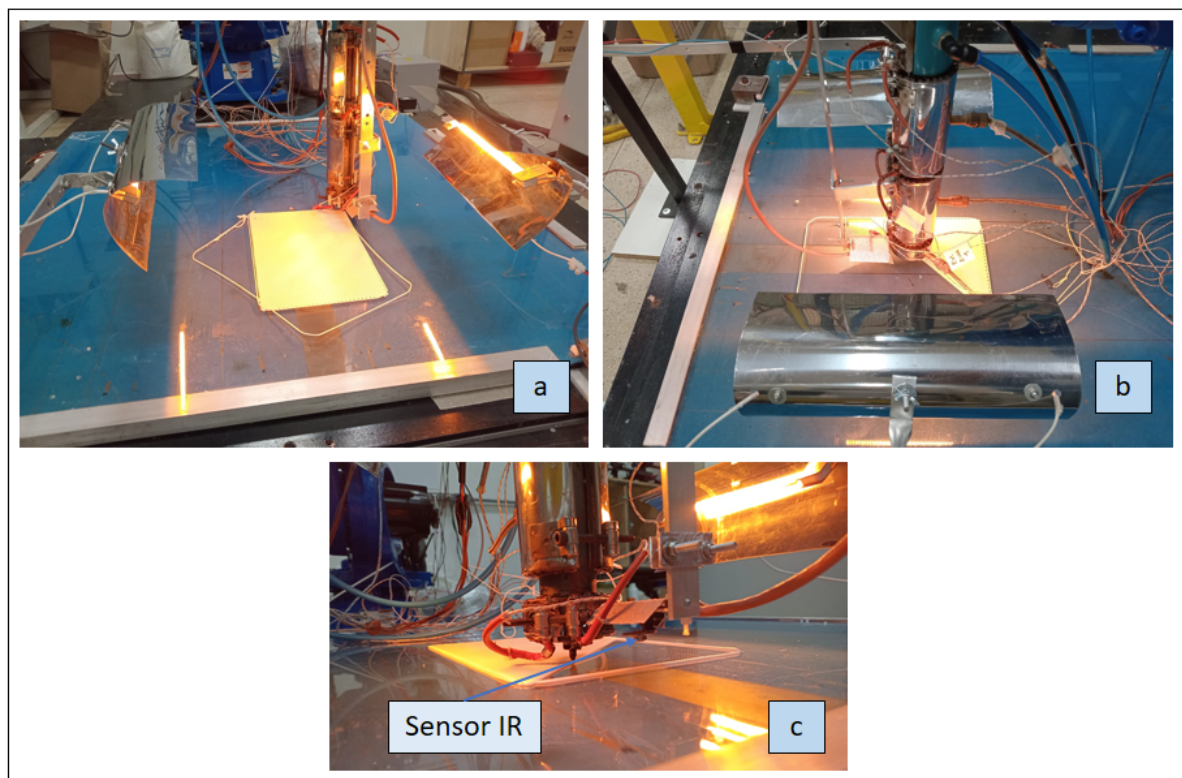
Figura 34 – Imagem estilizada da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) vista frontal; b) vista superior representando a área efetiva de impressão aquecida pela radiação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

for otimizada, pode causar defeitos como empenamentos e ondulações, e depende do tipo de material utilizado. Para materiais mais flexíveis, como o TPU, a espessura mínima é de 2,0 mm, enquanto que para materiais mais rígidos, como o PLA e ABS, essa espessura mínima é de 1,5 mm. Nos casos reais, se uma peça estiver sendo impressa e a parede for muito fina, podem ocorrer dobras antes da solidificação da parede, causando deformação da peça. Para a verificação do comportamento do sistema complementar de aquecimento por lâmpadas infravermelhas na impressão de peças de ABS de paredes finas, foi adotada uma metodologia de testes com características semelhantes ao teste de empenamento.

Figura 35 – Fotos detalhadas da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) vista frontal; b) vista lateral; c) detalhes do bico da extrusora e sensor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

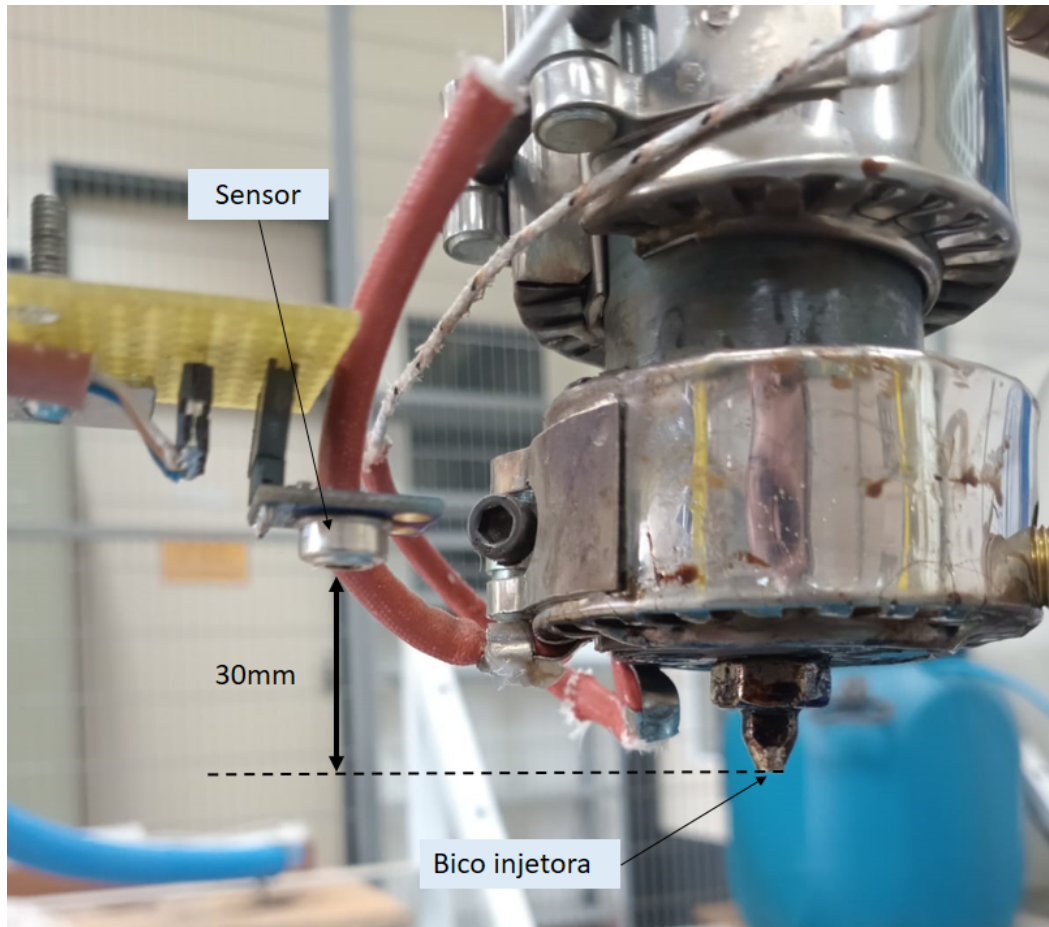
Nesse teste, a temperatura da mesa foi considerada constante, pois nesse caso os aquecedores elétricos da mesma foram acionados durante todo o processo. O teste teve por finalidade determinar as características de como uma impressão de uma parede fina de ABS iria se comportar com o calor produzido pela radiação das lâmpadas. Foram testadas duas geometrias de posicionamento de lâmpadas distintas, com o intuito de se determinar qual delas daria os melhores resultados.

As configurações de impressão, foram as mesmas usadas para a impressão da placa plana, porém, nesse caso, utilizou-se o aquecimento elétrico das resistências da mesa de impressão. O valor da temperatura da mesa foi regulada para 90 °C.

Para os testes de emissão de radiação unilateral, Figura 38(a), (duas lâmpadas situadas do mesmo lado e sobrepostas), usou-se a altura (h1) e (h2) iguais a 150 e 250 mm e a distância (d1) sendo 120 mm. Para os testes de emissão bilateral Figura 36(b), (Lâmpadas separadas uma de cada lado do corpo de prova), (h) igual a 150 mm e (d) sendo 210 mm.

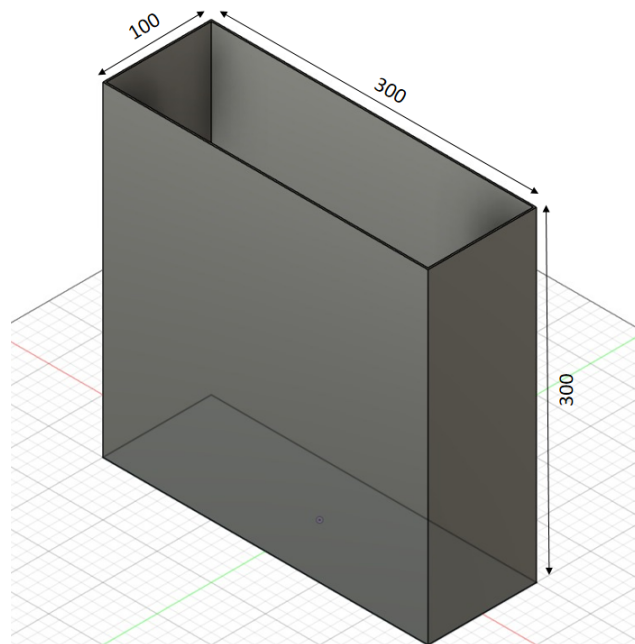
A disposição dos refletores foram tais que promoveram a concentração da radiação em um ângulo mais alto, com a preocupação de aquecer a peça, e não necessariamente a mesa de impressão. O formato escolhido foi o de uma caixa sem fundos de 300 mm de comprimento por 100 mm de largura por 300 mm de altura, espessura de 1,5 mm, demonstrado na Figura 37.

Figura 36 – Foto detalhada do posicionamento do sensor IR junto ao bico da extrusora.



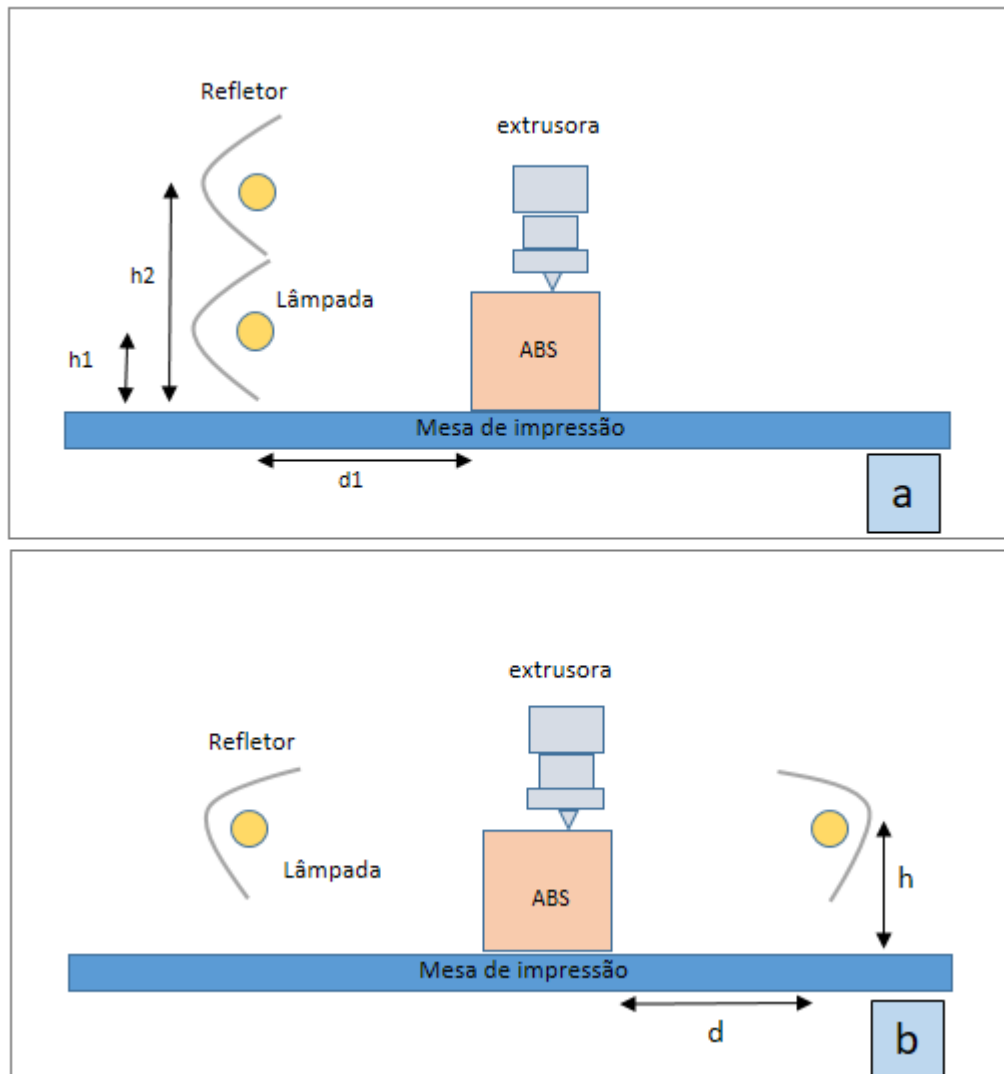
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Desenho da estrutura de parede fina de ABS desenvolvida para os testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Imagem estilizada da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) aquecimento unilateral; b) aquecimento bilateral.

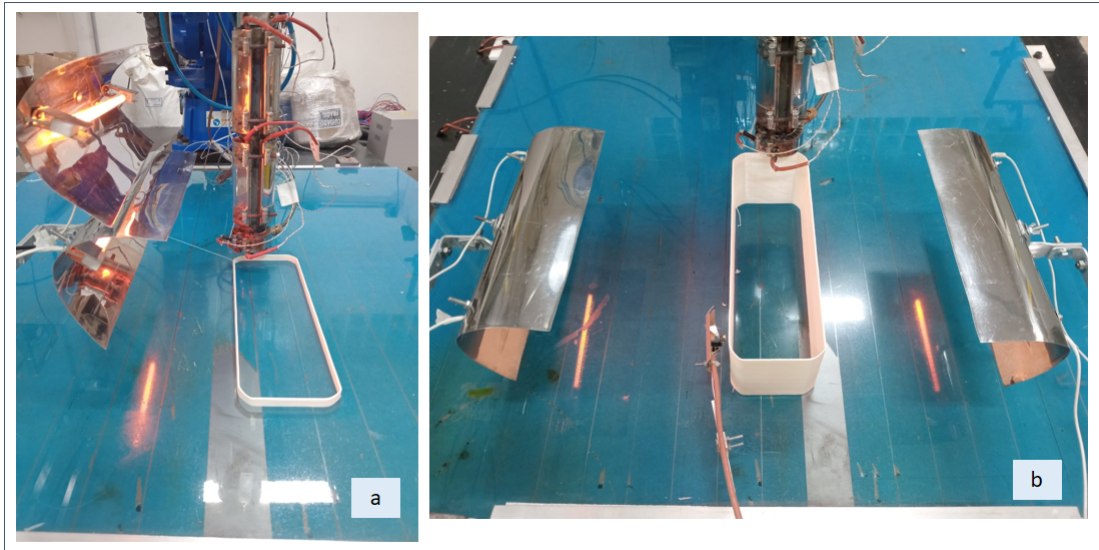


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os testes de impressão para se verificar as características de acabamento do corpo de paredes finas, foi utilizada a seguinte metodologia:

No Teste-1, foi feito a impressão somente com o aquecimento da mesa de impressão. No teste-2, foram feitas tres impressões, onde os corpo de prova receberam a radiação exclusivamente vinda de uma só direção (aquecimento unilateral). Nos testes Teste-3 e Teste-4, os corpos de prova recebiam a radiação vindas de duas direções (aquecimento bilateral).

Figura 39 – Fotos da montagem na célula de manufatura aditiva robotizada, sendo: a) aquecimento unilateral; b) aquecimento bilateral.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

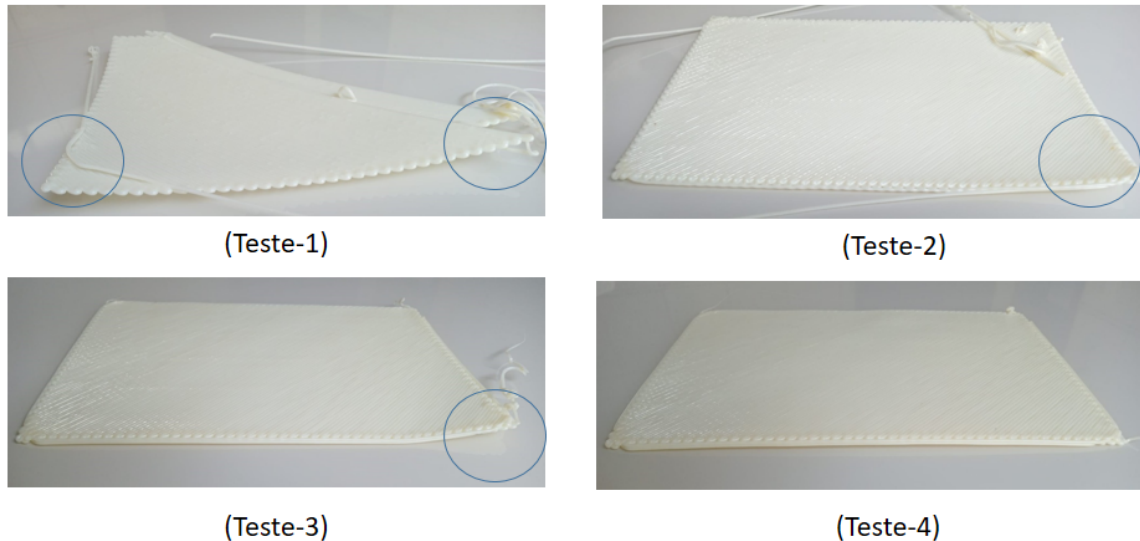
4.0.1 Testes de impressão de uma placa plana de ABS utilizando apenas o sistema de aquecimento por radiação infravermelha (mesa desligada dos aquecedores elétricos)

Teste-1

No primeiro teste, o corpo de prova foi impresso sobre a mesa de impressão que se encontrava na temperatura ambiente. Houve o descolamento da mesa momentos após o início da impressão, com o aparecimento de um empenamento generalizado em todas as laterais da peça, como já era esperado que acontecesse. O resultado está demonstrado na foto da Figura 40. Fotos detalhadas das medidas do empenamento se encontram mostradas na Figura 41, demonstrando um empenamento generalizado em todas as bordas da peça. Como, nesse experimento, a mesa de impressão se encontrava na temperatura ambiente, não foram gerados gráficos de aquecimento, pois a temperatura era uniforme, foi medida usando-se apenas uma aquisição de sinal.

Temperatura da mesa de impressão: 26 °C.

Figura 40 – Comparação das placas de ABS impressas.

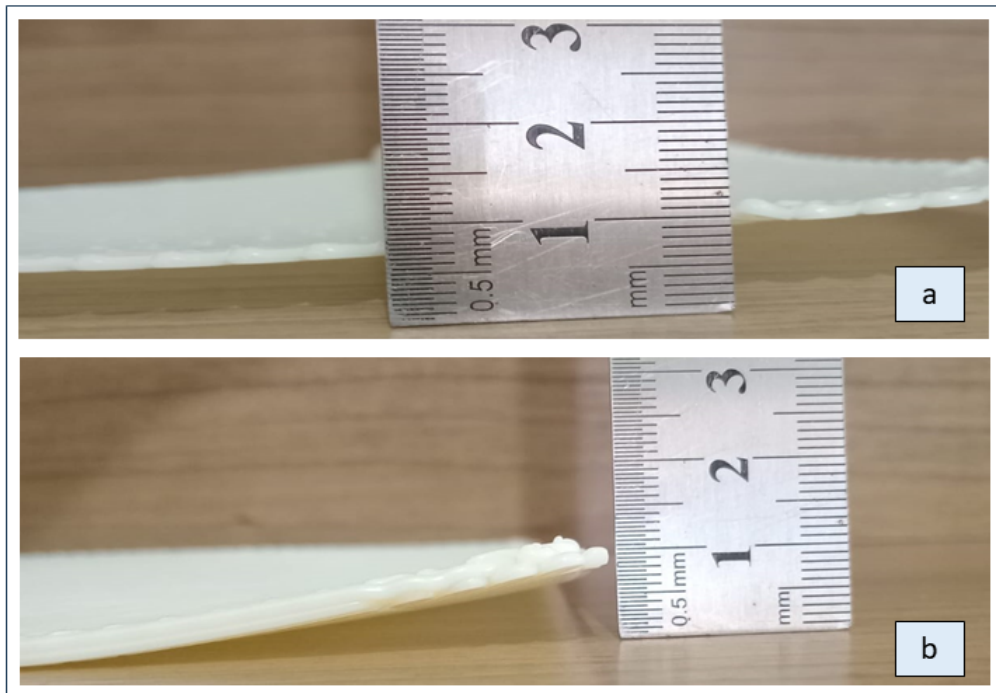


Fonte: Elaborada pelo autor.

Teste-2

No segundo teste, o corpo de prova foi impresso já sobre a mesa aquecida pela radiação incidente das duas lâmpadas infravermelhas. O sensor de temperatura fez o registro da temperatura da mesa enquanto a extrusora depositava a primeira camada sobre a mesa, fazendo uma aquisição a cada 10 s na área sob a qual a peça seria impressa. Quando a extrusora começou a fazer a deposição da segunda camada, o sensor fez a leitura já do material previamente depositado. Os resultados foram os seguintes:

Figura 41 – Foto do empenamento do Teste-1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Temperatura média da mesa de impressão: 61,25 °C;

Temperatura da primeira camada de impressão: 87,21 °C.

O resultado estrutural está demonstrado na foto da Figura 40. O empenamento no canto direito, se deve a uma baixa temperatura na região, que geraram pontos de temperatura abaixo de 90 °C. O gráfico gerado da temperatura versus tempo da mesa de impressão se encontra mostrada na Figura 42(a) e da temperatura da primeira camada de ABS versus tempo na Figura 42(b). Em todos os gráficos gerados, houve uma oscilação do valor da temperatura, isso devido ao movimento do braço da extrusora, que fazia a leitura de temperatura de pontos diferentes no decorrer do tempo. A foto da Figura 43 mostra o nível de empenamento.

Teste-3

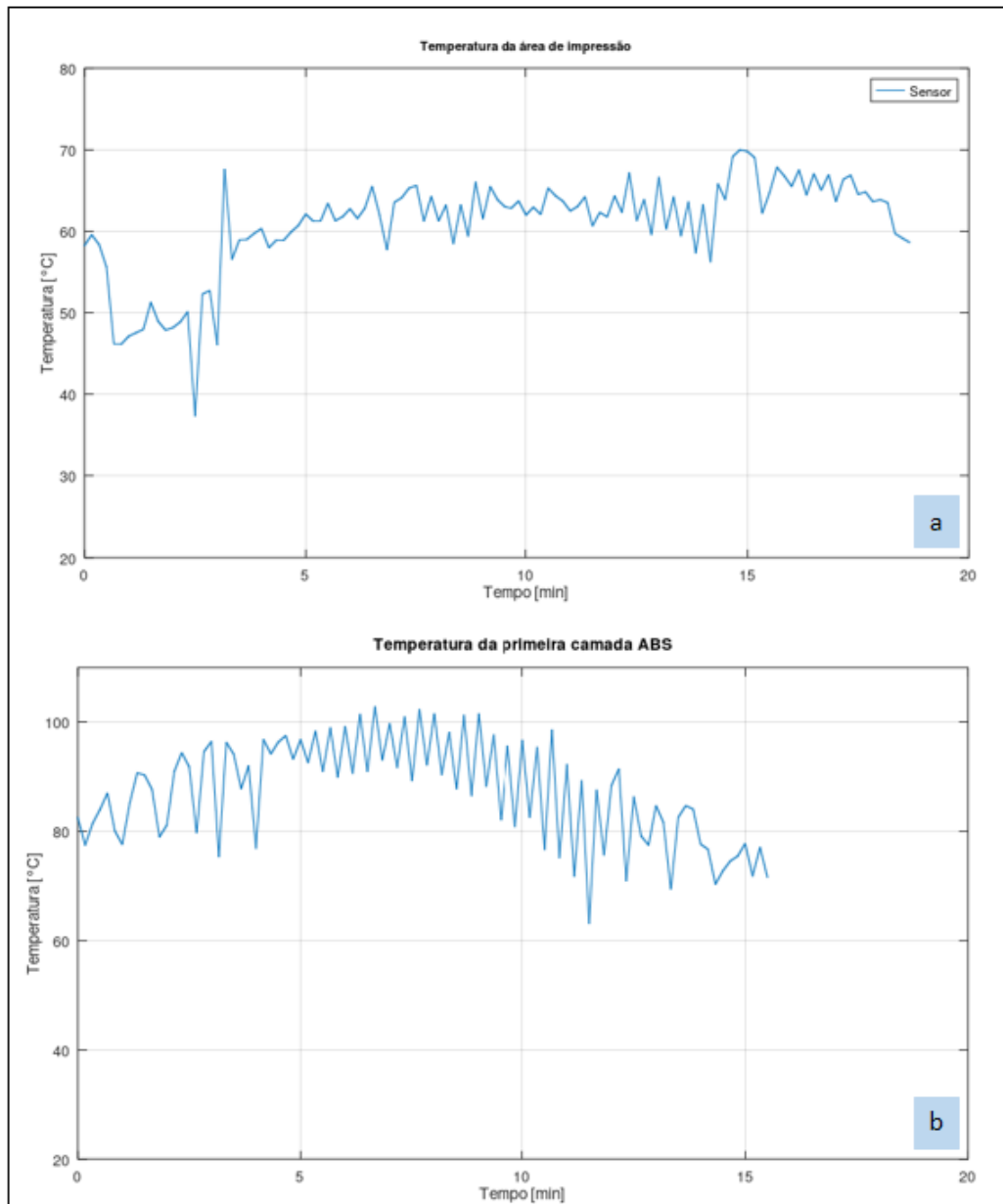
No terceiro teste, seguiu-se o mesmo procedimento utilizado no Teste-2, porém com um leve aumento na temperatura da mesa.

Temperatura média da mesa de impressão: 89,9 °C;

Temperatura da primeira camada de impressão: 107 °C.

O resultado estrutural está demonstrado na foto da Figura 40. O empenamento no canto direito, se deve a uma baixa temperatura na região, que geraram pontos de temperatura abaixo de 90 °C. O gráfico gerado da temperatura versus tempo da mesa de impressão se encontra mostrada na Figura 44(a) e a da temperatura da primeira camada de ABS versus tempo na Figura 44(b). A foto da Figura 45 mostra o nível de empenamento.

Figura 42 – Gráfico das temperaturas do Teste-2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Teste-4

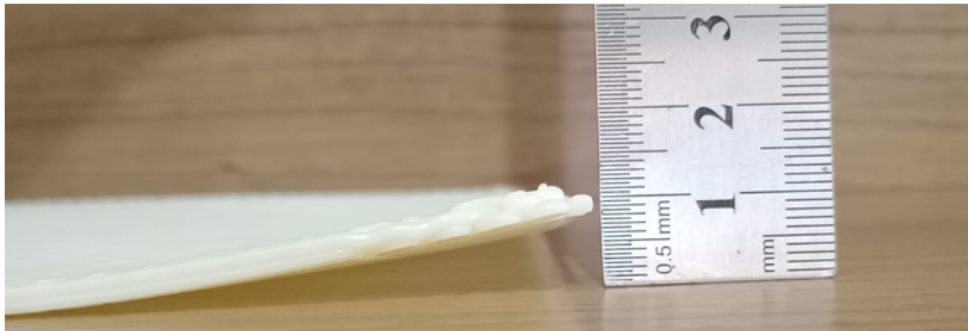
O quarto teste foi realizado com um leve alinhamento das lâmpadas, propiciando então uma melhor distribuição da temperatura na área aquecida, onde a média da temperatura da mesa foi de 90,5 °C, e a temperatura média da primeira camada de ABS ficou em 108,4 °C.

Temperatura média da mesa de impressão: 90,5 °C;

Temperatura da primeira camada de impressão: 108,4 °C.

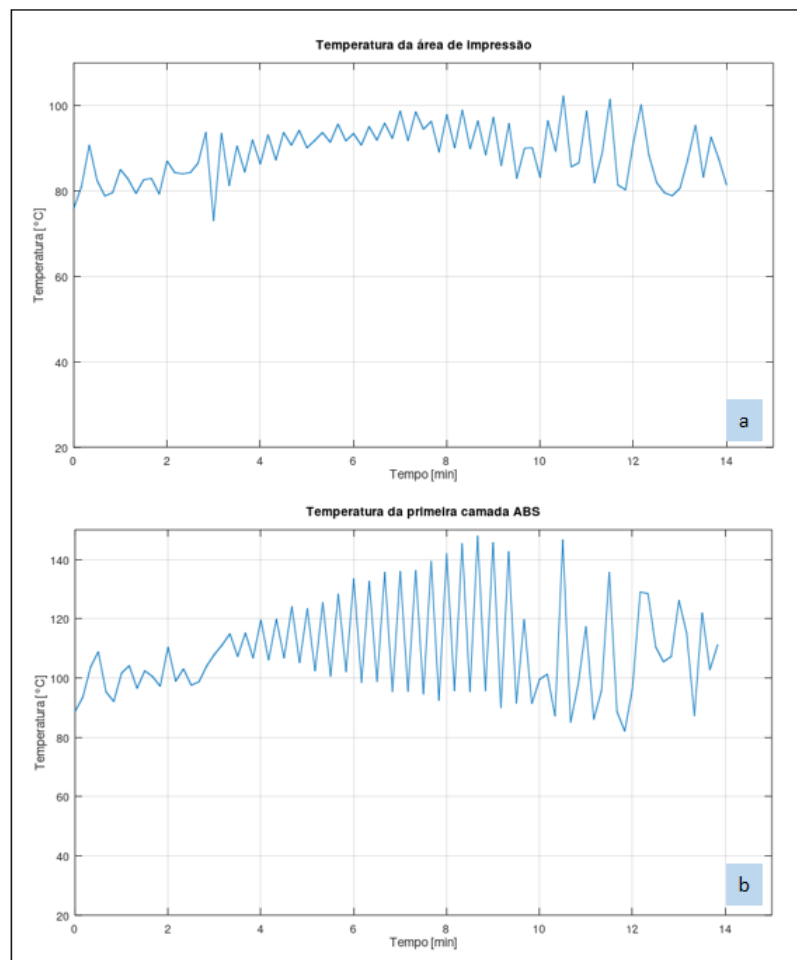
O resultado está demonstrado na foto da Figura 40. Com a melhor distribuição superficial da radiação sobre a área de impressão, não houve mais empenamento.

Figura 43 – Foto do empenamento do Teste-2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

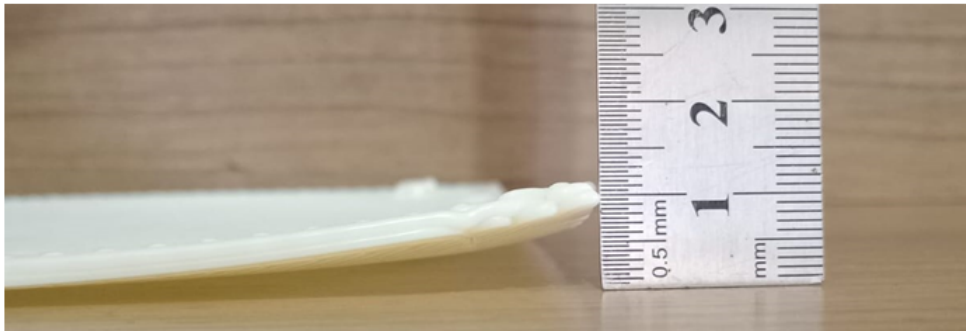
Figura 44 – Gráfico das temperaturas do Teste-3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com uma distribuição uniforme de radiação sobre a área de impressão, onde a mesa se encontra a temperatura de 90 °C, não há empenamento. O maior valor de temperatura medido no material impresso sobre a mesa se dá pela maior resistência de resfriamento. O gráfico gerado da temperatura versus tempo da mesa de impressão se encontra mostrada na Figura 46(a) e a da temperatura da primeira camada de ABS versus tempo na Figura 46(b). A foto da Figura 47

Figura 45 – Foto do empenamento do Teste-3.

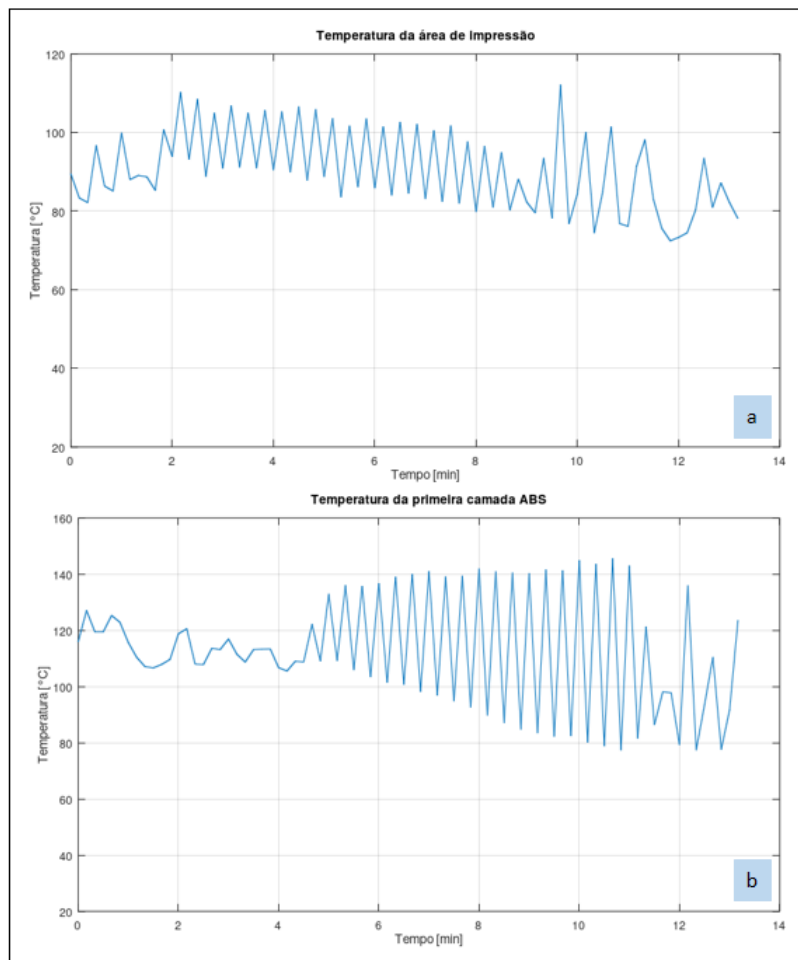


Fonte: Elaborada pelo autor.

mostra a suavidade da impressão, ausente de empenamento.

A Tabela 1 resume os valores das temperaturas médias obtidas, onde a notação (NA) se refere à medida Não Avaliada.

Figura 46 – Gráfico das temperaturas do Teste-4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pela observação da tabela 3, a temperatura da mesa de impressão deve estar a um valor

Figura 47 – Foto do empenamento do Teste-4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Resultados obtidos

Temperaturas[°C]	Teste1	Teste2	Teste3	Teste4
Mesa impressão	26	61,25	89,9	90,5
Material ABS	NA	87,21	107	108,4

aproximado de 90 °C, com essa temperatura uniformemente distribuída pela área efetiva de impressão, a temperatura da primeira camada de ABS precisa estar a uma temperatura de aproximadamente 108 °C, para não ocorrer empenamentos. O experimento verificou que o sistema de aquecimento complementar por lâmpadas infravermelhas é eficaz e pode substituir o aquecimento elétrico da mesa de impressão, porém outras geometrias de disposição das lâmpadas ainda podem ser testadas para melhorar o desempenho da impressão.

Percebe-se pelos resultados obtidos, que a configuração geométrica de posicionamento das lâmpadas é essencial para a obtenção de melhores resultados. Uma possível melhoria é um melhor espalhamento uniforme da radiação, ou seja, o uso de 4 fontes de radiação, formando um quadrilátero, o que diminuiria pontos de incidência de maior energia.

4.0.2 Teste de impressão do corpo de prova de parede fina aquecida por radiação infravermelha, utilizando a mesa de impressão aquecida pelo método convencional.

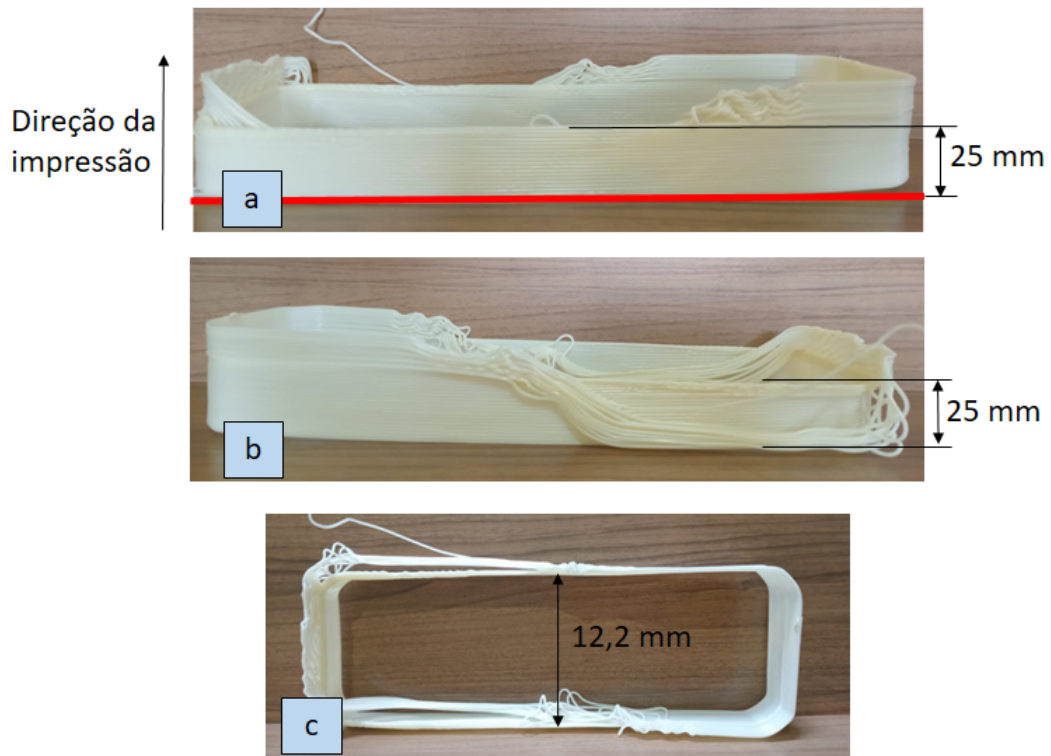
Teste-1

O primeiro teste de impressão foi realizado sem o sistema complementar de aquecimento. Houve o descolamento do corpo de prova da mesa de impressão momentos após o início do processo, mesmo estando a mesa aquecida a uma temperatura de 90 °C e com o surgimento de um empenamento pronunciado. O resultado está demonstrado nas fotos da Figura 48. As Figuras 48(a) e 48(b) são as vistas laterais, onde se visualiza o empenamento na base da peça. Também nota-se a ocorrência de falha na impressão, a partir de 25mm com referência à base. A Figura 48(c) é a foto da vista superior da peça.

Teste-2

Teste de impressão com aquecimento unidirecional por lâmpadas infravermelhas fixas.

Figura 48 – Resultado do Teste-1. Corpo de prova de parede fina impresso sem o sistema complementar de aquecimento por lâmpadas infravermelhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse experimento, foram feitas três impressões, onde os corpos de prova receberam a radiação advinda de duas lâmpadas instaladas de apenas um lado da mesa de impressão. As lâmpadas se encontravam dispostas de forma que a potência das duas lâmpadas se somaram e enviaram a radiação, porém, essa geometria induziu ao aparecimento de uma temperatura mais elevada na parede mais próxima das fontes de radiação. O intuito foi de comparar as temperaturas da parede mais aquecida e menos aquecida, e comparar os resultados.

Observou-se uma falha de adesão entre camadas nas regiões mais próximas dos refletores, conforme observado na foto da Figura 49.

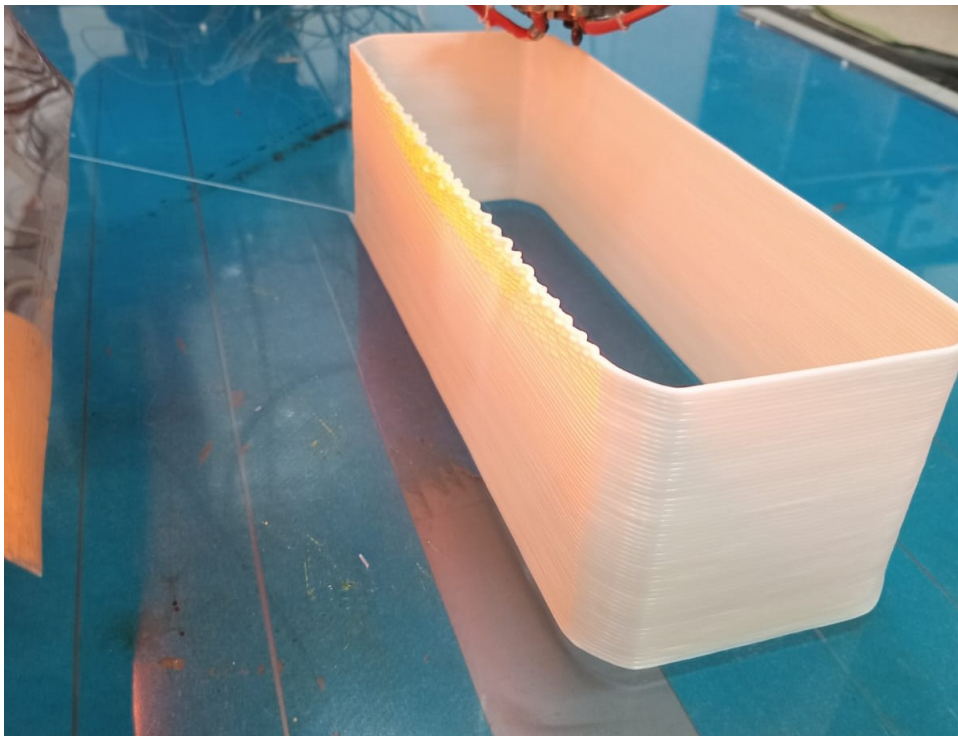
A Figura 50 representa a foto do primeiro corpo de prova, que recebeu uma radiação infravermelha direcionada a uma altura de aproximadamente 200 mm referenciada com a sua base, o que ocasionou o seu descolamento da mesa de impressão, além da ocorrência de falhas em ambos os lados da peça, a partir dos 2 mm de altura Figura 50(a) e 50(b). A Figura 51 representa a foto do corpo de prova, que recebeu uma radiação infravermelha direcionada a uma altura referenciada com a sua base, também de aproximadamente 200 mm, porém com uma intensidade de radiação maior, o que forneceu um valor de temperatura excessiva (120 °C), ocasionando a deformação de ambas paredes laterais Figura 51(a) e 51(b).

A Figura 52 representa a foto do corpo de prova que recebeu uma radiação conveniente

na parede oposta à fonte de radiação infravermelha Figura 52(a), porém houve o aparecimento de uma deformação na parede mais próxima à radiação.

Ao se fazer a análise do corpo de prova da Figura 52, conclui-se que se houvesse uma melhor distribuição da fonte de radiação, os resultados poderiam ser melhores. Isso proporcionou a mudança do modelo de espaçamento e distribuição das lâmpadas infravermelhas, que foram os responsáveis pelos testes seguintes, onde houve melhoria no aspecto final do produto.

Figura 49 – Impressão com excesso de aquecimento no topo de uma das paredes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

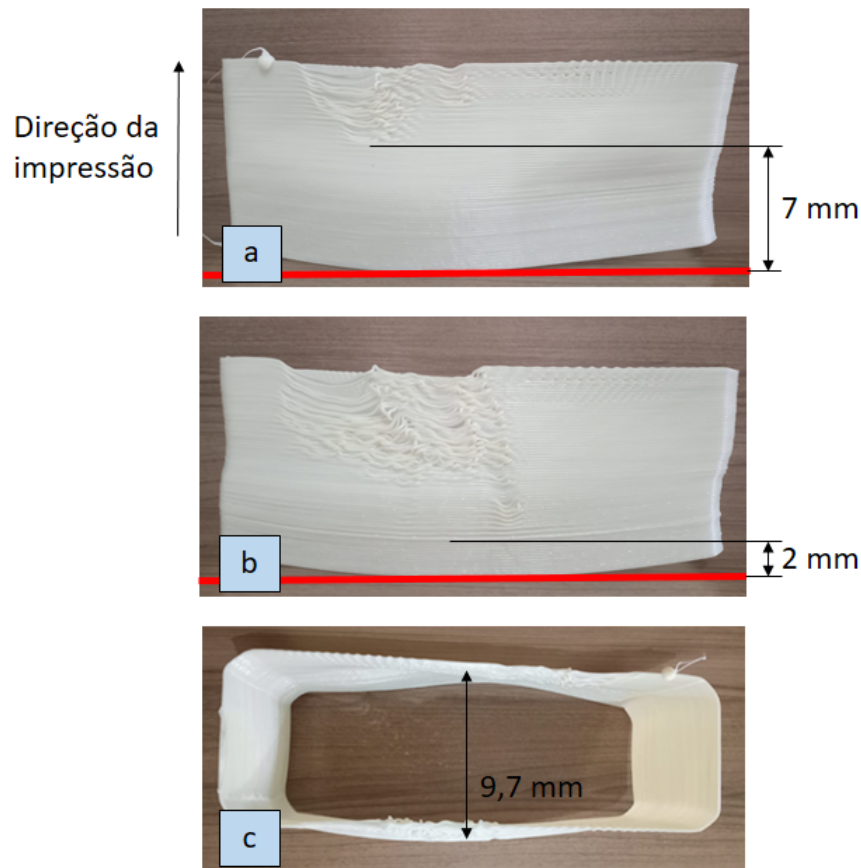
Teste-3

Teste de impressão com aquecimento bidirecional por lâmpadas infravermelhas fixas.

O terceiro teste foi executado com aquecimento advindo das lâmpadas, cada uma disposta diametralmente oposta ao corpo de prova, fazendo com que a radiação fosse mais bem distribuída pelas paredes do corpo de prova. A temperatura média era de aproximadamente 97 °C, porém, conforme o peso das camadas sucessivas ia se somando, essa temperatura fez com que a parede se deformasse, fazendo com que a extrusora perdesse a referência, ocasionando, além das deformações nas laterais mais baixas, defeitos de impressão nas camadas superiores, conforme pode ser observado nas fotos da Figura 53. Na Figura 53(a) e 53(b), observa-se o empenamento lateral das paredes, e na Figura 53(c) a falha de impressão causada pelo excesso de temperatura no topo, devido a impressão ter entrado numa região mais próxima do foco do refletor, ocasionando um aumento de temperatura, 102 °C.

Resumindo, observaram-se duas falhas nesse experimento, onde a posição da radiação

Figura 50 – Primeiro resultado do Teste-2. Impressões com aquecimento unidirecional por Lâmpadas infravermelhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

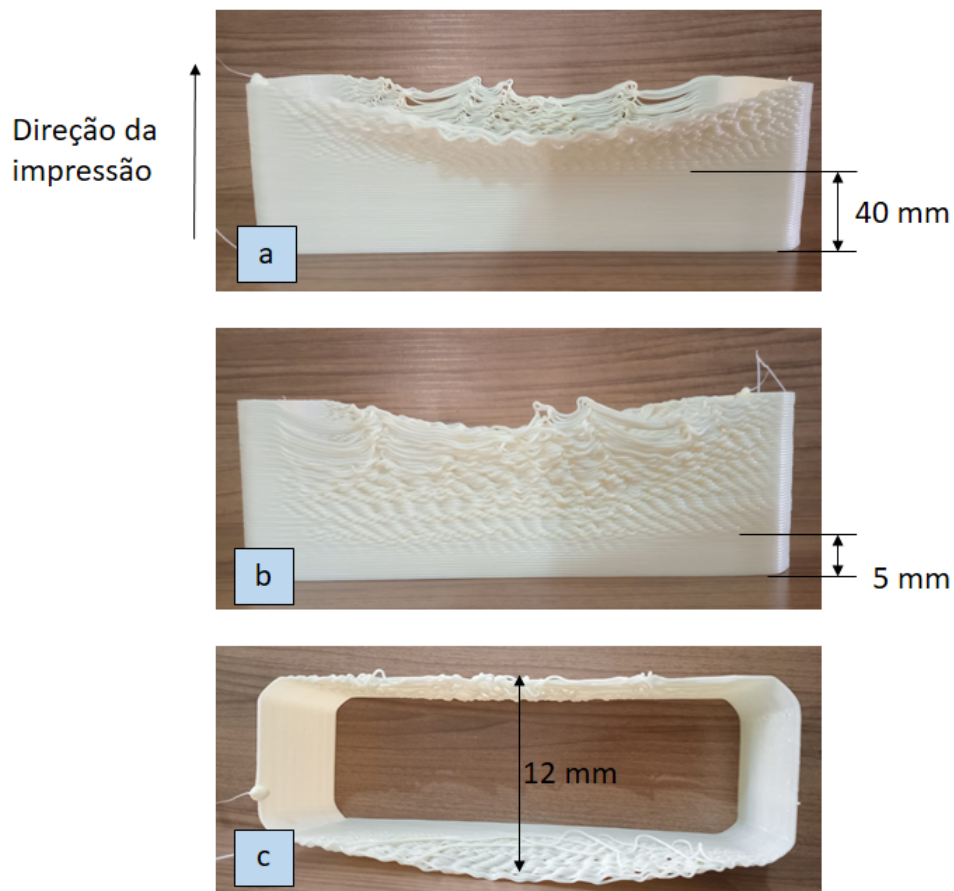
permaneceu fixa no decorrer do processo. Uma foi a deformação da parede, ocasionada pelo peso das camadas superiores, deformando as camadas próximas à base Figura 53(b). Uma segunda falha, observada na foto da Figura 53(c), foi o superaquecimento no topo do corpo de prova, pois conforme a parede era construída, a borda se aproximou da fonte de radiação infravermelha.

Teste-4

Teste de impressão com aquecimento bidirecional por lâmpadas infravermelhas articuladas posicionadas manualmente.

O quarto e último teste foi executado após um rearranjo do posicionamento das lâmpadas durante o processo de impressão. Para se tentar evitar as falhas de impressão das partes inferiores da peça, o que acabou por causar empenamentos laterais, uma metodologia utilizada neste teste foi a de fazer a movimentação manual dos refletores conforme o processo de impressão ia ocorrendo. O mesmo procedimento executado em um lado foi feito no lado oposto. As medidas de temperatura foram feitas no ponto mediano de uma das paredes. Como resultado, a peça foi impressa sem abaulamentos e sem empenamentos. A temperatura média do ponto central da parede, enquanto recebia a radiação, foi de 90,78 °C. Conforme o processo ia sendo executado,

Figura 51 – Segundo resultado do Teste-2. Impressões com aquecimento unidirecional por Lâmpadas infravermelhas.

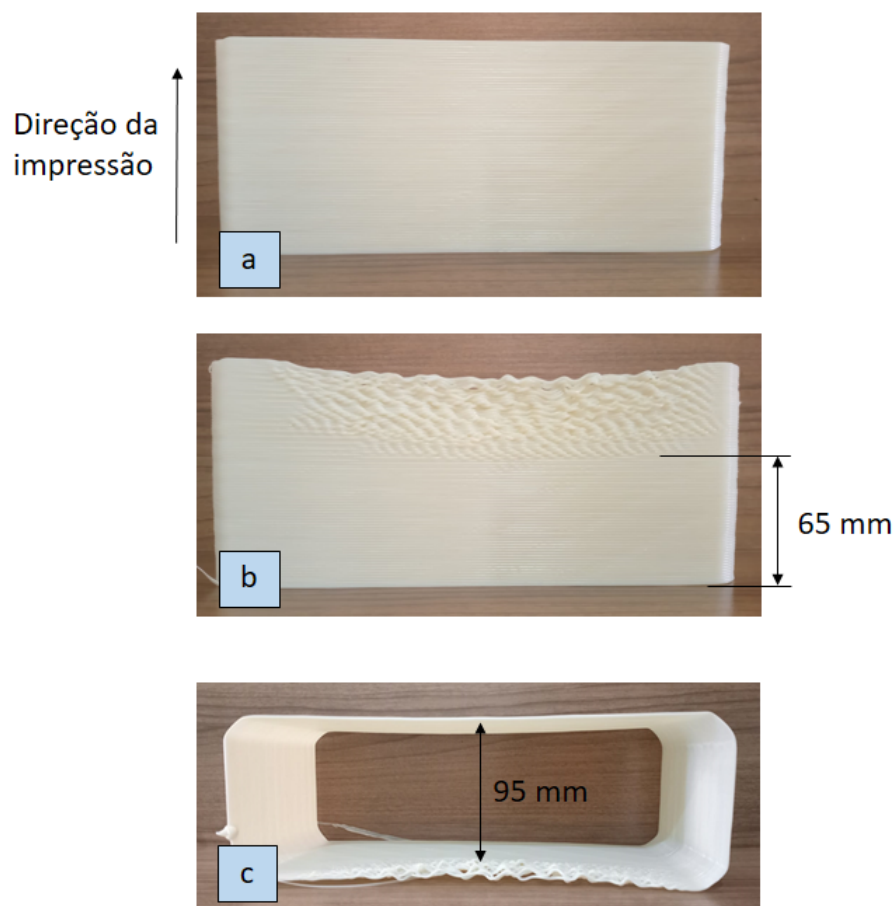


Fonte: Elaborada pelo autor.

a radiação foi direcionada mais para o topo da peça, e a partir de então a temperatura média no ponto central passou a ser de $69,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Figura 55(a) representa a variação temporal da temperatura nos pontos mais elevados da parede, também incluindo a temperatura do filete superior, e a Figura 55(b) representa a variação temporal da temperatura no ponto da altura intermediária da parede. O leve declínio das temperaturas com o decorrer do tempo, mostrados nos gráficos, é devido ao aumento da área de dissipação térmica e também da massa do corpo de prova.

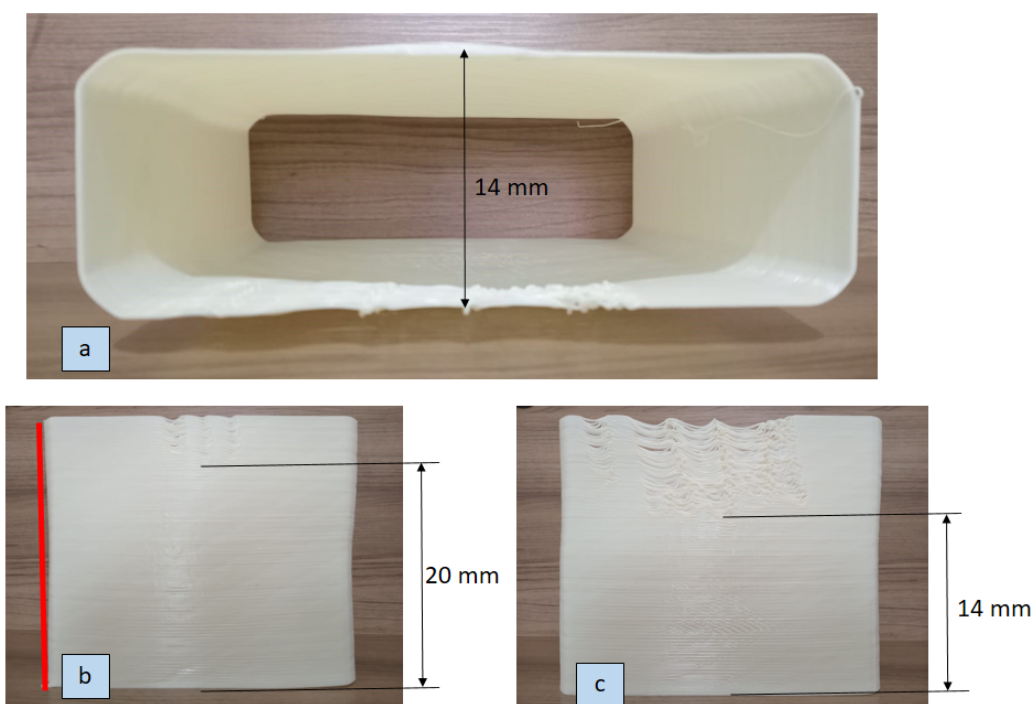
A conclusão, é a que, no momento da deposição do filete, a temperatura do material deve estar entre, aproximadamente, 90 a $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, e conforme a estrutura ganha altura, essa temperatura precisa permanecer mais baixa, entre 63 a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, para não haver falhas de impressão e empenamentos laterais, que ocorriam nos testes em que a temperatura da região mais baixa da parede permanecia alta.

Figura 52 – Terceiro resultado do Teste-2. Impressões com aquecimento unidirecional por Lâmpadas infravermelhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Resultado do Teste-3. Impressões com aquecimento bidirecional por Lâmpadas infravermelhas fixas.



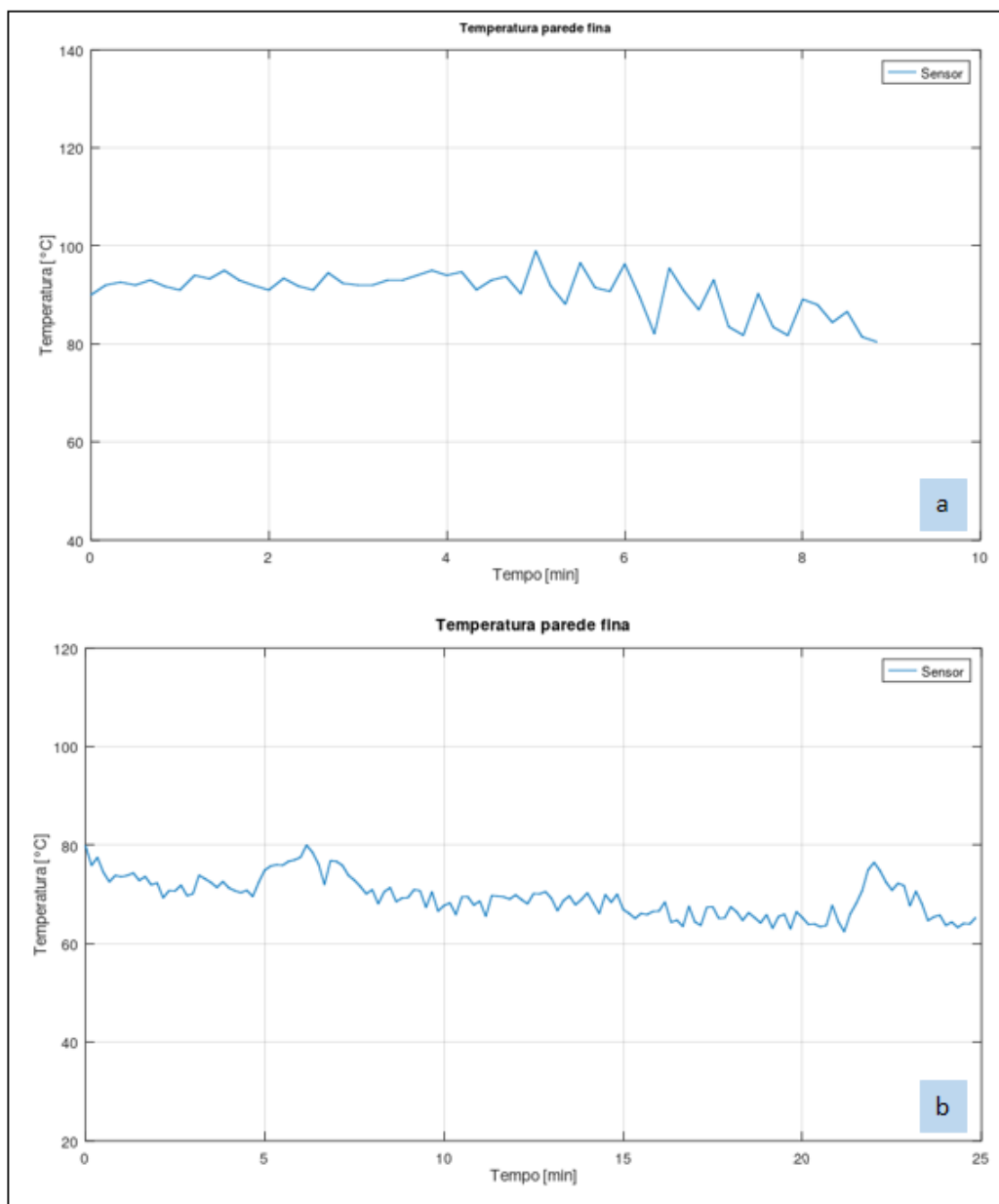
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 – Resultado do Teste-4. Impressões com aquecimento bidirecional por Lâmpadas infravermelhas móveis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 55 – Gráficos das variações da temperatura no ponto médio da parede do corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÃO

A influência do controle da temperatura ocasionado pela radiação emitida por lâmpadas infravermelhas sobre a qualidade superficial de compostos poliméricos fabricados pela técnica de extrusão na manufatura aditiva de grande porte, são notáveis, e representam temas de pesquisas diversas. Ao se conhecer e catalogar as diversas maneiras de se proceder ao aquecimento via radiação infravermelha, aumentará a contribuição para a melhoria das técnicas de fabricação.

Neste trabalho, realizou-se uma investigação sobre a influência do aquecimento oriundo de radiação infravermelha controlada em corpos de prova impressos pela técnica FPM com material polimérico ABS. O dispositivo de aquecimento foi integrado na célula de manufatura composta pelo robô da marca Yaskawa, modelo motoman®GP88, integrado com uma extrusora monorosca da marca AX Plásticos®.

Essas considerações destacam a relevância de regular corretamente os parâmetros de impressão, particularmente a temperatura da mesa e do material, para prevenir o surgimento de falhas estruturais que possam prejudicar as características dos componentes produzidos.

Com base nos dispositivos desenvolvidos e nos resultados obtidos, chegamos às conclusões:

- A etapa de projeto da placa microcontrolada, usando um sensor de temperatura sem contato de baixo custo, forneceu a possibilidade da leitura do valor da temperatura do material polimérico durante o processo de impressão, tanto automaticamente quanto manualmente;
- O software que controla a placa, e que habilita a leitura e gravação dos dados é passível de melhorias e pode ser adaptado para sensores mais modernos e eficazes, além de ser adaptável a microcontroladores mais versáteis;
- O pré-teste forneceu gráficos que se assimilaram aos dados lidos pelos termopares. Os resultados dessas análises foram essenciais para validar a eficácia da montagem do dispositivo de leitura da temperatura;
- O desenvolvimento do aparato de emissão de radiação infravermelha teve seus primeiros testes usando refletor de baixo rendimento, e evoluíram para um equipamento que aproveita melhor a potência irradiada, sendo de fácil manipulação e de rápida montagem e desmontagem;
- Este sistema complementar de aquecimento mostrou-se versátil e resolveu problemas de empenamentos e falhas estruturais em peças de grande porte de paredes finas. Futuras investigações podem melhorar o projeto proposto, onde entre inúmeras sugestões, uma melhor distribuição dos pontos emissores de radiação infravermelha, como também

um controle PID incorporado ao mecanismo de movimentação das lâmpadas durante o processo, iria cobrir lacunas de falta ou excesso de aquecimento em determinados pontos.

Para investigações futuras, sugere-se estudar novas geometrias de distribuição das fontes de radiação infravermelha, um aumento dos pontos de geração de radiação, um sistema PID de controle de potência de radiação, além de um sistema automático para redimensionamento do posicionamento dos refletores, conforme as peças vão sendo impressas pela técnica FDM.

Também, a célula de manufatura robotizada poderá receber instruções cibernéticas que alterem o Código-G da impressão, caso seja detectada alguma falha de impressão, para se alterar a potência de aquecimento, ou parâmetros, fornecendo detecção e interação em tempo real, desde que conectada à rede de internet, trabalhando em conjunto com a inovadora indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M.; JAVAID, M.; HALEEM, A. A study on fused deposition modeling (FDM) and laser-based additive manufacturing (LBAM) in the medical field. **Intelligent Pharmacy**, Higher Education Press, v. 2, n. 3, p. 381–391, 2024.
- ALAMI, A. H. *et al.* Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals. **Ain Shams Engineering Journal**, Elsevier, v. 14, n. 11, p. 102516, 2023.
- ALTIPARMAK, S. C. *et al.* Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 83, p. 607–636, 2022.
- BARJUEI, E. S. *et al.* Real-time vision-based control of industrial manipulators for layer-width setting in concrete 3D printing applications. **Advances in Industrial and Manufacturing Engineering**, Elsevier, v. 5, p. 100094, 2022.
- BRION, D. A.; SHEN, M.; PATTINSON, S. W. Automated recognition and correction of warp deformation in extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 56, p. 102838, 2022.
- CASAVOLA, C. *et al.* Mechanical behaviour of ABS-fused filament fabrication compounds under impact tensile loadings. **Materials**, MDPI, v. 12, n. 8, p. 1295, 2019.
- CASTELLÓ-PEDRERO, P. *et al.* Impact of deposition time per layer in large format additive manufacturing with glass fiber reinforced abs. **Manufacturing Letters**, Elsevier, v. 40, p. 164–167, 2024.
- ÇENGEL, Y. A. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. McGraw Hill, 2007.
- CHOI, Y.-H. *et al.* Influence of bed temperature on heat shrinkage shape error in FDM additive manufacturing of the ABS-engineering plastic. **World Journal of Engineering and Technology**, Scientific Research Publishing, v. 4, n. 3, p. 186–192, 2016.
- CRESS, A. K. *et al.* Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS). **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 279, p. 123689, 2021.
- DILBEROGLU, U. M. *et al.* The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. **Procedia manufacturing**, Elsevier, v. 11, p. 545–554, 2017.
- DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, p. 228–235, 2014.
- DWORAKOWSKI, L. A. *et al.* Uso da plataforma arduino e do software plx-daq para construção de gráficos de movimento em tempo real. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 38, p. e3503, 2016.

- 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, p. 6423–6433, 2022.
- GONÇALVES, C. de C. *et al.* Influence of bed temperature on mechanical resistance, surface and dimensional quality of 3D printed parts by robotized fused pellet modeling. **Progress in Additive Manufacturing**, Springer, p. 1–15, 2024.
- GONZALEZ-GUTIERREZ, J. *et al.* Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. **Materials**, MDPI, v. 11, n. 5, p. 840, 2018.
- ISLAM, M. A. *et al.* Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. **Polymer Testing**, Elsevier, p. 108364, 2024.
- 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.
- KISHORE, V. *et al.* Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. **Additive Manufacturing**, v. 14, p. 7–12, 2017. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486041630330X>>.
- KLOFT, H. *et al.* Tr 277: Additive manufacturing in construction. **Civil Engineering Design**, Wiley Online Library, v. 3, n. 4, p. 113–122, 2021.
- LAMBERT, P. Tensile properties of materials: FDM printer & SLS printer. **Sculpteo 3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources**, 2014.
- LEWIS, J.; MOORE, A. L. *et al.* In situ infrared temperature sensing for real-time defect detection in additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 47, p. 102328, 2021.
- MIAZIO, L. Impact of print speed on strength of samples printed in FDM technology. **Agricultural Engineering**, v. 23, n. 2, p. 33–38, 2019.
- MIDREZ, N. *et al.* Evaluating the environmental and financial performance of additive manufacturing at scale in the consumer goods industry. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 52, p. 580–601, 2024.
- MISHRA, A. K. *et al.* Real time 3D reconstruction for enhanced cybersecurity of additive manufacturing processes. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 145, p. 274–285, 2025.
- NASER, A. Z.; DEIAB, I.; DARRAS, B. M. Polylactic acid (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. **RSC advances**, Royal Society of Chemistry, v. 11, n. 28, p. 17151–17196, 2021.
- NYCZ, A. *et al.* Controlling substrate temperature with infrared heating to improve mechanical properties of large-scale printed parts. **Additive manufacturing**, Elsevier, v. 33, p. 101068, 2020.
- OLIVEIRA, R. A. d.; SILVA, A. P. B. d. William herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 36, p. 4602, 2014.

PULQUERIO, E. C.; BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B. Robotic additive manufacturing system: development of suitable range of process parameters for 3d printing of a large-sized object in pla polymer. **Progress in Additive Manufacturing**, Springer, v. 10, n. 1, p. 887–898, 2025.

RANE, R. **Enhancing tensile strength of FDM parts using thermal annealing and uniaxial pressure**. Tese (Doutorado), 2019.

RANKOUHI, B. *et al.* Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, Springer, v. 16, p. 467–481, 2016.

SALUJA, A.; XIE, J.; FAYAZBAKSH, K. A closed-loop in-process warping detection system for fused filament fabrication using convolutional neural networks. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 58, p. 407–415, 2020.

SAMY, A. A. *et al.* Prediction of part distortion in fused deposition modelling (FDM) of semi-crystalline polymers via comsol: Effect of printing conditions. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Elsevier, v. 33, p. 443–453, 2021.

SANTANA, L. *et al.* A comparative study between PETG and PLA for 3D printing through thermal, chemical and mechanical characterization. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 23, p. e12267, 2018.

SCHIMIDT, E. *et al.* Caracterização de fonte de radiação infravermelha aplicada a fototerapia. **X INIC Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, p. 244–6, 2006.

SHARMA, M.; SHARMA, V.; KALA, P. Optimization of process variables to improve the mechanical properties of fdm structures. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2019. v. 1240, n. 1, p. 012061.

SOLA, A. *et al.* Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication. **Polymer Testing**, Elsevier, v. 117, p. 107859, 2023.

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.

SYRLYBAYEV, D. *et al.* Optimisation of strength properties of fdm printed parts—a critical review. **Polymers**, MDPI, v. 13, n. 10, p. 1587, 2021.

TAIWO, E. T.; PAUL, O.; HICKS, B. Investigating the influence of inter-printhead bond strategy on tensile strength in multi-printhead pla parts for collective additive manufacturing. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 130, p. 648–655, 2024.

TOSHEV, R. *et al.* Advancing free-form fabrication: Industrial robots' role in additive manufacturing of thermoplastics. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 232, p. 3131–3140, 2024.

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.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.

YADAV, A. *et al.* An experimental examination on surface finish of FDM 3D printed parts. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, 2023.

ZHOU, Y. *et al.* Voxelization modelling based finite element simulation and process parameter optimization for fused filament fabrication. **Materials & Design**, Elsevier, v. 187, p. 108409, 2020.

ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMIAN, S. Anisotropic mechanical properties of abs parts fabricated by fused deposition modelling. **Mechanical engineering**, InTech London, UK, v. 23, p. 159–180, 2012.

APÊNDICE A – PRÉ-TESTES

Como o sistema desenvolvido para o aquecimento através da radiação por lâmpadas infravermelhas e medição indireta de temperatura para um sistema de MA de grande porte é uma modalidade recente, a literatura ainda é escassa e não se encontram dados experimentais suficientes para se utilizar como referência, foi necessário elaborar uma bancada experimental onde as lâmpadas infravermelhas aqueceram corpos de prova impressos em ABS, para melhor compreender os resultados de aquecimento proporcionados pelo sistema de aquecimento e aquisição dos valores de temperatura gerados. Em conjunto com o sistema, foram acrescentados termopares com o intuito de se fazer uma comparação entre o sensor sem contato (Sensor IR) e pelo sensor com contato (termopar). Como o sistema desenvolvido usa uma arquitetura diferenciada de leitura, é de se esperar que ocorressem diferenças nos valores das medidas, ao se comparar os dois métodos. Por isso, o teste em bancada, comparando um sistema já conhecido, é de suma importância para a validação do sistema. As diferenças entre cada tecnologia de medida são substanciais, pois o sensor termopar é posto em contato físico com o corpo de prova, que, ao se aquecer gera um nível de sinal proporcional à temperatura do ponto de contato entre este e o corpo de prova. Já o sistema de sensor sem contato, incorporado na célula de manufatura aditiva, faz a leitura do nível da radiação infravermelha irradiada pelos corpos de prova, proporcional à temperatura do mesmo.

Durante os testes iniciais, também foi verificado que as lâmpadas são capazes de fornecer potência suficiente para se atingir a temperatura vítrea do polímero ABS. Além desses parâmetros, foi feita a comparação dos valores das leituras do sensor e da média dos termopares.

A.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Uma preocupação primordial durante o desenvolvimento desta etapa foi assegurar que os dados obtidos experimentalmente ao máximo das reais condições de operação do equipamento. A montagem da estrutura proporcionou possibilidades de aquecimento por diferentes valores de potência de aquecimento das lâmpadas, um sistema de refrigeração com potência máxima e meia potência, variação da distância entre o corpo de prova e a fonte de radiação infravermelha. Durante os testes iniciais, foi verificado se as lâmpadas dariam potência suficiente para que o aquecimento fosse suficiente e se o sistema de aquisição da temperatura fosse satisfatório. Ao se atender esses requisitos, assegura-se que o sistema de aquecimento é funcional e os dados obtidos serão confiáveis.

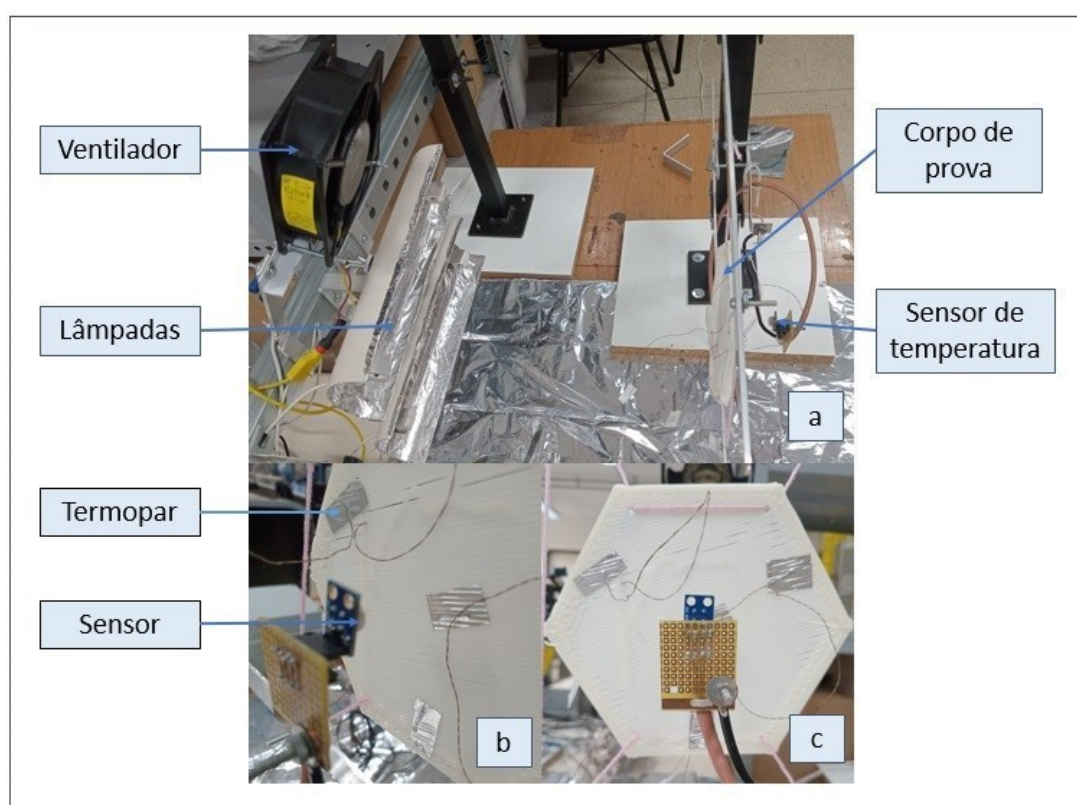
Para a sustentação da lâmpada, ventoinha e corpo de prova, foram usados:

- 1 barra de perfilado com 1,5 m de comprimento;

- 2 barras de metalon 40 mm x 40 mm com 0,8 m de comprimento;
- 4 parafusos M6x60;
- 2 chapas metálicas de 10 mm x 5 mm x 5 mm;
- 2 barras de alumínio chato de 750 mm x 4 mm.

Todos esses materiais, excetuando-se a barra de perfilado, foram utilizados nas montagens dos testes na célula de MA.

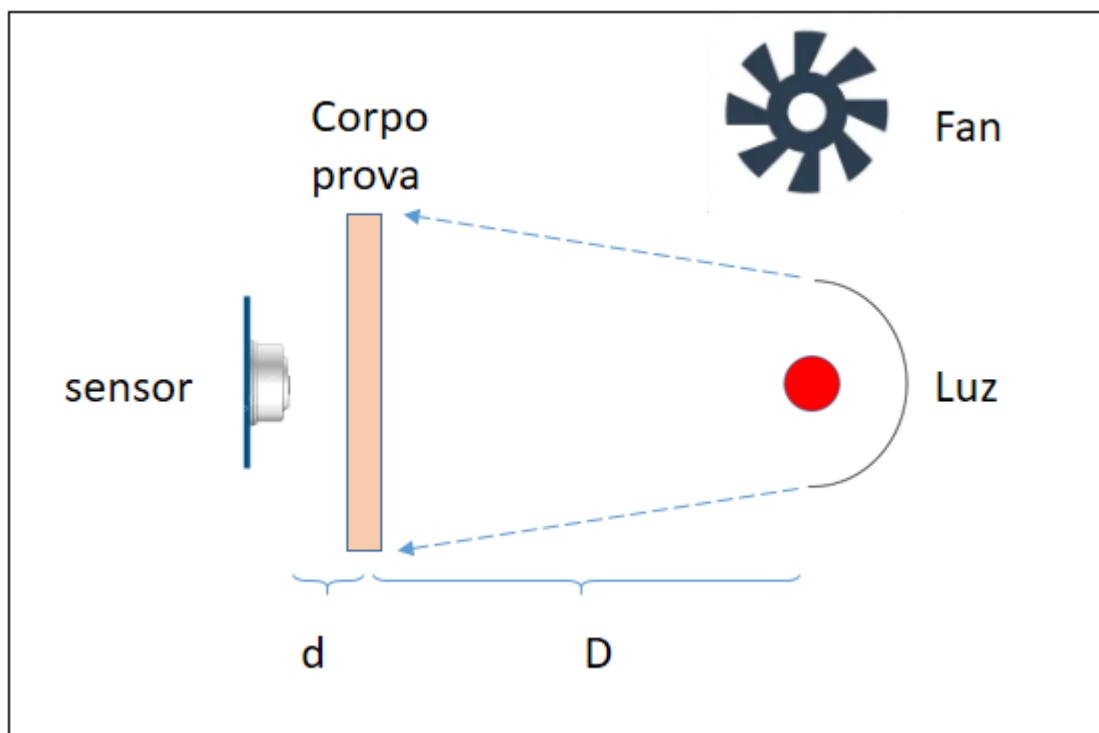
Figura 56 – Foto da montagem em bancada, sendo: a) vista geral; b) e c) vistas do posicionamento dos sensores sobre o corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 29(a) é a foto da montagem experimental, onde se observa o ventilador, lâmpadas e o sensor de temperatura sem contato, posicionado atrás do corpo de prova distante 30 mm deste. Já as Figuras 29(b) e 29(c) são as fotos detalhadas do corpo de prova e dos sensores de temperatura, tanto os de contato (termopar), quanto o sensor sem contato (sensor IR). Em uma das extremidades das barras de metalon foram acrescentadas uma tábua de madeira servindo como base de sustentação. Os 4 parafusos e 4 porcas, que em conjunto com a chapa metálica, serviram para a confecção de uma estrutura cuja barra horizontal (perfilado), pode ter sua altura em relação à mesa de impressão facilmente regulada, o que facilita o ajuste mais conveniente da lâmpada e da ventoinha. A Figura mostra a foto da montagem da estrutura de sustentação. Até nesse momento, as lâmpadas foram acondicionadas em um refletor tubular circular revestido de

Figura 57 – Figura estilizada da montagem do pré-teste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Plataforma de aquisição de dados.



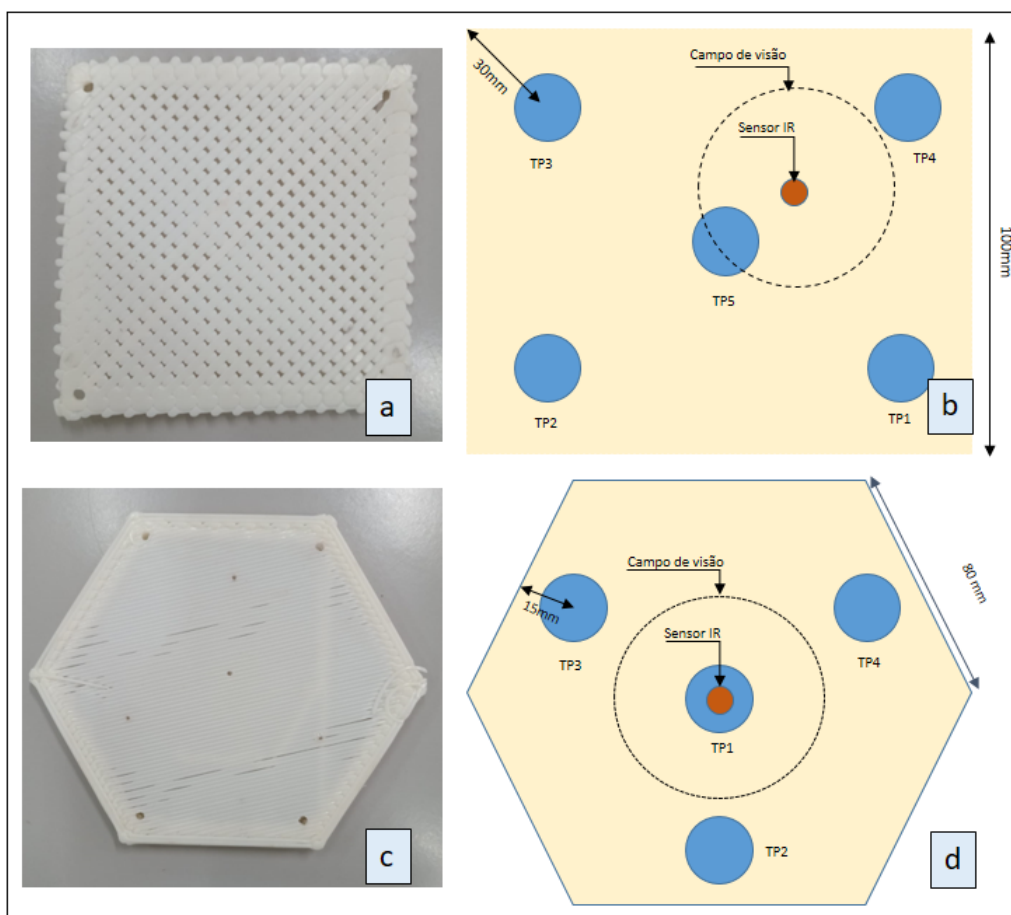
Fonte: Elaborada pelo autor.

material reflexivo, pois aqui foi testado o poder de aquecimento do sistema. Na Figura 30, temos o desenho estilizado da montagem, sendo (d) a distância entre corpo de prova e sensor, e (D) a distância entre a fonte de radiação (luz IR) e o corpo de prova. Foram feitos dois testes, cada um usando um corpo de prova de geometria diferente, para ver como o sistema se comportava. Os terminais dos termopares estão ligados ao módulo NI-9213, que se encaixa ao CompactDAQ que é uma plataforma de aquisição de dados construída pela National Instruments. A plataforma integra *hardware* de E/S de dados com o *software* labVIEW. O sensor sem contato enviava os dados coletados para a planilha de coleta de dados, via placa microcontrolada. A potência de radiação infravermelha foi controlada pelo *dimmer*.

A.1.1 Metodologia do pré-teste

Para os testes iniciais, foram usados dois corpos de prova de formatos diferente. Para o Teste-1 usou-se uma peça retangular de ABS medindo 100x100x2 mm e pesando 15,5 g. Posteriormente, para o Teste-2, foi usada uma peça no formato hexagonal medindo 80x1,5 mm, pesando 34 g.

Figura 59 – Corpos de prova utilizados, sendo: a) foto real; b) desenho estilizado do mesmo e a posição dos sensores; c) foto real; d) desenho estilizado do mesmo e a posição dos sensores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Teste-1:

Foi feito o aquecimento da peça representada na Figura 59(a), e sua representação se encontra na Figura 59(b), onde é mostrada a localização aproximada do ponto dos sensores termopar "pontos azuis"(TP1, TP2, TP3, TP4, TP4), e o "ponto vermelho"(sensor), além do campo de visão aproximado do sensor. Para o Teste-1 foram feitos três tipos de combinações de aquecimento, resfriamento e variações nas distâncias entre sensor e corpo de prova e lâmpada e corpo de prova foram executadas. Cada combinação diferente recebeu os nomes de Teste-1A, Teste-1B e Teste-1C. Para cada um destes testes, algumas variáveis foram fixadas e outras foram variadas ao longo do tempo. Para cada início de teste, os corpos de prova se encontravam na temperatura ambiente. Conforme o aquecimento proporcionado pelas lâmpadas era ligado, a temperatura variou, e essa variação foi coletada pelo sensor IR e plotada usando-se o *software GNU Octave*. Entre colchetes se encontra o tempo de estabilização equivalente a cada modificação de variável imposta.

Teste-1A - Foram fixadas as seguintes variáveis de potências e distâncias:

D=315 mm;

d=3,9 mm;

Lâmpada operando em meia potência;

Resfriamento operando em meia potência.

Variáveis modificadas ao longo do tempo:

[0 - 2]min - lâmpadas desligadas. Resfriamento desligado;

[2 - 26]min - lâmpadas ligadas e resfriamento ligado;

[26 - 35]min - lâmpadas desligadas e resfriamento ligado.

As curvas correspondentes se encontram na Figura 61. Nesse teste (Teste-1A), verificou-se que a leitura do sensor IR ficou ligeiramente maior do que as dos termopares. Uma consequência para isso, foi que a grande aproximação do sensor com o corpo de prova, fez com que o sensor lê-se um ruído gerado pela lâmpada infravermelha que passava diretamente desta para o sensor IR, pois o corpo de prova não era totalmente opaco, e sim possuía espaços vazios em sua estrutura, que possibilitou a passagem da radiação infravermelha das lâmpadas diretamente para o sensor. Porém, a resposta do sensor IR em relação às variações de temperatura foram próximas dos termopares.

Teste-1B - Foram fixadas as seguintes variáveis de potências e distâncias:

D=315 mm constante ao longo do tempo;

d=12,9 mm constante ao longo do tempo;

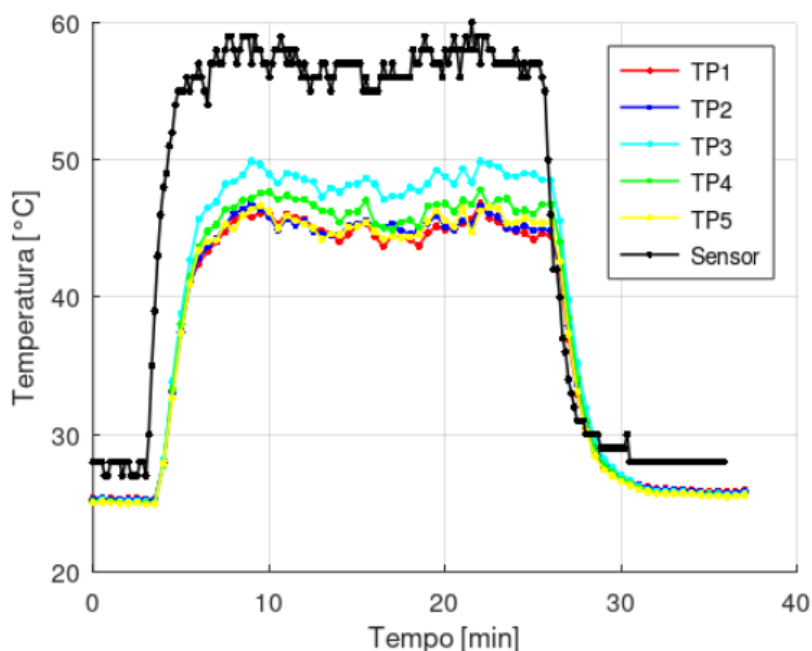
Lâmpada operando em meia potência;

Figura 60 – Cronograma do Teste-1A.

Tempo [minutos]	[0 – 2]	[2 – 26]	[26 – 35]
Lâmpada potência = 0,5 KW			
Lâmpada potência = 1 KW			
Resfriamento			
D = 315 [mm]			
d = 3,9 [mm]			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Teste-1A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Resfriamento operando em meia potência.

Variáveis modificadas ao longo do tempo:

[0 - 3]min - Resfriamento ligado e lâmpadas desligadas;

[3 - 17]min - Resfriamento ligado e lâmpadas ligadas;

[17 - 25]min - Resfriamento ligado e lâmpadas desligadas.

As curvas correspondentes se encontram na Figura 63. A diminuição dos valores lidos pelo sensor IR em relação ao gráfico da Figura 61 se deve ao afastamento do sensor em relação ao corpo de prova, o que fez com que este cubra uma área maior do corpo de prova, sendo este então influenciado mais pela temperatura efetiva do material do que pela transpassagem da radiação infravermelha pelo mesmo.

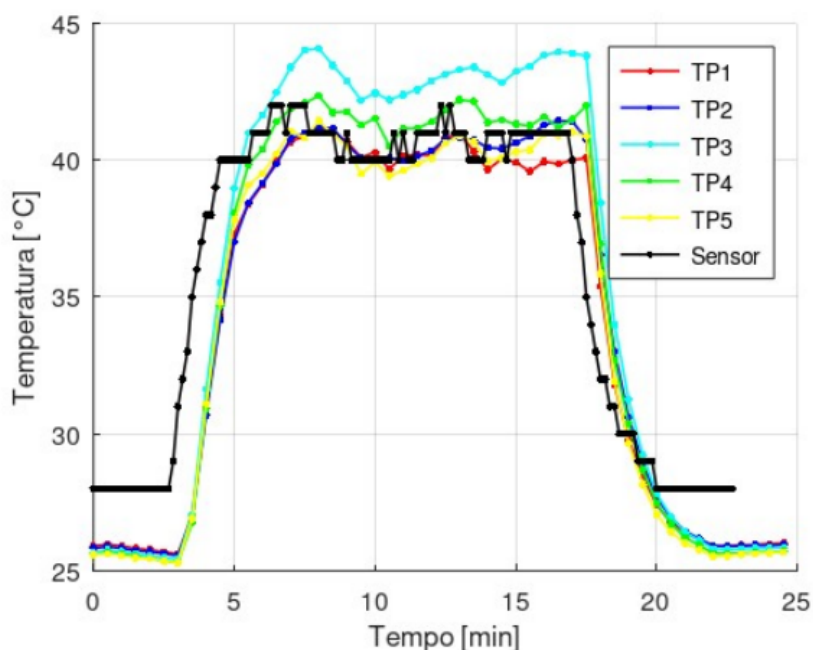
Teste-1C - Foram fixadas as seguintes variáveis:

Figura 62 – Cronograma do Teste-1B.

Tempo [minutos]	[0 – 3]	[3 – 17]	[17 – 25]
Lâmpada potência = 0,5 KW			
Lâmpada potência = 1 KW			
Resfriamento			
D = 315 [mm]			
d = 3,9 [mm]			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Teste-1B.



Fonte: Elaborada pelo autor.

D=315 mm constante ao longo do tempo.

Variáveis modificadas ao longo do tempo:

[1 - 44]min - Meia potência das lâmpadas. Porém nesse intervalo foi alterada a distância do sensor, que passou de 12,9 para 27 mm aos 19 s. Também, ainda nesse intervalo de tempo, a distância entre sensor e corpo de prova foi alterada de 27 para 46 mm aos 30 s.

[44 - 60]min - potência máxima das lâmpadas;

[60 - 75]min - ventilador com potência máxima.

Ventilador desligado aos 50 min. Neste teste, observou-se a uma coerência entre os valores lidos pelos termopares e pelo sensor IR. As curvas correspondentes se encontram na Figura 63.

Teste-2:

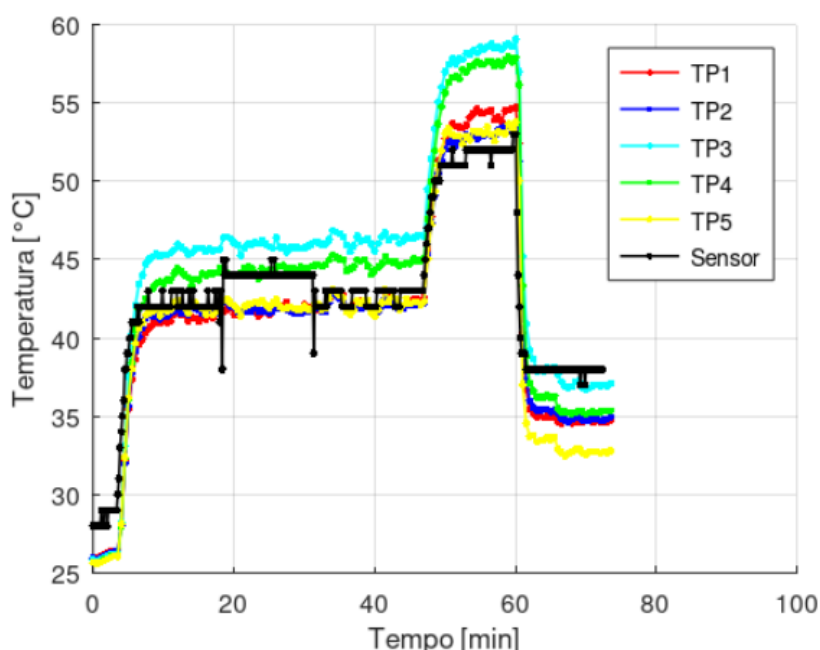
Foi feito o aquecimento da peça mostrada na Figura 59(c), e sua representação se encontra

Figura 64 – Cronograma do Teste-1C.

Tempo [minutos]	[0 – 19]	[19 – 30]	[30 – 44]	[44 – 60]	[60 – 75]
Lâmpada potência = 0,5 KW					
Lâmpada potência = 1 KW					
Resfriamento					
D = 315 [mm]					
d = 12,9 [mm]					
d = 27 [mm]					
d = 46 [mm]					

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 – Teste-1C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

na Figura 59(d) onde é mostrada a localização aproximada do ponto dos sensores termopar "pontos azuis"(TP1, TP2, TP3, TP4) e o "ponto vermelho"(sensor), além do campo de visão aproximado do sensor. O Teste-2 foi executado utilizando-se de apenas uma combinação de aquecimento e resfriamento, e as distâncias e ntre sensor e corpo de prova e lâmpada e corpo de prova foram mantidas constantes ao longo do tempo.

D = 250 mm constante ao longo do tempo;

d = 30 mm constante ao longo do tempo;

Variáveis modificadas ao longo do tempo:

[0 - 2]min:

Lâmpadas desligadas; Resfriamento desligado;

[2 - 7]min:

Lâmpadas ligadas com metade da potência; Resfriamento desligado;

[7 - 13]min:

Lâmpadas reguladas na potência máxima; Resfriamento desligado;

[13 - 18]min:

Lâmpadas reguladas na potência máxima; Resfriamento ligado na potência máxima;

[18 - 23]min:

Lâmpadas reguladas com metade da potência; Resfriamento ligado na potência máxima.

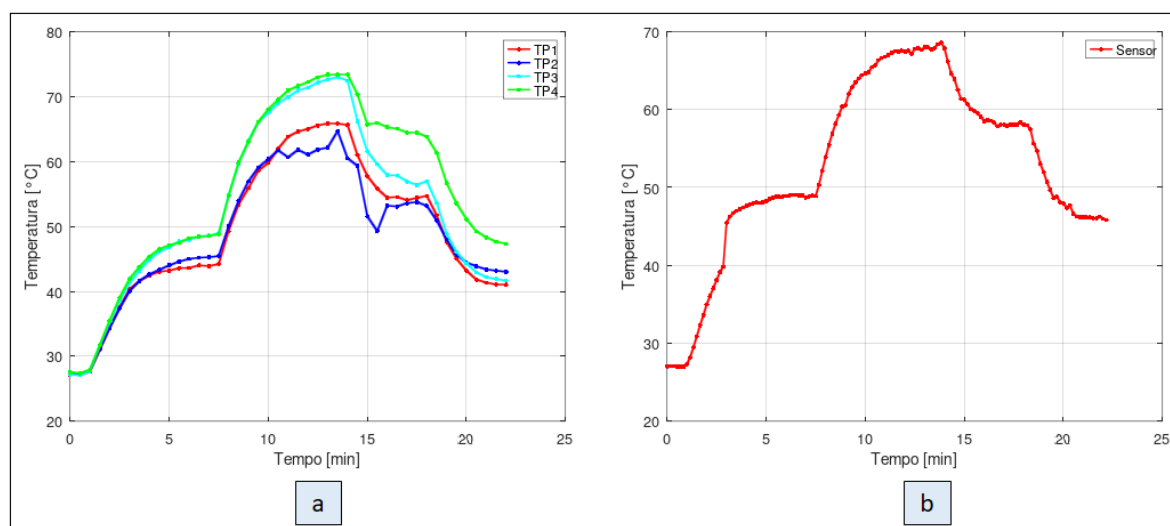
A resposta das variações dos termopares ao longo do tempo estão indicadas na Figura 67(a), enquanto a resposta do sensor IR está indicada na Figura 67(b).

Figura 66 – Cronograma do Teste-2.

Tempo [minutos]	[0 - 2]	[2 - 7]	[7 - 13]	[13 - 18]	[18 - 23]
Lâmpada potência = 0,5 KW					
Lâmpada potência = 1 KW					
Resfriamento					
D = 250 [mm]					
d = 30 [mm]					

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 67 – Teste-2.



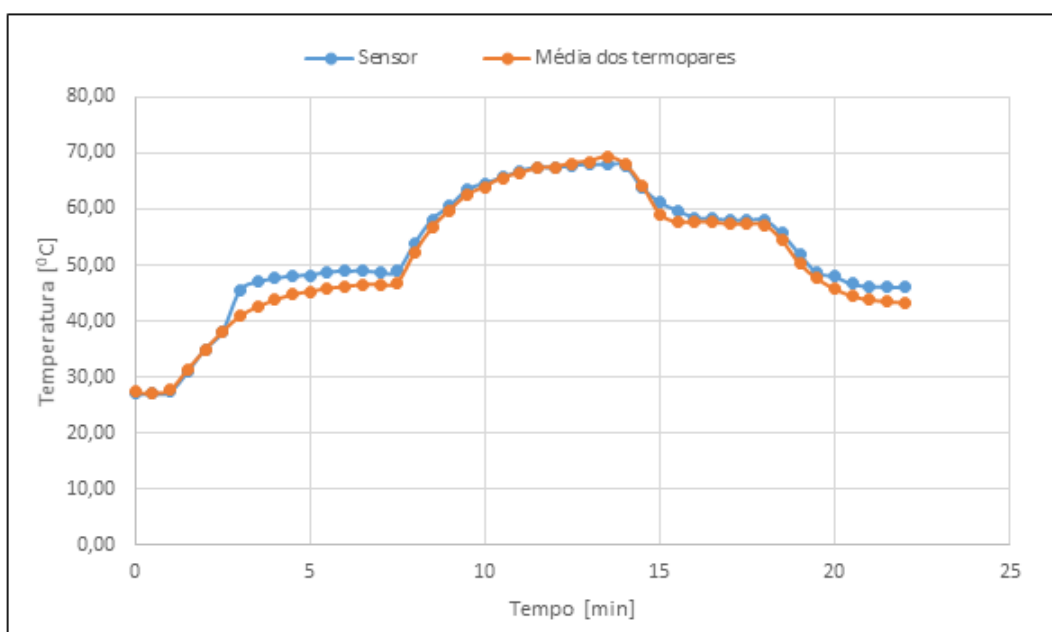
Fonte: Elaborada pelo autor.

A.1.2 Comparação dos valores das leituras entre sensor e termopares

Os dados coletados de temperatura em função do tempo, para a realização do Teste-2, foram utilizados para se determinar o grau de igualdade entre os valores de temperatura coletados pelos sensores termopares de contato físico, e o sensor infravermelho. Os valores numéricos das

análises descritivas dos dados de registro de temperatura para os diferentes equipamentos de sensoramento testados são compatíveis. Os dados foram tabulados, realizada análise descritiva de valores mínimo, máximo, média aritmética e desvio padrão, usando-se os recursos do software Excel. A Figura 68 representa o gráfico da média dos 4 termopares comparada com o valor do sensor sem contato por infravermelho. O gráfico do desvio padrão entre a leitura do sensor e a média dos termopares está indicado na Figura 69.

Figura 68 – Gráfico da leitura do sensor e da média dos termopares.

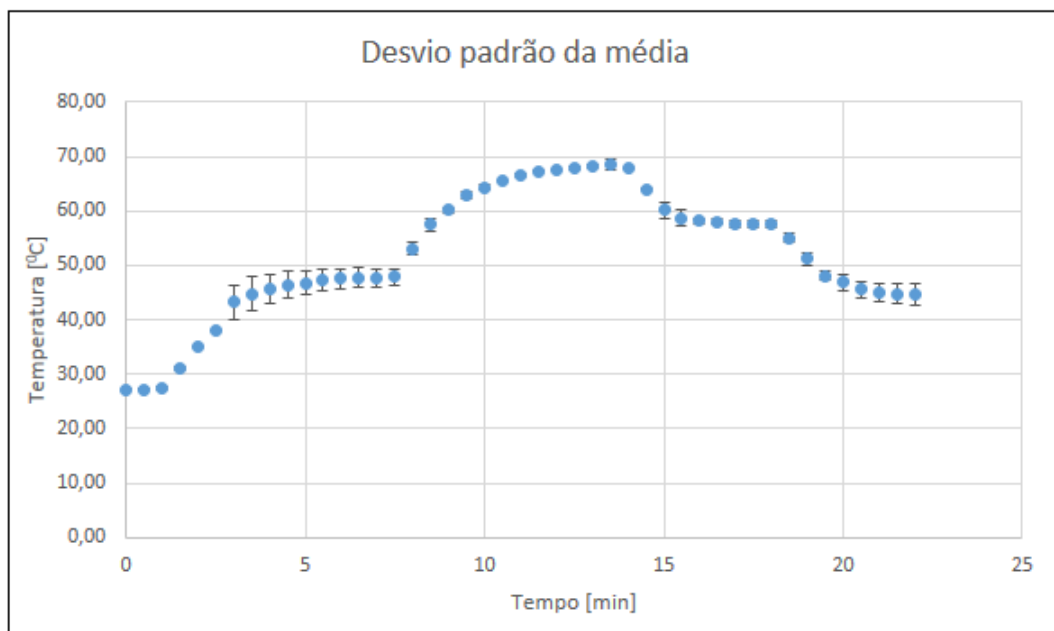


Fonte: Elaborada pelo autor.

A.1.3 Resultados do pré-teste

Tanto no Teste-1 quanto no Teste-2, percebe-se que os termopares que se encontram instalados na parte superior dos corpos de prova, registraram maiores valores de temperatura. Este fato se deve por causa do efeito da convecção do ar quente gerado no corpo de prova. Quanto ao posicionamento do sistema de aquecimento, quanto mais próximo este estiver do corpo de prova, ou seja, quanto menor for a distância (D), maiores são as temperaturas alcançadas, e também a distância (d) entre sensor e corpo de prova tem uma certa significância, o que nos fez estabelecer essa distância, para os testes na célula de manufatura, sendo de 30 mm.

Figura 69 – Gráfico do desvio padrão entre a leitura do sensor e a média dos termopares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – PROGRAMA

```

1 #include <Wire.h> //biblioteca de comunicação sem fio
2
3 #include <Adafruit_MLX90614.h> //biblioteca do sensor
4
5 #include <LiquidCrystal.h> //biblioteca do visor LCD
6
7 int linha=0; //define variável linha como sendo do tipo inteira
8 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614 (); //faz a chamada da função
9 int temp_amb; //define a variável temp_amb como sendo do tipo inteira
10 int temp_obj; //define a variável temp_obj como sendo do tipo inteira
11
12 LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
13
14 void setup() {
15
16   Serial.begin(9600);
17   Serial.println("CLEARDATA");
18   Serial.println("LABEL, HORA, TEMPERATURA, LINHA"); //escreve os cabeçalhos no excel
19   Serial.println("RESETTIMER");
20   lcd.begin(16, 2); //faz a chamada da função LCD
21   mlx.begin(); //faz a chamada da função sensor
22 }
23
24 void loop() {
25
26   lcd.clear();
27
28   temp_amb = mlx.readAmbientTempC();
29   temp_obj = mlx.readObjectTempC();
30
31
32   linha++; //incrementa a variável linha
33   Serial.print("DATA, TIME,"); //escreve o valor da temp. e da hora no excel
34
35   Serial.print(temp_obj); //escreve a temp no visor LCD
36   Serial.print(",");
37   Serial.println(linha);
38   Serial.println(" ,");
39
40
41   lcd.setCursor(2, 0); //leva o cursor na coluna2, linha Zero
42   lcd.print("TEMP_OBJ="); //escreve a temp no display
43   lcd.print( temp_obj ); //escreve a temp no display

```

```
44  lcd.write(B11011111); //simbolo de grau
45  lcd.print("C");
46
47
48  delay(4000); // tempo entre cada leitura
49 }
```