



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

LUÍS FERNANDO DE LIMA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE E DA ORIENTAÇÃO DE
CONSTRUÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PLA APÓS
IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO**

UBERABA/MG

2021



LUÍS FERNANDO DE LIMA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE E DA ORIENTAÇÃO DE
CONSTRUÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PLA APÓS
IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, área de concentração Processos Tecnológicos, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano

UBERABA/MG

2021

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

L698i Lima, Luís Fernando de
Influência da temperatura ambiente e da orientação de
construção no comportamento mecânico do PLA após impressão 3D
por extrusão / Luís Fernando de Lima. -- 2021.
130 p. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021
Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano

1. Fabricação de filamento fundido. 2. Prototipagem rápida. 3.
Comportamento termomecânico. 4. Ácido polilático. 5. Extrusão. 6.
Câmara ambiental. I. Shimano, Marcos Massao. II. Universidade
Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 678.027.3:669.018.2

LUÍS FERNANDO DE LIMA

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE E DA ORIENTAÇÃO DE CONSTRUÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PLA APÓS IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 25 de fevereiro de 2021

Banca Examinadora:

Dr. Marcos Massao Shimano – Orientador
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Vinicius Abrão da Silva Marques
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Arthur Alves Fiocchi
Universidade Federal de Uberlândia



Documento assinado eletronicamente por **MARCOS MASSAO SHIMANO, Professor do Magistério Superior**, em 25/02/2021, às 12:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#) e no art. 14 da [Resolução nº 34, de 28 de dezembro de 2017](#).

Documento assinado eletronicamente por **VINICIUS ABRAO DA SILVA MARQUES, Professor do Magistério Superior**, em 25/02/2021, às 13:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art.



6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#) e no art. 14 da [Resolução nº 34, de 28 de dezembro de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi, Usuário Externo**, em 08/03/2021, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#) e no art. 14 da [Resolução nº 34, de 28 de dezembro de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0476903** e o código CRC **6E956736**.

Dedico a minha mãe por me incentivar durante toda minha vida e a minha esposa pelo apoio nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado saúde e paz.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Massao Shimano por todo o incentivo para realização deste trabalho. Obrigado pela disponibilidade, pela paciência, pela dedicação, pelos ensinamentos e pela motivação. O senhor é um exemplo de profissionalismo e sou muito grato por tê-lo como orientador.

À Maria Ivone, minha querida mãe, que cuidou de mim e sempre me incentivou a estudar, sem ela eu não teria chegado até aqui.

À Ana Maria, minha amada esposa, que compartilhou todos os momentos comigo nesta jornada, sempre me apoiando e acreditando em mim.

Ao colega Leandro Ribeiro Alves, técnico de refrigeração do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, por ter sido de suma importância para o desenvolvimento deste projeto, disponibilizando o seu tempo e conhecimento para a construção da bancada de refrigeração.

Aos professores Dr. Albert Willian Faria e Dr. Tobias Anderson Guimarães, por terem participado da minha qualificação e me ajudado com correções para o projeto final.

Ao professor Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques pela ajuda na etapa inicial do projeto, participando das discussões sobre as possíveis configurações de montagem da bancada e do controle de temperatura.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica pela oportunidade e um agradecimento especial ao secretário Ênio, pelo atendimento, pelas informações e pelo acompanhamento de todos os prazos.

A todos os professores e colegas de sala do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, por compartilharem momentos, ensinamentos e experiências.

A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UFTM, pela bolsa concedida.

A todos meus familiares que acreditaram em mim e me incentivaram.

E a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

A todos, deixo aqui a minha gratidão.

RESUMO

A compreensão do comportamento termomecânico dos materiais é de suma importância para os pesquisadores e para a indústria no geral. Desde o processo de fabricação até o uso do produto final, a temperatura é um fator determinante, uma vez que diferentes variações de temperatura podem causar diferentes resultados nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do material escolhido para determinada aplicação. O presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do PLA (ácido polilático) através da execução de ensaios de tração e de flexão em três pontos em corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando a tecnologia FFF (fabricação com filamento fundido). Os ensaios foram realizados em três diferentes temperaturas: 5 °C, 25 °C e 45 °C. Para isso, foi construído um equipamento capaz de controlar a temperatura durante a realização dos ensaios, com funcionamento similar ao de uma câmara ambiental comercial. Os corpos de prova foram impressos em três orientações diferentes (*flat*, *on-edge* e *upright*) e distribuídos em 9 grupos experimentais de 5 unidades para cada temperatura e orientação, totalizando 45 corpos de prova para cada ensaio. Foram analisadas a tensão máxima, o módulo de elasticidade e o limite de escoamento, sendo utilizado testes de análise de variância para verificar se havia diferença significativa entre os grupos. Nos ensaios à 5 °C os resultados mostraram que a diminuição da temperatura causa um aumento na rigidez do PLA, gerando um comportamento frágil com maiores valores de tensão e menores valores de deformação. Nos ensaios à 25 °C foi evidenciado um comportamento dúctil intermediário. Nos ensaios à 45 °C foi observado uma queda na resistência e um aumento da plasticidade do PLA, devido à proximidade da temperatura de transição vítrea. Os corpos de prova impressos nas orientações *flat* e *on-edge* apresentaram desempenho mecânico superior e similar. Por outro lado, os corpos de prova impressos na orientação *upright* apresentaram os menores valores das propriedades mecânicas analisadas, devido ao sentido de deposição das camadas em relação ser perpendicular ao sentido de aplicação das forças, o que causou a ruptura prematura dos corpos de prova durante os ensaios.

Palavras-chave: FFF, impressão 3D, comportamento termomecânico, PLA, câmara ambiental.

ABSTRACT

Understanding the thermomechanical behavior of the materials is essential for the researchers and the industry in general. From the manufacturing process to the use of the final product, temperature is a determining factor, since different temperature variations can cause different results in the physical, chemical and mechanical properties of the material chosen for a given application. The present work aimed to analyze the effect of temperature on the mechanical properties of PLA (polylactic acid) through tensile and three-point bending tests on specimens manufactured by 3D printing using FFF (Fused Filament Fabrication). The tests were carried out under three different temperatures: 5 °C, 25 °C and 45 °C. For this, an equipment capable of controlling the temperature during the tests was built, with operation similar to that of a commercial environmental chamber. The specimens were printed in three different orientations (flat, on-edge and upright) and distributed in 9 experimental groups of 5 units for each temperature and orientation, totaling 45 specimens for each test. The maximum stress, the modulus of elasticity and the yield limit were analyzed, and analysis of variance tests were used to verify if there was a significant difference between the groups. At 5 °C, the results showed that the decrease in temperature causes an increase in the stiffness of the PLA, creating a fragile behavior with higher stress values and lower strain values. In tests at 25 °C an intermediate ductile behavior was evidenced. At 45 °C, the results showed a drop in resistance and an increase in PLA plasticity, due to the proximity of the glass transition temperature. The specimens printed in the flat and on-edge orientations showed superior and similar mechanical performance. On the other hand, the specimens printed in the upright orientation showed the lowest values of the mechanical properties analyzed, due to the direction of deposition of the layers being perpendicular to the direction of the applied load, which caused the premature rupture of the specimens during the tests.

Keywords: FFF, 3D printing, thermomechanical behavior, PLA, environmental chamber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E QUADROS

Figura 1 – Principais etapas de um processo de impressão 3D.....	24
Figura 2 – Esquema de uma impressão baseada em FFF	26
Figura 3 – Obras feitas em impressão 3D: à esquerda decoração feita por Dizingof, à direita vestido feito por Pia Hinze	30
Figura 4 – Urbee, desenvolvido pela Kor Ecologic.....	31
Figura 5 – THOR desmontado e equipe de engenheiros	32
Figura 6 – <i>Chicon House</i> , feita pela empresa ICON	33
Figura 7 – Desenho esquemático básico e etapas do ciclo ideal de um sistema de refrigeração por compressão de vapor.....	35
Figura 8 – Diagrama mostrando as diferenças entre o ciclo teórico e o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor.....	36
Figura 9 – Desenho esquemático mostrando as orientações de construção <i>upright</i> , <i>on-edge</i> e <i>flat</i> e o detalhe da deposição de camadas	41
Figura 10 – Corpos de prova impressos para ensaio de tração nas orientações (a) <i>Flat</i> , (b) <i>On-edge</i> , (c) <i>Upright</i>	42
Figura 11 – Corpos de prova impressos para ensaio de flexão em três pontos nas orientações (a) <i>Flat</i> , (b) <i>On-edge</i> , (c) <i>Upright</i>	43
Figura 12 – Desenho esquemático do equipamento	44
Figura 13 – Registro fotográfico da Câmara 1 e alguns componentes, com setas indicando o fluxo do ar	45
Figura 14 – Registro fotográfico da Câmara 2 e alguns componentes.....	46
Figura 15 – Compressor Embraco FFI 8,5 HAK.....	47
Figura 16 – Trocador de calor CDE 2775.....	48
Figura 17 – Registro fotográfico da bancada de refrigeração (vista superior)	49
Figura 18 – Posicionamento dos termômetros dentro da Câmara 2 durante o ensaio de flexão.....	50
Figura 19 – Desenho esquemático do corpo de prova para ensaios de tração.....	52
Figura 20 – Ensaio de tração	53
Figura 21 – Determinação do limite <i>n</i> no gráfico “Tensão x Deformação”	55
Figura 22 – Desenho esquemático do corpo de prova para ensaio de flexão em três pontos	56
Figura 23 – Ensaio de flexão em três pontos	57

Figura 24 – Desenho esquemático das forças envolvidas durante o ensaio de flexão e diagrama de momento fletor.....	58
Figura 25 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de tração à 5 °C	62
Figura 26 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de flexão à 5 °C	63
Figura 27 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de tração à 45 °C	63
Figura 28 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de flexão à 45 °C	64
Figura 29 – Gráficos com os resultados dos ensaios de tração sob três diferentes temperaturas, grupo <i>Flat</i>	67
Figura 30 – Gráficos com os resultados dos ensaios de tração sob três diferentes temperaturas, grupo <i>On-edge</i>	68
Figura 31 – Gráficos com os resultados dos ensaios de tração sob três diferentes temperaturas, grupo <i>Upright 5</i>	69
Figura 32 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão máxima obtidos no ensaio de tração.....	70
Figura 33 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação até a máxima obtidos no ensaio de tração	73
Figura 34 – Gráfico com valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade obtidos no ensaio de tração	76
Figura 35 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão no limite de escoamento obtidos no ensaio de tração	79
Figura 36 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação no limite de escoamento obtidos no ensaio de tração	82
Figura 37 – Gráficos com os resultados dos ensaios de flexão sob três diferentes temperaturas, grupo <i>Flat</i>	85
Figura 38 – Gráficos com os resultados dos ensaios de flexão sob três diferentes temperaturas, grupo <i>On-edge</i>	86
Figura 39 – Gráficos com os resultados dos ensaios de flexão sob três diferentes temperaturas, grupo <i>Upright</i>	87
Figura 40 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão máxima obtidos no ensaio de flexão	88

Figura 41 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação até a tensão máxima obtidos no ensaio de flexão.....	91
Figura 42 – Gráfico com valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade obtidos no ensaio de flexão.....	94
Figura 43 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão no limite de escoamento obtidos no ensaio de flexão	97
Figura 44 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação no limite de escoamento obtidos no ensaio de flexão	99
Figura 45 – Gráficos comparando o efeito da temperatura em cada orientação nos ensaios de tração	106
Figura 46 – Gráficos comparando o efeito da temperatura em cada orientação nos ensaios de flexão	108
Quadro 1 – Classificação das tecnologias de impressão 3D de acordo com o princípio de processamento das camadas.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição dos grupos experimentais.....	44
Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova tipo I	52
Tabela 3 – Valores da média \pm desvio padrão das medidas dos corpos de prova de cada grupo para os ensaios de tração	65
Tabela 4 – Valores da média \pm desvio padrão das medidas dos corpos de prova de cada grupo para os ensaios de flexão.....	65
Tabela 5 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão máxima obtidos nos ensaios de tração	70
Tabela 6 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a tensão máxima obtida nos ensaios de tração	71
Tabela 7 – Resultado dos testes ANOVA para a tensão máxima obtida nos ensaios de tração	71
Tabela 8 – Resultados dos testes de Tukey para a tensão máxima obtida nos ensaios de tração	72
Tabela 9 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação até a tensão máxima obtidos nos ensaios de tração.....	73
Tabela 10 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de tração ..	74
Tabela 11 – Resultado dos testes ANOVA para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de tração.....	74
Tabela 12 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de tração.....	75
Tabela 13 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de tração	76
Tabela 14 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração	77
Tabela 15 – Resultado dos testes ANOVA para o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração	77
Tabela 16 – Resultados dos testes de Tukey para o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração	78
Tabela 17 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão no limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração	79

Tabela 18 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração	80
Tabela 19 – Resultado dos testes ANOVA para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração.....	80
Tabela 20 – Resultados dos testes de Tukey para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração.....	81
Tabela 21 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação no limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração	82
Tabela 22 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração	83
Tabela 23 – Resultados dos testes ANOVA para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração	83
Tabela 24 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração	84
Tabela 25 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão máxima obtidos nos ensaios de flexão.....	88
Tabela 26 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para tensão máxima de flexão	89
Tabela 27 – Resultado dos testes ANOVA para tensão máxima de flexão.....	89
Tabela 28 – Resultados dos testes Tukey para tensão máxima de flexão.....	90
Tabela 29 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação até a tensão máxima obtidos nos ensaios de flexão	91
Tabela 30 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de flexão	92
Tabela 31 – Resultado dos testes ANOVA para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de flexão	92
Tabela 32 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de flexão	93
Tabela 33 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão	93
Tabela 34 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para módulo de elasticidade de flexão	94
Tabela 35 – Resultado dos testes ANOVA para módulo de elasticidade de flexão ..	95

Tabela 36 – Resultados dos testes de Tukey para módulo de elasticidade de flexão	95
Tabela 37 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão no limite de escoamento obtidos nos ensaios de flexão	96
Tabela 38 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão	97
Tabela 39 – Resultado dos testes ANOVA para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão	98
Tabela 40 – Resultados dos testes de Tukey para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão	98
Tabela 41 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação no limite de escoamento obtidos nos ensaios de flexão	99
Tabela 42 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão	100
Tabela 43 – Resultados dos testes ANOVA para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão	100
Tabela 44 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Tridimensional

ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene* – Acrilonitrila butadieno estireno

ANOVA – *Analysis of Variance*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CDP – Corpo de prova

DN – Diâmetro nominal

FDM – Fused Deposition Modeling – Modelagem por fusão e deposição

FFF – Fused Filament Fabrication – Fabricação com filamento fundido

HIPS – *High Impact Polystyrene* – Poliestireno de alto impacto

PET – *Polyethylene Terephthalate* – Politereftalato de etileno

PETG – *Polyethylene Terephthalate Glycol* – Politereftalato de etileno glicol

PLA – *Polylactic Acid* – Ácido polilático

PVC – *PolyvinylChloride* – Policloreto de vinila

UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – graus Celsius

b – largura da seção transversal [mm]

d – deslocamento [mm]

E – módulo de elasticidade ou módulo de Young [MPa]

F – carga aplicada [N]

g – grama

h – espessura da seção transversal [mm]

I – momento de inércia de área da seção transversal [mm³]

kN – quilonewton

L – distância entre os apoios [mm]

M – momento fletor [N.mm]

mm – milímetro

mm/min – milímetros por minuto

mm/s – milímetros por segundo

MPa – megapascal

N – Newton

T_g – temperatura de transição vítrea

p_{valor} – nível descritivo do teste estatístico

y – distância perpendicular da linha neutra até algum ponto da seção transversal [mm]

ε_t – deformação de tração [mm/mm]

ε_f – deformação de flexão [mm/mm]

σ_t – tensão mecânica de tração [MPa]

σ_f – tensão mecânica de flexão [MPa]

SUMÁRIO¹

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1 IMPRESSÃO 3D	23
3.2 FABRICAÇÃO COM FILAMENTO FUNDIDO (FFF).....	25
3.3 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS.....	27
3.3.1 Ácido polilático (PLA)	28
3.3.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	29
3.3.3 Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG)	29
3.4 APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D	30
3.5 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR	34
3.5.1 Ciclo ideal ou teórico	34
3.5.2 Ciclo real	36
3.6 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	40
4.2 GRUPOS EXPERIMENTAIS	43
4.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO.....	44
4.3.1 Câmaras térmicas	45
4.3.2 Bancada de refrigeração	47
4.3.3 Controle de temperatura	50
4.3.4 Sistema de aquecimento	51
4.4 ENSAIOS MECÂNICOS	51
4.4.1 Ensaio de tração	51
4.4.2 Ensaio de flexão em três pontos	55
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	60
5 RESULTADOS	62
5.1 CONTROLE DE TEMPERATURA	62

¹ - Trabalho formatado de acordo com as diretrizes do “Manual para apresentação de trabalhos acadêmicos baseado nas normas de documentação da ABNT” (UFTM, 2019).

5.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	64
5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	66
5.3.1 Tensão máxima de tração.....	70
5.3.2 Módulo de elasticidade.....	75
5.3.3 Limite de escoamento.....	78
5.4 ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	84
5.4.1 Tensão máxima	88
5.4.2 Módulo de elasticidade.....	93
5.4.3 Limite de escoamento.....	96
6 DISCUSSÃO	102
6.1 CÂMARA AMBIENTAL	103
6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	104
6.2.1 Ensaio de tração.....	105
6.2.2 Ensaio de flexão	107
7 CONCLUSÕES	110
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
REFERÊNCIAS.....	112
APÊNDICES	117

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, inovações surgem a todo momento. O aumento da concorrência do mercado e da complexidade dos produtos exige das empresas alterações constantes nos meios de produção utilizados, visando reduzir o tempo de produção e aumentar o lucro (VOLPATO, 2017). Assim, características como durabilidade, resistência, densidade, velocidade de fabricação, sustentabilidade, custo de fabricação, entre outras, são determinantes na escolha do material e do meio de produção a ser utilizado em um determinado objeto ou estrutura.

Outro fator determinante para a escolha do material é a temperatura de trabalho. Desde o processo de fabricação até o uso do produto final, a temperatura influencia diretamente nas propriedades mecânicas, químicas e físicas do material, podendo gerar os mais variados resultados. Os polímeros são altamente sensíveis a temperatura, apresentando limitações quando expostos a variações de temperatura elevadas. Logo, a compreensão do comportamento termomecânico dos polímeros é sempre estudada pela indústria, a fim de escolher o melhor material para uma determinada aplicação (CANEVAROLO JR, 2006).

Dentre as diversas aplicações dos polímeros na indústria, a manufatura aditiva vem se destacando. Segundo Volpato (2017), os principais processos de fabricação são baseados em moldagem, remoção, conformação, união e/ou divisão dos seus componentes. Em 1980, o pesquisador japonês Hideo Kodama apresentou a estereolitografia que viria a se tornar o primeiro processo de fabricação que possui princípios baseados na adição de material (PORTO, 2016). Dessa maneira, a manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D (tridimensional), cresceu exponencialmente nas últimas décadas, com diversos pesquisadores estudando e desenvolvendo novas maneiras de aumentar a eficiência da produção, tais como Souza e Botura Jr. (2016), Abreu (2015) e Azevedo (2013).

A impressora 3D, ainda considerada por muitos como um modelo futurístico, vem se popularizando cada vez mais, apresentando um potencial de alterar toda cadeia produtiva de alguns setores (SILVA et al., 2018). Anderson (2012) descreve em seu livro que, com essa nova tecnologia, não será mais necessário nem mesmo entender sobre o processo de fabricação de algum objeto, já que a impressora, controlada por computador, irá fazer todo o serviço. Segundo o mesmo autor, “[...] a distância entre inventor e empreendedor foi tão encurtada que praticamente não existe

mais”, pois qualquer pessoa poderá criar os seus próprios objetos da maneira que atenda às suas necessidades. Porém, essa tecnologia ainda não é *plug and play*, ou seja, ainda é necessário ter um conhecimento técnico para configurar a impressora e para saber o que fazer caso ocorra algum problema durante a impressão, uma vez que diversos erros podem acontecer tais como o entupimento ou o vazamento do bico, o empenamento das bordas, a falta de camadas, a falta de precisão e outros (3DFILA, 2020).

Existem diferentes tecnologias para impressão 3D e, conseqüentemente, diferentes materiais e formas de aplicação destes. Segundo Moilanen e Vadén (2013), a tecnologia mais utilizada atualmente é a FFF (*Fused Filament Fabrication* – Fabricação com filamento fundido), que foi utilizada neste trabalho e será abordada mais adiante.

Para essa tecnologia, os materiais mais utilizados são o PLA (*Polylactic Acid*– Ácido polilático), o ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* – Acrilonitrila Butadieno Estireno), o PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol* – Poli Tereftalato de Etileno Glicol), o filamento flexível (constituído por uma mistura de poliuretano e pigmento), o filamento solúvel ou HIPS (*High Impact Polystyrene* – Poliestireno de alto impacto) e o filamento de madeira (constituído por uma mistura de madeira e PLA) (PORTELA, 2018).

Na literatura, é possível encontrar algumas pesquisas com diferentes abordagens sobre a influência da temperatura durante a impressão 3D. No trabalho de Martinhão (2019) foi analisado a influência da temperatura de extrusão do material e de outros fatores nas dimensões de peças de ABS; Castanheira (2016), estudou o uso de impressão 3D para isolamento térmico; Carneiro et al. (2019) abordaram a influência da temperatura da mesa de impressão na dureza e nas dimensões de peças de ABS. No entanto, após buscas no portal de Periódicos da CAPES e no portal ScienceDirect utilizando as palavras-chave relacionadas ao tema (temperatura, impressão 3D, extrusão, FDM, FFF e outras) não foram encontradas pesquisas que abordassem o efeito da temperatura e da orientação de construção nas características mecânicas de peças de PLA no uso final, ou seja, após a impressão. No trabalho de Chacón et al. (2017) foi abordado como a orientação de construção e outros fatores influenciam na resistência mecânica do PLA, porém não foi feita nenhuma análise relacionada a temperatura. Por outro lado, Grasso et al. (2018) analisou a influência da temperatura ambiente (ou temperatura de serviço) em peças de PLA fabricadas

por impressão 3D, porém foram realizados apenas ensaios de tração em temperaturas acima de 20 °C.

Diante do exposto, observou-se a necessidade de um estudo que abordasse o comportamento mecânico de peças de PLA fabricadas por impressão 3D quando expostas a variação de temperatura. Conforme comentado por Grasso et al. (2018), a literatura sobre a influência da temperatura ambiente em peças fabricadas por impressão 3D é precária e precisa ser mais abordada pelos pesquisadores. Porém, para realização deste trabalho, seria necessário um equipamento compatível com a máquina universal de ensaios e que permitisse a execução dos ensaios sob temperatura controlada. Este equipamento é chamado de câmara ambiental e consiste em uma caixa fechada que utiliza o princípio da convecção forçada, no qual o ar quente ou frio circula ao redor do corpo de prova para fornecer taxas de aquecimento ou resfriamento ideais, baixos gradientes térmicos e uma boa estabilidade térmica (INSTRON, 2017).

No entanto, as câmaras ambientais disponíveis no mercado são importadas e chegam a custar até US\$ 60.000,00, dificultando aplicações acadêmicas devido ao seu alto custo frente a realidade brasileira de pesquisa na academia (INSTRON, 2017). Para viabilizar este trabalho e futuros projetos, pensou-se no desenvolvimento de um equipamento de custo reduzido com funcionamento semelhante ao de uma câmara ambiental comercial para execução de ensaios mecânicos sob diferentes temperaturas.

Sendo assim, dado o vasto campo ainda a ser pesquisado sobre a aplicação de polímeros na manufatura aditiva, o presente trabalho tem como objetivos o estudo de algumas propriedades mecânicas do PLA e o desenvolvimento de uma câmara ambiental de custo reduzido.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em:

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi analisar o comportamento mecânico de corpos de provas de PLA fabricados por impressão 3D em três diferentes orientações de construção (*flat*, *on-edge* e *upright*) utilizando a tecnologia FFF, quando submetidos a diferentes temperaturas de utilização (5 °C, 25 °C e 45 °C).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar os ensaios de tração e flexão de acordo com as normas ASTM D638-14 e ASTM D790-17 em corpos de provas de PLA fabricados por impressão 3D pelo método FFF;
- Desenvolver e construir um aparato para controlar a temperatura ambiente durante a realização dos ensaios;
- Analisar a influência da temperatura e da orientação de construção nas propriedades mecânicas analisadas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir são apresentados os temas que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva ou impressão 3D é o processo de fabricação baseado na adição sucessiva de material na forma de camadas, através de informações obtidas de um modelo computacional tridimensional do objeto desejado (VOLPATO, 2017).

A nomenclatura deste princípio de fabricação é variada, possuindo várias designações. Na literatura é possível encontrar termos como prototipagem rápida, manufatura digital direta, manufatura rápida, manufatura por camada, fabricação de forma livre, entre outros, mas todos se referem ao mesmo processo de fabricação. Apesar da variedade de termos, o mais aceito pela academia e por parte da indústria para se referir a este processo de fabricação é a manufatura aditiva (VOLPATO, 2017). O termo impressão 3D também tem sido adotado pela sociedade em geral, pois com este termo é mais fácil transmitir o conceito do processo. Por essas razões, Volpato (2017) conclui que os termos corretos são manufatura aditiva e impressão 3D, que devem ser utilizados de acordo com o tipo de equipamento e do público-alvo. Também por essas razões, foi escolhido utilizar as duas nomenclaturas no presente trabalho.

De uma maneira generalista, pode-se dizer que a impressão 3D é dividida em quatro etapas. O processo tem início com a geração do modelo geométrico tridimensional do objeto por sistema computacional. Então, esse modelo é convertido para um formato específico de impressão 3D, que depende da tecnologia que será utilizada e então é “fatiado” eletronicamente, definindo onde será depositado o material em cada camada. A partir do fatiamento, é gerado um código com os comandos que a impressora irá realizar para fabricar o objeto. Por fim, a peça é fabricada e então é pós-processada. Esta etapa final varia de acordo com a tecnologia utilizada, mas pode envolver limpeza, acabamento e outros (VOLPATO, 2017). A Figura 1 ilustra esse passo a passo.

Figura 1 – Principais etapas de um processo de impressão 3D

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato, 2017

Desde o desenvolvimento da estereolitografia, diversas tecnologias de impressão 3D surgiram a fim de suprirem diferentes necessidades. No Quadro 1 é mostrado as sete categorias atualmente existentes, o resumo de cada um dos princípios de fabricação e algumas tecnologias existentes dentro de cada categoria.

Quadro 1 – Classificação das tecnologias de impressão 3D de acordo com o princípio de processamento das camadas

Categorias	Descrição do princípio de processamento das camadas	Exemplos de tecnologias na categoria
Fotopolimerização	Solidificação de um polímero líquido (resina)	Estereolitografia, produção contínua com interface líquida
Extrusão	Extrusão de um material através de um bico	Modelagem por fusão e deposição (FDM), Fabricação com filamento fundido (FFF), <i>RepRap, Fab@Home</i>
Jateamento	Deposição do material em pequenas gotas	<i>PolyJet, MultiJet Printing</i>
Jateamento de aglutinante	Deposição de um agente aglutinante para unir os materiais em pó	<i>ColorJet Printing, VoxelJet, ExOne</i>
Fusão de leito de pó	Fusão por energia térmica de um leito de pó do material	Sinterização seletiva a laser, sinterização direta de metal a laser
Adição de lâminas	Ligação de lâminas do material para formar o objeto	Manufatura laminar de objetos, deposição seletiva de laminados
Deposição com energia direcionada	Fusão por energia térmica de um material de acordo com que ele é depositado	Forma final obtida com laser, deposição direta de metal

Fonte: Adaptado de Volpato (2017) e van Wijk (2015)

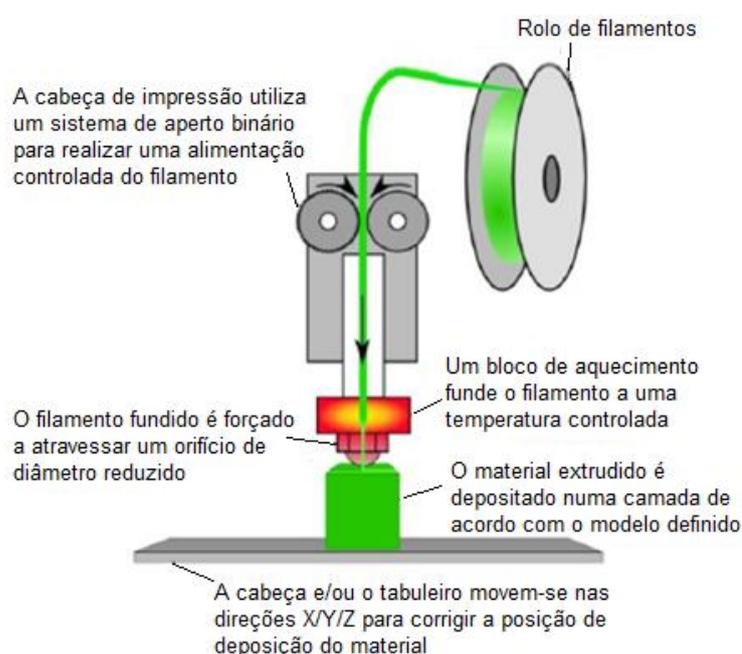
3.2 FABRICAÇÃO COM FILAMENTO FUNDIDO (FFF)

A fabricação com filamento fundido (FFF) é o nome dado à tecnologia de manufatura aditiva por extrusão de material baseada na tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM), desenvolvida em 1988 pela empresa *Stratasys Ltd.* Ambos termos se referem ao mesmo processo, porém o termo FDM foi registrado pela

Stratasys, criando a necessidade de um novo termo que pudesse ser utilizado livremente pela comunidade e pela academia. Essa tecnologia de impressão 3D é uma das mais importantes, sendo que grande parte das outras tecnologias que surgiram posteriormente (*Fab@Home* e *RepRap*) foram baseadas na FDM (VOLPATO, 2017).

O processo de fabricação consiste na fusão e deposição de algum material em uma plataforma, em sucessivas camadas. Primeiramente, o modelo geométrico tridimensional do objeto a ser fabricado é feito em um computador. Então, ele é convertido para o *software* onde é feito um fatiamento do modelo digital e é gerado um código com a sequência de ações que a impressora deverá seguir para imprimir o objeto. O material escolhido, em forma de filamento, é colocado em uma bobina e então passa pelo motor da extrusora, onde ele é aquecido até o seu derretimento e é depositado na plataforma. O material depositado se solidifica quando em contato com a camada inferior, uma vez que a temperatura da câmara é inferior à do material depositado. Quando a camada é finalizada, a plataforma se desloca verticalmente para que o bico extrusor possa imprimir a camada seguinte, se deslocando nos planos horizontais. Em algumas impressoras, existe um bico extrusor secundário que imprime estruturas de suporte quando necessário (VOLPATO, 2017; CASTANHEIRA, 2016). Na Figura 2 é ilustrado o esquema de uma impressora baseada em FFF.

Figura 2 – Esquema de uma impressão baseada em FFF



Fonte: Adaptado de Moreira, 2016

Com o fim da proteção industrial das patentes de FDM, várias tecnologias baseadas em FDM foram desenvolvidas, o que gerou um aumento na concorrência no mercado e, conseqüentemente, uma redução drástica no preço das impressoras. Como resultado, a impressão 3D vem se popularizando cada vez mais, sendo possível encontrar impressoras a partir de R\$ 1.000,00 (MOREIRA, 2016; PORTELA, 2018).

3.3 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Os polímeros termoplásticos são aqueles que podem sofrer vários ciclos de aquecimento e resfriamento sem causar danos significativos ao material, o que possibilita o reprocessamento e a reciclagem até um certo limite (BIRON, 2018). Com o aumento da temperatura, o material diminui a sua viscosidade e consegue fluir e assumir diversos formatos com maior facilidade, enquanto com a diminuição da temperatura, ele se solidifica e mantém a forma desejada. Como esta transição entre o estado deformável e o estado rígido é física, ou seja, não acontece nenhuma ligação química entre as cadeias poliméricas, este processo acaba sendo completamente reversível (VASSOLER, 2007).

Essa temperatura no qual ocorre a transição é chamada de temperatura de transição vítrea (T_g). De acordo com Canevarolo Jr. (2006), a temperatura de transição vítrea é o valor de temperatura no qual o material passa de um estado rígido para um estado mais flexível, devido ao ganho de mobilidade das cadeias poliméricas. Não existe um valor fixo para essa temperatura, uma vez que ela pode ser afetada por inúmeros fatores, tais como polaridade, simetria, massa molecular e outros. Os valores típicos da temperatura de transição vítrea do PLA encontrados na literatura variam entre 45 a 80 °C (PEREIRA e MORALES, 2014; CANEVAROLO JR., 2006).

Não existe regra definida para determinar a quantidade de vezes que um polímero pode ser reciclado, porém existem pesquisas que abordam qual é o limite no qual as propriedades dos polímeros são mantidas, sendo realizados testes experimentais para descobrir qual o número de processamentos necessários para causar uma perda significativa nas propriedades mecânicas do material analisado (SPINACE e DE PAOLI, 2005).

Um polímero termoplástico pode ter diferentes comportamentos mecânicos quando submetido a temperaturas variadas e, por este motivo, existem inúmeros trabalhos que abordam este efeito. No trabalho de Souza (2015) foi abordado a

influência da temperatura e da frequência de carregamento no comportamento da fadiga em flexão do polipropileno, onde foi encontrado que o aumento da temperatura ambiente provoca perda no módulo de elasticidade e na resistência à flexão. No trabalho de Karamanlioglu e Alkan (2019) foi estudado o efeito da temperatura e do tempo nas propriedades térmicas e na degradação do PLA, concluindo que o aumento da temperatura acelera o processo de degradação do PLA, além de provocar perda na resistência à tração. No trabalho de Freitas (2014) foi estudado como a temperatura de resfriamento após moldagem por compressão altera as propriedades mecânicas de alguns polímeros, descobrindo que quanto maior a temperatura de resfriamento, maior a cristalinidade dos polímeros e maiores propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e limite de escoamento). Dessa maneira, fica evidente a importância do entendimento sobre os efeitos da temperatura nos polímeros.

Devido a estas características, os polímeros termoplásticos são ideais para aplicação em impressão 3D utilizando a tecnologia de FFF. Os mais utilizados neste tipo de tecnologia são o PLA, o ABS, o PET-G.

3.3.1 Ácido polilático (PLA)

O PLA é um polímero termoplástico constituído por moléculas de ácido láctico, um ácido orgânico obtido a partir de fontes renováveis como o amido de milho, as raízes da mandioca e da cana-de-açúcar. Logo, ele é um polímero termoplástico biodegradável que não emite gases nocivos durante a sua impressão e, quando em condições adequadas, se degrada no meio ambiente em torno de 24 meses. Dentre os materiais utilizados atualmente na impressão 3D, o PLA é o que apresenta a maior facilidade para impressão e por essa razão é o mais popular no uso educacional e doméstico (3DHUBS, 2017; AFINKO, 2018; FERNANDES, 2016).

Esse polímero é indicado para objetos que não exijam temperaturas acima de 45 °C, uma vez que este valor está próximo a temperatura de transição vítrea, causando perdas significativas nas propriedades mecânicas do PLA. Ele também possui ductilidade inferior ao ABS e ao PETG, com baixa deformação antes ruptura; no entanto, dentre os três ele é o que apresenta a maior resistência mecânica, suportando cargas de até duas vezes maiores. Ele apresenta uma fluidez superior aos outros materiais para uma mesma faixa de temperatura, o que permite obter detalhes mais complexos durante seu processo de arrefecimento. Além disso, o ácido polilático

pode ser reabsorvido pelo corpo humano, sendo possível utilizá-lo em aplicações biomédicas como próteses, implantes e restauração de tecidos (MARTÍNEZ, 2011; FERNANDES, 2016).

3.3.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O ABS é um termoplástico sintético derivado do petróleo muito utilizado na indústria em geral devido às suas propriedades que oferecem uma boa resistência mecânica e resistência à temperatura, além de uma leve flexibilidade e um bom acabamento superficial. Em razão dessas características, ele é amplamente utilizado em teclados de computador, carcaças de celulares, brinquedos, painéis de automóveis e outros (3DHUBS, 2017; FERNANDES, 2016).

Logo, o ABS é indicado para peças que exijam maior resistência à temperatura e ao impacto, além de peças que necessitem uma pequena flexibilidade para encaixes. Quando coberto por acetona, ocorre uma diminuição nos erros de forma e melhora na rugosidade, oferecendo um bom acabamento estético. No entanto, o ABS pode sofrer empenamento não é feito um controle da temperatura durante a impressão, além de produzir gases, como o estireno, que são nocivos à saúde durante o seu aquecimento. (3DHUBS, 2017; AFINKO, 2018).

3.3.3 Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG)

O PETG é obtido através da copolimerização do PET comum com o Ciclohexano Dimetanol, em um processo onde a cristalização é freada fazendo com que o seu ponto de fusão seja reduzido. Ele apresenta boa resistência a temperatura, alta durabilidade e resistência, além de ser reciclável e poder entrar em contato com alimentos. Por essas razões, ele vem sendo apontado por pesquisadores como um dos futuros substitutos do ABS (3DHUBS, 2017; RIBEIRO, 2019).

Pelas características apresentadas, o PETG é ideal para peças utilizadas em ambientes com alta pressão e que servem de proteção mecânica, pois ele apresenta uma certa flexibilidade e uma boa resistência a golpes. No entanto, ele é um material que necessita de parâmetros de temperatura ideais, pois é extremamente pegajoso e escoar com muita facilidade, sendo mais difícil obter as configurações de impressão ideais (3DHUBS, 2017; RIBEIRO, 2019).

3.4 APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D

Para Anderson (2012), a impressão 3D é considerada a nova Revolução Industrial, uma vez que ela está gerando uma mudança drástica nos meios de produção. Com a sua popularização, a sociedade tem a opção de possuir impressoras 3D de baixo custo em casa para criar produtos personalizados tanto para venda quanto para uso pessoal.

Vários artistas, *designers* e escultores ganharam fama utilizando a impressão 3D, vendendo seus projetos para o público imprimir em casa ou vendendo as suas obras prontas. O artista Dizingof possui uma página eletrônica desde 2009 e vende suas obras para o público imprimir em casa. A *designer* Pia Hinze foi nomeada para uma famosa premiação de moda internacional após criar um vestido feito em uma impressora 3D (3DPI, 2016). Na Figura 3 são mostrados exemplos das obras destes dois artistas.

Figura 3 – Obras feitas em impressão 3D: à esquerda decoração feita por Dizingof, à direita vestido feito por Pia Hinze



Fonte: 3DPI, 2016

Na indústria automobilística, diversas empresas já utilizam a impressão 3D para substituir algumas partes da carroceria e do painel do carro, bem como para realizar a substituição de peças, fazendo com que essas empresas possam ter um estoque menor e fabricar as peças sob demanda, com isso é possível reduzir os custos e aumentar o lucro (3DPI, 2016).

A empresa canadense Kor Ecologic desenvolveu o Urbee (Figura 4), o primeiro carro do mundo que teve toda sua carroceria feita em impressão 3D. Por esse motivo, o Urbee chega a pesar 50 % menos do que os carros convencionais e, por contar com um sistema híbrido que funciona também com eletricidade, ele chegou a percorrer nos testes 100 quilômetros com 1 litro de gasolina (KOR ECOLOGIC, 2013).

Figura 4 – Urbee, desenvolvido pela Kor Ecologic



Fonte: Kor Ecologic, 2013

Na indústria aeroespacial a impressão 3D também é amplamente utilizada. A empresa norte americana Boeing possui mais de 20.000 peças feitas em impressão 3D nos aviões de sua frota. A empresa francesa Airbus desenvolveu o THOR (*Testing High-tech Objectives in Reality* – Testando Objetivos de Alta Tecnologia na Realidade), o primeiro avião não tripulado feito totalmente por impressão 3D, com exceção das partes elétricas, sendo composto por 50 peças e com uma massa total de 22 kg. O protótipo conseguiu levantar voo e, com isso, a empresa espera que em pouco tempo seja possível criar um avião que possa ser tripulado ou utilizar o THOR para missões militares (AIRBUS, 2016). Na Figura 5 a seguir é mostrado o avião THOR desmontado e parte da equipe de engenheiros responsável pelo projeto.

Figura 5 – THOR desmontado e equipe de engenheiros



Fonte: Airbus, 2016

Na construção civil a impressão 3D também vem sendo utilizada, com um potencial de revolucionar o setor como um todo. Diversas empresas e startups desenvolvem várias tecnologias para utilizar o concreto na impressão 3D, sendo possível imprimir uma casa em menos de 24 horas (ALTO QI, 2017).

Em seu trabalho, Porto (2016) aborda as diversas tecnologias existentes neste ramo, tais como a *Contour Crafting*, *Concrete Printing*, *D-Shape*, *TotalKuston*, entre outras. A empresa americana ICON criou em 2018 a *Chicon House*, a primeira casa habitável feita por impressora 3D nos Estados Unidos. A *Chicon House* (Figura 6) possui 60 metros quadrados e custou 10.000 dólares em material, porém, segundo a empresa, esse custo poderá chegar em apenas 4.000 dólares, se tornando uma casa acessível a todos e resolvendo problemas de sustentabilidade e moradia (ICON, 2018).

Figura 6 – *Chicon House*, feita pela empresa ICON

Fonte: ICON, 2018

A medicina é uma das áreas onde a impressão 3D causará mais impactos. Atualmente a impressão 3D já é utilizada para fabricação de próteses e de réplicas de órgãos para estudos e treinamento médico. Além disso, já estão sendo feitos testes e pesquisas para a criação de órgãos funcionais que possam ser transplantados. Por essa razão, muitos médicos e cientistas acreditam que no futuro a impressão 3D irá eliminar as filas de espera para transplantes de órgãos, já que eles acreditam que, com o desenvolvimento das pesquisas, será possível utilizar células vivas como matéria-prima nas impressoras 3D (IDE CURSOS, 2018).

Alguns testes pelo mundo já apresentaram bons resultados. Uma equipe médica holandesa da cidade de Utrecht realizou, com sucesso, o primeiro transplante de crânio feito por impressão 3D do mundo. Um dos médicos responsáveis pela cirurgia disse, em entrevista ao jornal britânico *The Register*, que a parte do crânio criada pela impressão 3D para esse transplante é superior aos métodos convencionais, uma vez que eles conseguiram fazer o crânio com as medidas exatas da paciente, gerando benefícios estéticos e funcionais (THOMSON, 2014).

Diante do exposto, fica evidente a importância da impressão 3D no mundo. O título utilizado por Anderson (2012) em seu livro faz todo o sentido, já que o futuro dessa tecnologia é extremamente promissor. Por essa razão, conhecer mais sobre essa tecnologia é essencial, pois, o mundo está passando por uma nova Revolução Industrial.

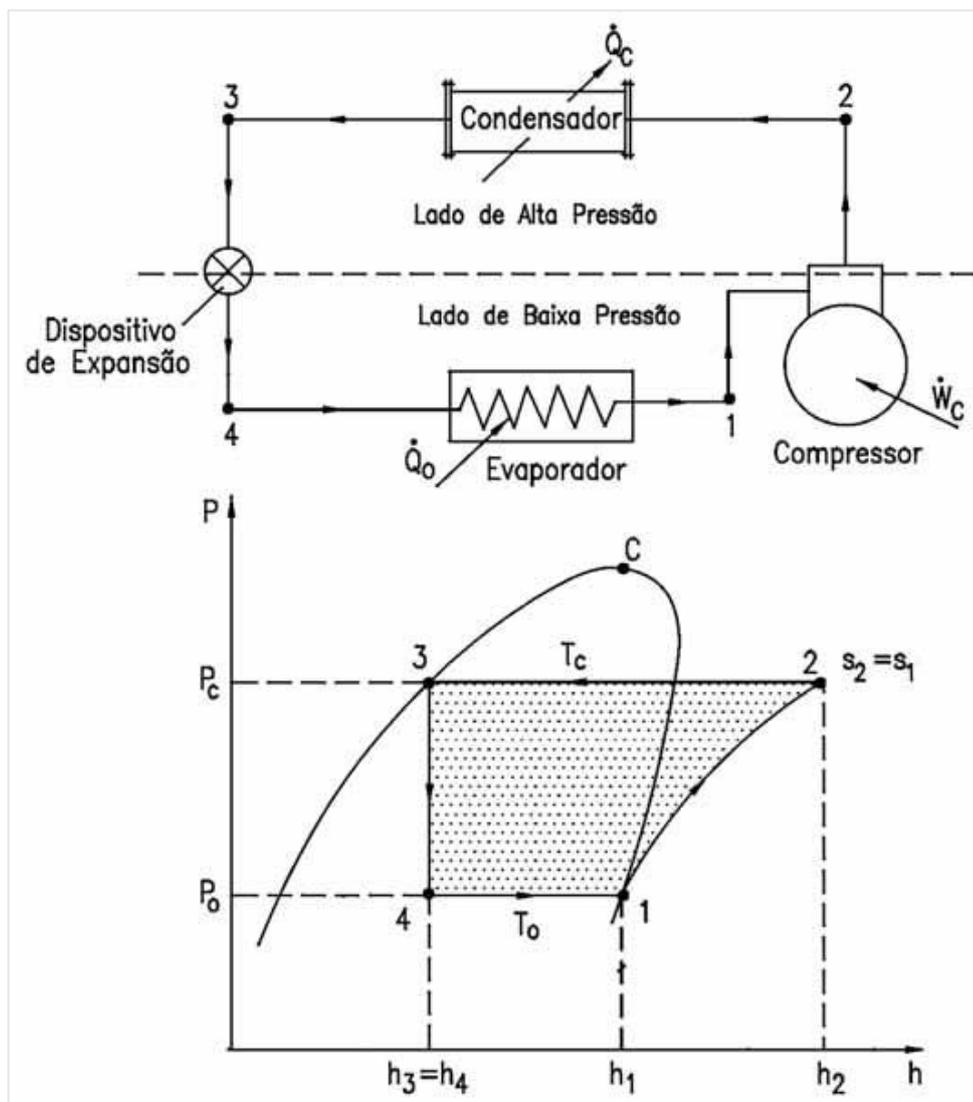
3.5 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

A refrigeração por compressão de vapor é uma das mais utilizadas para fins domésticos e industriais. Este ciclo consiste em um circuito fechado no qual o fluido refrigerante entra no compressor sob a forma de vapor e passa por quatro etapas, absorvendo e expelindo calor durante o percurso, até retornar ao estado inicial (MARTINELLI, 2008). A refrigeração por compressão a vapor é estudada a partir do ciclo ideal ou teórico e do ciclo real.

3.5.1 Ciclo ideal ou teórico

O ciclo ideal ou teórico consiste em quatro processos termodinâmicos. Na Figura 7 abaixo é ilustrado as etapas do ciclo ideal e um desenho esquemático básico de um sistema de refrigeração por compressão de vapor.

Figura 7 – Desenho esquemático básico e etapas do ciclo ideal de um sistema de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: Silva, 2005

Conforme abordado por Silva (2005), os processos e as variáveis ilustrados na Figura 7 são descritos abaixo.

O processo 1→2 ocorre no compressor, a uma entropia constante ($s_1 = s_2$). O fluido refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador (P_o), como observado, com título igual a 1, ou seja, vapor saturado seco. Então, o refrigerante é comprimido até atingir a sua pressão de condensação (P_c) e é liberado do compressor superaquecido à uma temperatura T_2 , maior do que a temperatura de condensação T_c . A eficiência deste processo varia de acordo com a potência do compressor e o trabalho realizado por ele (W_c).

O processo 2→3 ocorre no condensador a pressão constante, onde calor do refrigerante (Q_c) é rejeitado ao ambiente, resfriando da temperatura T_2 até a temperatura de condensação T_c . Assim, ele é condensado até se tornar líquido na temperatura T_3 , que é igual à temperatura T_c .

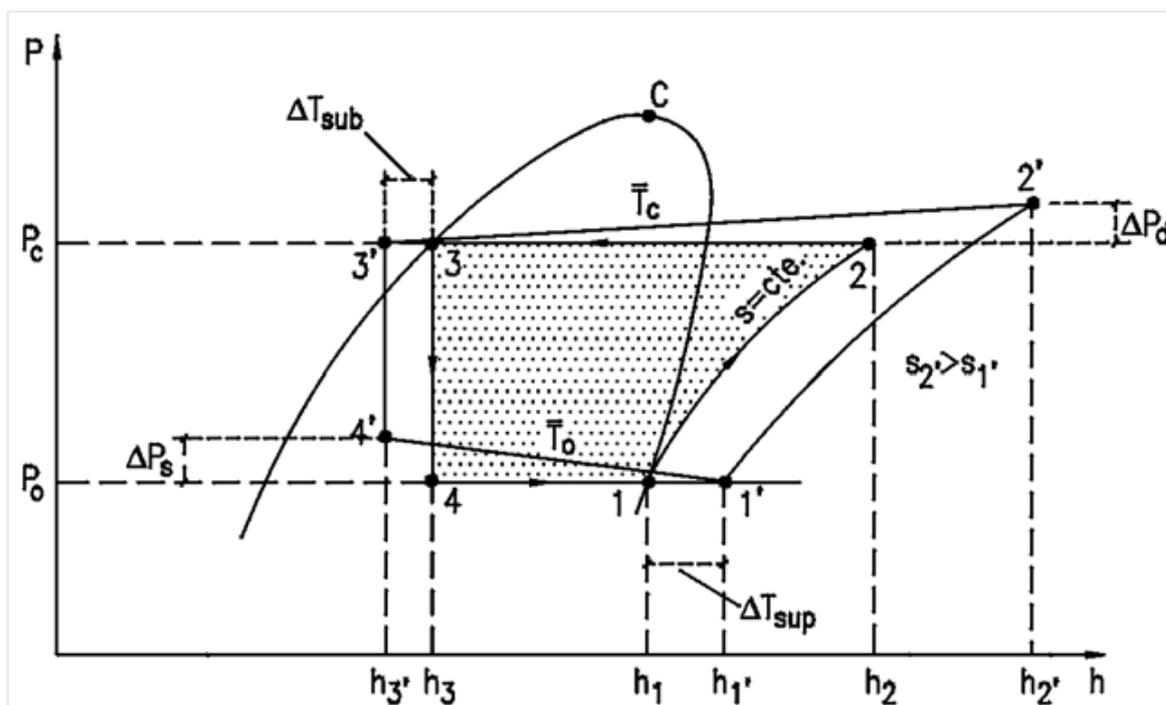
O processo 3→4 ocorre no dispositivo de expansão, consistindo em uma expansão à entalpia constante ($h_3 = h_4$) desde a pressão de condensação P_c até a pressão de vaporização P_0 .

Por fim, o processo 4→1 ocorre no evaporador, onde acontece a absorção de calor (Q_0) do ambiente, à pressão e temperatura constantes, para que o fluido, no estado vapor úmido atinja, novamente, o estado de vapor saturado seco, retornando ao compressor e repetindo o ciclo.

3.5.2 Ciclo real

O ciclo real se difere do ciclo ideal, pois nele são consideradas as perdas e algumas ineficiências durante o circuito. Na Figura 8 é mostrado, no mesmo diagrama, o ciclo teórico e o ciclo real, ilustrando as diferenças.

Figura 8 – Diagrama mostrando as diferenças entre o ciclo teórico e o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor



Primeiramente, no ciclo teórico, o fluido refrigerante sai do evaporador para o compressor em forma de vapor saturado, mas na prática não há como controlar o estado do refrigerante com precisão. Portanto, é aconselhado criar um sistema para que o refrigerante esteja ligeiramente superaquecido (ΔT_{sup}) na entrada do compressor, garantindo que ele esteja totalmente gasoso. Na saída do condensador também é necessário adaptar o sistema; no ciclo teórico o líquido sai do condensador saturado, porém na prática há uma queda de pressão no condensador que prejudica a transformação de vapor para líquido; por esta razão, é necessário sub-resfriar (ΔT_{sub}) o fluido na saída do condensador a fim de garantir que não haja formação de vapor na linha do líquido. Além disso, o ciclo teórico também não considera a queda de pressão nas linhas de descarga de líquido (ΔP_d) e de sucção (ΔP_s), as quedas de pressão no evaporador e no condensador, a queda de pressão devido ao atrito do fluido durante o percurso e da transferência de calor entre o fluido e o ambiente. Por fim, vale a pena ressaltar que o processo de compressão no ciclo real não ocorre a entropia constante ($s_1 \neq s_2$), diferente do ciclo teórico (ÇENGEL e BOLES, 2006; SILVA, 2005).

3.6 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Um sistema real de refrigeração e aplicado na prática é composto por vários componentes para que possa ser utilizado de forma segura e que consiga operar nas temperaturas desejadas, conforme descritos a seguir.

a) Compressor

O compressor é o “coração” de um sistema de refrigeração, sendo responsável por recuperar o refrigerante expandido, realizando uma compressão e devolvendo suas propriedades iniciais para que o fluido possa percorrer o ciclo novamente. Porém, um ciclo de refrigeração pode funcionar sem o compressor, no entanto o fluido seria descartado após sair do evaporador, sendo descarregado diretamente na atmosfera após cada ciclo. Fica claro que, dessa maneira, o sistema se torna inviável, tanto pelo custo de reposição do fluido refrigerante, quanto pelo impacto ambiental causado, evidenciado a importância do compressor (MARTINELLI, 2008).

b) Condensador

O condensador é um trocador de calor que tem a função de resfriar e condensar o fluido refrigerante. Este processo é separado em três etapas: o dessuperaquecimento, a condensação e o sub-resfriamento. Primeiramente, o condensador recebe o fluido da mesma maneira que este sai do compressor, ou seja, gás quente a alta pressão. Assim, o dessuperaquecimento consiste em retirar calor sensível do gás até ele atingir a temperatura de condensação. Ao atingir esta temperatura, o gás inicia o processo de mudança de fase, condensando e se tornando líquido. Vale a pena ressaltar que durante este processo, a temperatura se mantém constante, já que na mudança de fase é retirado apenas calor latente do fluido. Por fim, na etapa de sub-resfriamento, o fluido, agora no estado líquido e saturado, é resfriado mais alguns graus, para reduzir a possibilidade da formação de vapor no líquido, uma vez que há queda de pressão após a saída do fluido do condensador (MARTINELLI, 2008; SILVA, 2005).

c) Dispositivos de expansão

Os tipos mais comuns de dispositivos de expansão em um sistema de refrigeração por compressão de vapor são o tubo capilar e a válvula de expansão. O tubo capilar é um dispositivo de expansão que diminui a pressão do fluido refrigerante e regula sua vazão na entrada do evaporador. Já a válvula de expansão é um dispositivo que expande o fluido refrigerante e regula sua vazão, podendo ser manuais ou automáticas. Para sistemas de refrigeração de pequeno porte, o mais indicado é o tubo capilar (MARTINELLI, 2008).

d) Evaporador

O evaporador é um trocador de calor que tem a função de trocar o calor para o meio a ser refrigerado. O refrigerante entra no evaporador na forma líquida e se evapora com uma baixa temperatura, uma vez que a pressão no evaporador é baixa. Do lado externo, há um fluxo do fluido que será refrigerado (no caso deste trabalho, o ar) e, como a temperatura deste fluido é maior que a do refrigerante, este se evapora. Em sistemas de pequeno porte, é possível utilizar um mesmo aparelho como

condensador e evaporador, já que o funcionamento destes é semelhante (MARTINELLI, 2008).

e) Fluido refrigerante

O fluido refrigerante é responsável por absorver calor de uma substância. Segundo Martinelli (2008), não existe um fluido refrigerante capaz de atender todos os requisitos de uma instalação, portanto um refrigerante ideal para uma instalação pode não ser adequado para outra; por esta razão, o refrigerante deve ser escolhido de acordo com a finalidade desejada.

Além dos componentes mencionados, existem outros acessórios como mangueiras, tubulações, válvulas de serviço Schrader, filtros secadores, ventiladores e outros que também constituem um sistema simples de refrigeração.

Na seção seguinte, são apresentados os materiais e a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

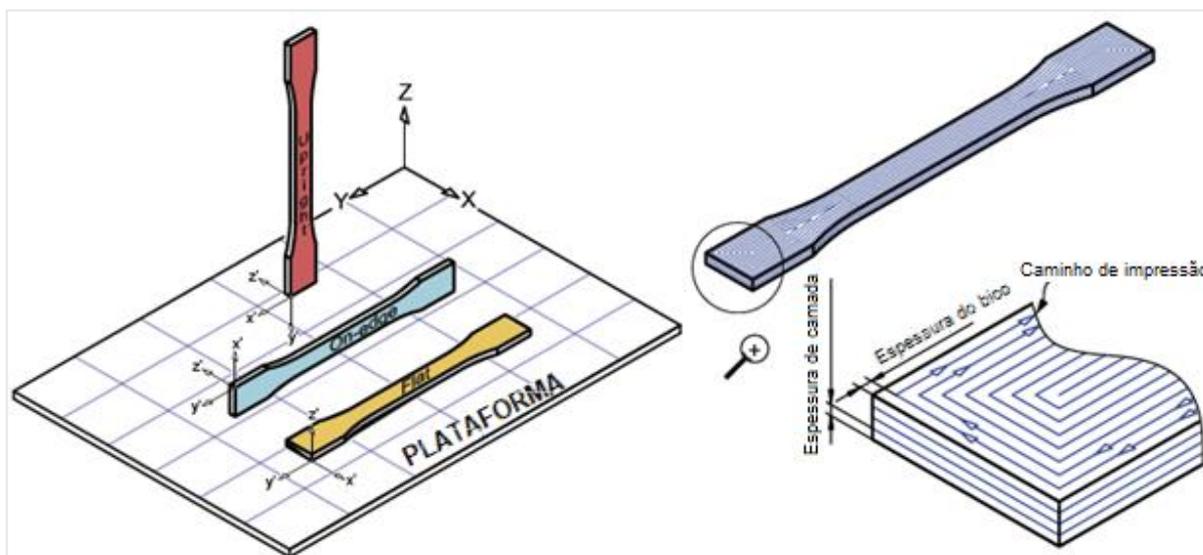
Todos os procedimentos e ensaios descritos foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica e no Laboratório de Fenômenos de Transportes 2 da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM).

4.1 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a impressão dos corpos de prova, foi utilizada uma impressora 3D da marca GTMax[®] 3D, modelo core A1 e filamentos de PLA Natural Basic sem pigmento da marca 3DFila[®].

Durante uma impressão 3D, vários parâmetros podem ser alterados e, como consequência, resultados diferentes podem ser obtidos. Neste trabalho, o único parâmetro alterado foi a orientação da deposição do material, onde foram impressos corpos de provas em três orientações diferentes: *upright*, *flat* e *on-edge*. Na Figura 9 é mostrado um desenho esquemático com três corpos de prova representando as orientações de impressão e um detalhe da deposição das camadas durante a impressão. Dessa maneira, tem-se que as camadas das orientações *flat* e *on-edge* são depositadas paralelamente ao comprimento, enquanto as camadas da orientação *upright* são depositadas perpendicularmente ao comprimento (CHACÓN et al., 2017).

Figura 9 – Desenho esquemático mostrando as orientações de construção *upright*, *on-edge* e *flat* e o detalhe da deposição de camadas



Fonte: Adaptado de Chacón et. al (2017)

Os corpos de prova foram desenhados utilizando o software AutoCad® e exportados na extensão “.stl”, compatível com os programas livres Repetier-Host® e Slic3r®, que foram utilizados para gerar o arquivo código no padrão ISO GCODE. Os parâmetros de impressão utilizados para geração do código foram definidos com os seguintes valores:

- Diâmetro do bocal = 0,4 mm
- *Layer height* (espessura de camada) = 0,30 mm
- *First layer height* (espessura da primeira camada) = 0,35 mm
- *Vertical shells* (camadas laterais) = 20
- *Fill density* (densidade de preenchimento) = 100%
- *Speed perimeters* (velocidade do perímetro) = 45 mm/s
- *Speed infill* (velocidade de preenchimento) = 45 mm/s
- Temperatura de impressão da extrusora – PLA = 210 °C
- Temperatura de impressão da mesa – PLA = 60 °C

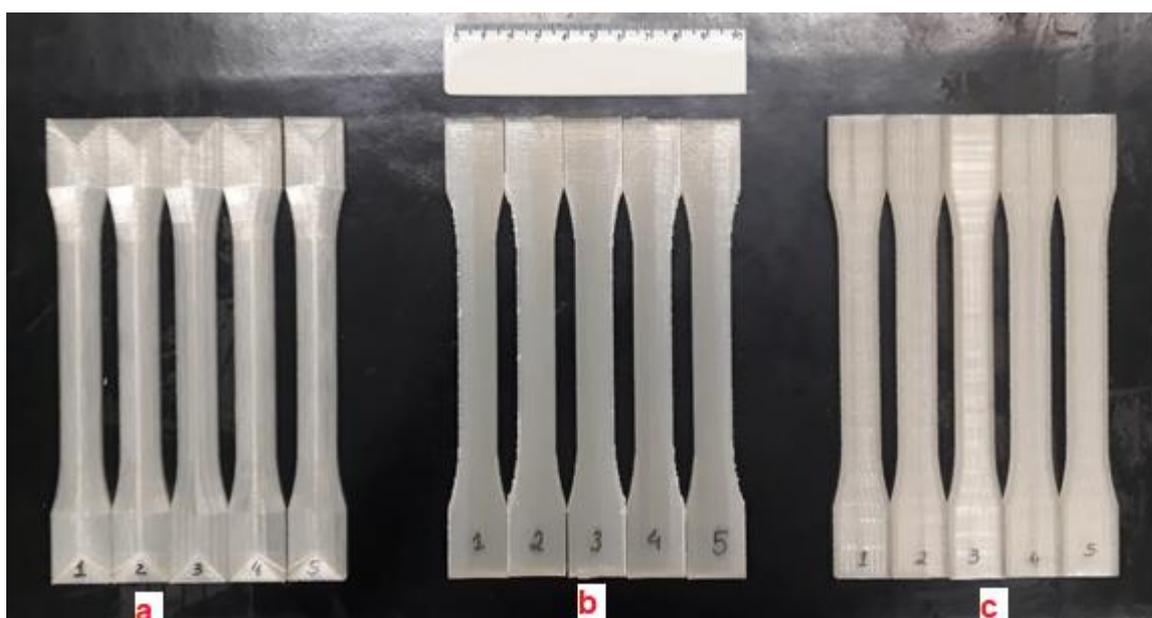
Foram utilizados os mesmos parâmetros para impressão de todos os corpos de prova. Como não há normas para definição destes valores, estes foram ajustados experimentalmente para alcançar uma melhor qualidade de impressão.

Após impressos, todos os corpos de prova foram separados e identificados numericamente, medidos com um micrômetro da marca Starret® com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 50 mm. Foram feitas 5 medições na seção útil dos corpos de prova, obtendo os valores de largura e de espessura. Então, para os cálculos, foi utilizado a média dos valores obtidos nestas medições em cada corpo de prova.

Também foi obtida a massa individual com o auxílio de uma balança de precisão da marca MARTE®, modelo AC-2000 com resolução de 0,001 g e faixa nominal de 2 kg.

Na Figura 10 é mostrado os corpos de prova de PLA impressos para execução dos ensaios de tração e suas respectivas orientações de construção.

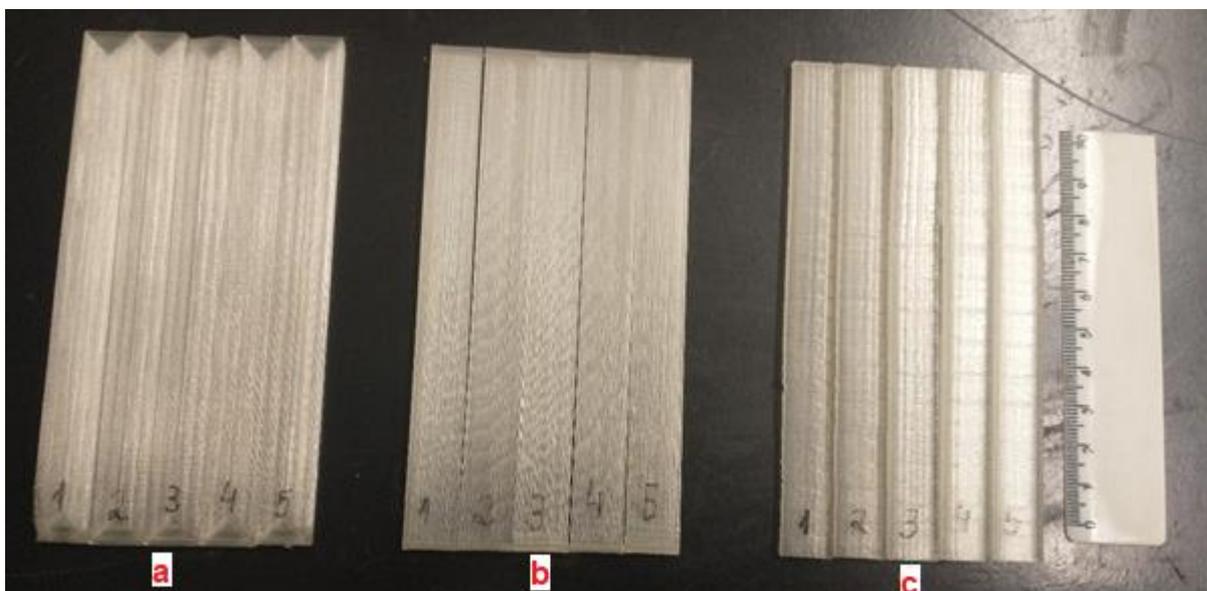
Figura 10 – Corpos de prova impressos para ensaio de tração nas orientações (a) *Flat*, (b) *On-edge*, (c) *Upright*



Fonte: Do autor, 2021

Na Figura 11 são mostrados os corpos de prova para execução dos ensaios de flexão em três pontos e suas respectivas orientações de construção.

Figura 11 – Corpos de prova impressos para ensaio de flexão em três pontos nas orientações (a) *Flat*, (b) *On-edge*, (c) *Upright*



Fonte: Do autor, 2021

4.2 GRUPOS EXPERIMENTAIS

Para analisar a influência da temperatura no PLA, foram escolhidas três temperaturas: 5 °C, 25 °C e 45 °C.

O valor de 5 °C foi escolhido pois, além de ter sido notada uma escassez de pesquisas que abordassem a influência de temperaturas abaixo de 20 °C no comportamento mecânico do PLA, essa foi a temperatura mínima que o equipamento construído conseguiu resfriar o ambiente. O valor de 25 °C foi escolhido como uma temperatura média comum, utilizada em ensaios frequentemente por diversos autores. O valor de 45 °C foi escolhido pois está próximo a temperatura de transição vítrea do PLA, ou seja, acima dessa temperatura o PLA perde resistência, o que torna sua aplicação inviável (GRASSO et al., 2018).

Foram fabricados 45 corpos de prova para ensaios de flexão em três pontos e 45 corpos de prova para ensaios de tração. Para cada ensaio, 15 corpos de prova foram impressos para cada uma das três orientações de construção. Sendo assim, cada grupo experimental consistiu de 5 corpos de prova, número mínimo recomendado pelas normas ASTM D790-17 e ASTM D638-14. Na Tabela 1 é mostrada a distribuição dos grupos experimentais.

Tabela 1 – Distribuição dos grupos experimentais

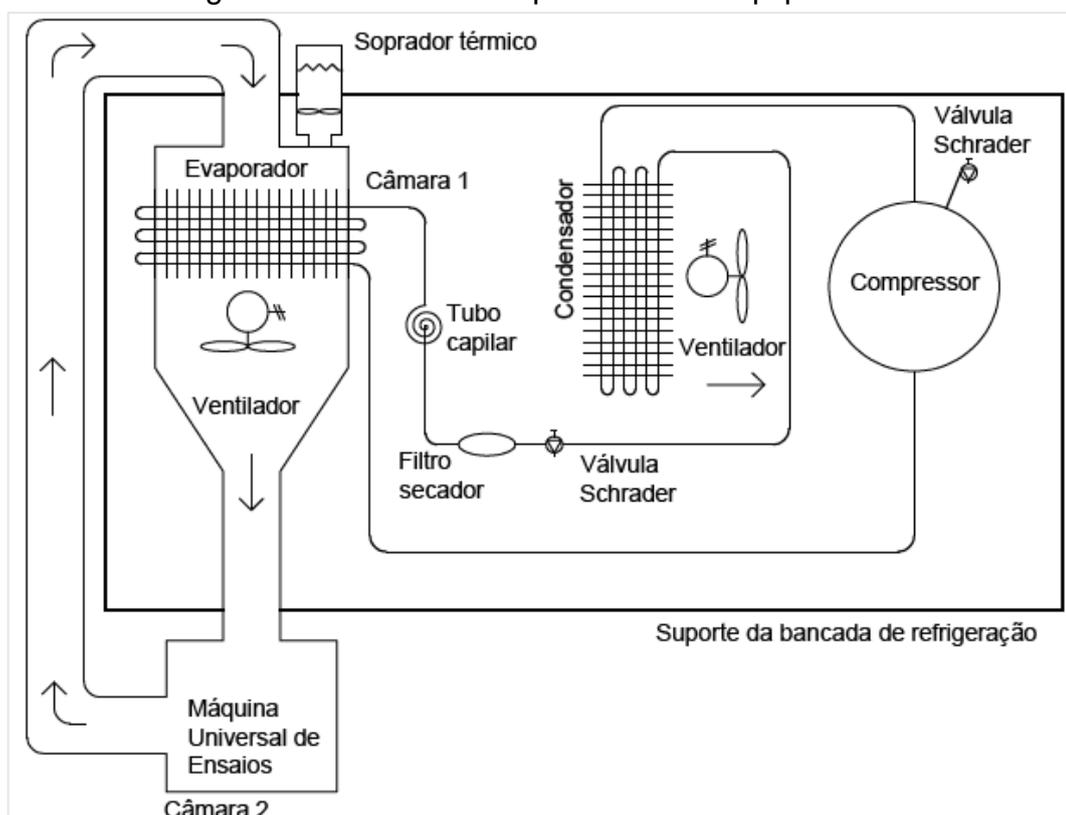
Material	Temperatura do ensaio (°C)	Número de corpos de prova					
		Ensaio de flexão			Ensaio de tração		
		<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>
PLA	5	5	5	5	5	5	5
	25	5	5	5	5	5	5
	45	5	5	5	5	5	5

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2020

4.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO

Um dos objetivos deste trabalho foi construir um equipamento para gerar um ambiente com temperatura controlada, e que possibilitasse a realização de ensaios mecânicos sob diferentes temperaturas utilizando uma máquina universal de ensaios. Este equipamento foi constituído por uma bancada de refrigeração, duas câmaras térmicas e um soprador térmico (Figura 12).

Figura 12 – Desenho esquemático do equipamento



Fonte: Do autor, 2020

4.3.1 Câmaras térmicas

As câmaras térmicas têm como objetivo isolar o ar para manter a temperatura do ambiente controlada. Elas foram construídas com PVC expandido, pois é um material de fácil trabalhabilidade, com um preço acessível, bom acabamento estético e não é afetado pelas temperaturas escolhidas para realização dos ensaios.

A câmara 1 envolve o evaporador e um ventilador, que é responsável pela circulação do ar dentro das câmaras e da tubulação. O ar é impulsionado pelo ventilador e direcionado para uma tubulação de PVC DN100 da marca Krona®, até chegar na segunda câmara que foi encaixada na máquina universal de ensaios, conforme ilustrado na Figura 12.

A primeira câmara foi construída com uma camada de PVC expandido de 5 mm de espessura e foi dimensionada e adaptada para envolver o evaporador e o ventilador. Ela foi totalmente vedada e possui conexões para as tubulações na sua entrada e saída. Além disso, ela foi revestida externamente com uma manta térmica para aumentar o isolamento térmico do sistema, conforme Figura 13.

Figura 13 – Registro fotográfico da Câmara 1 e alguns componentes, com setas indicando o fluxo do ar



Fonte: Do autor, 2021

A segunda câmara foi construída com duas camadas de PVC expandido e reforçada com cantoneiras de alumínio para fornecer maior resistência, uma vez que esta câmara seria movimentada com frequência. Além disso, esta câmara deve isolar termicamente o ambiente onde são realizados os ensaios. Na parte traseira da câmara foi feita uma saída com conexão para a tubulação, de maneira que o ar retorne para a primeira câmara. Dessa maneira, o sistema se torna fechado.

Nesta câmara foi feita uma porta de acrílico transparente para possibilitar a observação, preparação e posicionamento dos corpos de prova. Além disso, na parte interna da câmara foi utilizado espuma acrílica para reduzir o volume da câmara e aumentar o isolamento térmico. Toda tubulação também foi revestida com manta de espuma acrílica a fim de melhorar o isolamento térmico do sistema. Suas dimensões são adequadas para realização de vários tipos de ensaios mecânicos na máquina universal de ensaios, conforme Figura 14.

Figura 14 – Registro fotográfico da Câmara 2 e alguns componentes



Fonte: Do autor, 2021

4.3.2 Bancada de refrigeração

Para montagem da bancada de refrigeração foram utilizados os materiais e equipamentos descritos a seguir.

a) Compressor

Foi utilizado um compressor modelo FFI 8,5 HAK da marca Embraco® (Figura 15).

Figura 15 – Compressor Embraco FFI 8,5 HAK.



Fonte: Do autor, 2020

Este compressor é um modelo de 2ª geração de eficiência, com baixos níveis de ruído e vibrações, baixo torque de partida (ideal para sistemas com tubo capilar), baixa pressão de retorno e faixa de temperatura trabalhável de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este compressor é indicado para sistemas de pequeno porte, sendo comumente encontrado em geladeiras, *freezers*, *dispensers* e máquinas de gelo (EMBRACO, 2009).

b) Condensador e evaporador

Em sistemas de grande porte, o condensador necessita ser maior que o evaporador, pois ele precisa dissipar o calor absorvido no evaporador mais o calor

fornecido pelo compressor na compressão do gás. Como o sistema de refrigeração deste trabalho é de pequeno porte, ambos trocadores de calor podem ser do mesmo tamanho, já que a quantidade de calor fornecida pelo compressor é pequena, não influenciando significativamente na quantidade de calor final que precisa ser dissipada pelo condensador. Portanto, neste trabalho foram utilizados dois trocadores de calor idênticos, do modelo CDE 2775 da marca Elgin® (Figura 16).

Figura 16 – Trocador de calor CDE 2775



Fonte: Elgin, 2020

Este trocador de calor funciona por resfriamento de ar forçado, sendo montado com tubos de cobre e alumínio e aletas de alumínio, garantindo uma ótima eficiência na troca de calor, podendo ser encontrado em diversos equipamentos frigoríficos e unidades de refrigeração (ELGIN, 2020).

c) Fluido refrigerante

O fluido refrigerante utilizado foi o R-134a (1,1,1,2-Tetrafluoretano). Este fluido não é inflamável, não apresenta toxicidade, possui alta estabilidade química e térmica, além de ter compatibilidade com os outros materiais utilizados neste trabalho (MARTINELLI, 2008).

d) Tubos capilares

Neste trabalho foram utilizados tubos capilares de 0,42 mm de diâmetro feitos de cobre. O comprimento foi calculado de acordo com o fluido refrigerante escolhido, conforme explicado por Martinelli (2008). Estes tubos capilares são indicados para sistemas de pequeno porte e para compressores com baixo torque de partida.

e) Outros componentes

Além dos componentes descritos acima, também foram utilizados na bancada diversos acessórios como válvulas de serviço Schrader, ventiladores, filtro secador, disjuntores, termômetros e outros.

Na Figura 17 a seguir é mostrado a vista superior da bancada de refrigeração completa com letras indicando cada componente.

Figura 17 – Registro fotográfico da bancada de refrigeração (vista superior)



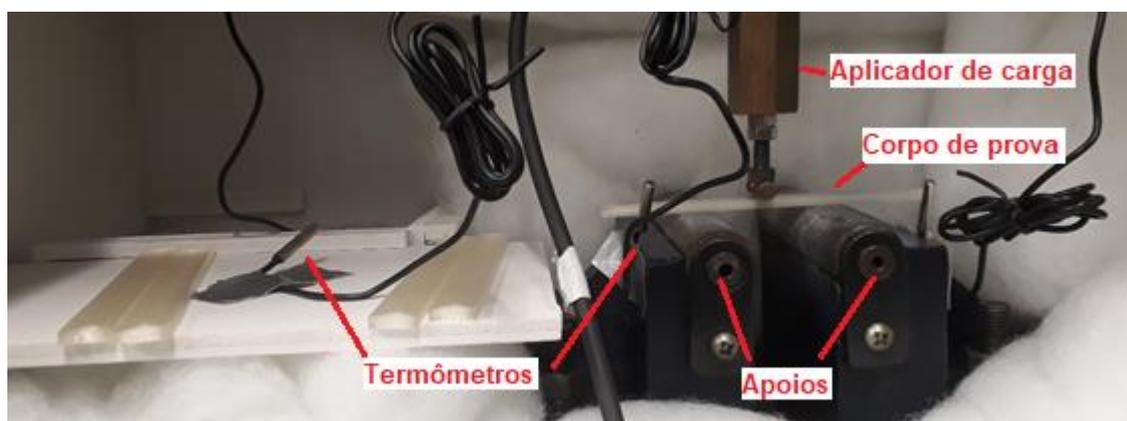
Fonte: Do autor, 2021

Na Figura 17, as letras identificam alguns componentes da bancada de refrigeração. A letra “A” é o disjuntor cuja função é ligar ou desligar os ventiladores e/ou o compressor. A letra “B” é o condensador, “C” é o ventilador, “D” é o compressor, “E” é o filtro secador, “F” é uma das válvulas Schrader do sistema, “G” é o conjunto de tubos capilares, “H” é o evaporador, “G” é a câmara 1 e a letra “I” é o soprador térmico.

4.3.3 Controle de temperatura

Para validar a funcionalidade do equipamento, foram distribuídos 5 termômetros com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de – 50 °C a 110 °C dentro da segunda câmara para acompanhar as temperaturas e suas variações ao longo do tempo. Eles foram posicionados da seguinte maneira: um termômetro na entrada de ar na câmara 2, um termômetro na saída de ar da câmara 2, um termômetro nos corpos de prova a serem ensaiados e dois termômetros posicionados nos acessórios dos ensaios mecânicos (Figura 18).

Figura 18 – Posicionamento dos termômetros dentro da Câmara 2 durante o ensaio de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Para analisar a variação de temperatura dentro da câmara, foi realizado um teste de validação com base no tempo necessário para execução dos ensaios e no tempo necessário para que os corpos de prova alcançassem o equilíbrio térmico. Estes tempos foram estimados em 2 horas para o equilíbrio térmico e 4 horas para execução dos ensaios. As temperaturas foram registradas a cada 30 minutos durante

este período de 6 horas. Este teste foi repetido três vezes para analisar a reprodutibilidade dos resultados.

4.3.4 Sistema de aquecimento

Para os ensaios realizados a temperatura de 45 °C, foi utilizado um soprador térmico da marca Vonder®, modelo STV 2000N. Nestes ensaios, apenas o ventilador da câmara 1 foi ligado para manter a circulação do ar dentro das tubulações. O soprador térmico foi posicionado para direcionar o ar para a câmara 1.

Para garantir que a temperatura não se elevasse além do necessário, os termômetros foram monitorados simultaneamente e o soprador era desligado manualmente para assegurar que a temperatura durante o ensaio se mantivesse próximo de 45 °C.

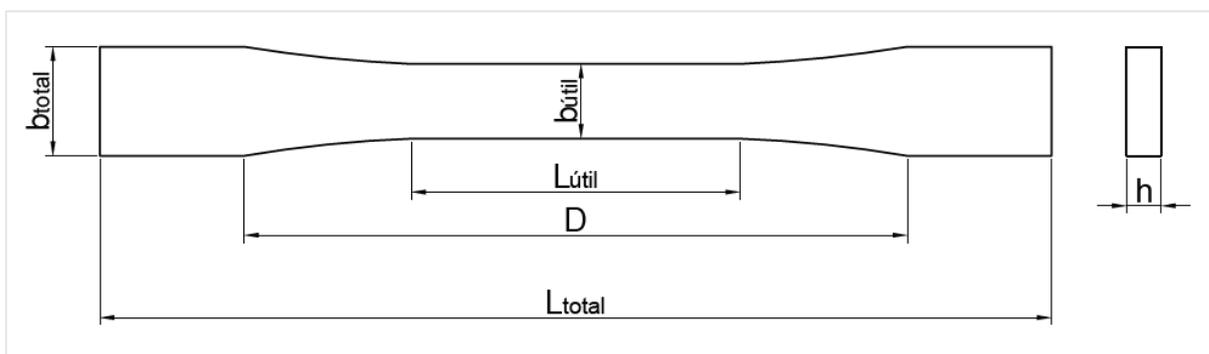
4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Todos os ensaios mecânicos foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios da marca Time Group Inc®, modelo WDW – 1000E equipada com a câmara térmica 2 para controle da temperatura ambiente durante os ensaios.

4.4.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638-14, que aborda ensaios de tração em materiais plásticos. Foi utilizada uma célula de carga de 100 kN e a velocidade de aplicação da carga foi 2 mm/min. De acordo com a norma, os corpos de prova de materiais termoplásticos devem possuir o formato conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Desenho esquemático do corpo de prova para ensaios de tração



Fonte: Do autor, 2021

Na norma são descritos cinco tipos de corpos de prova que, apesar de apresentarem formatos iguais, possuem diferentes tamanhos. Cada tipo é indicado para um material plástico diferente.

Todos os corpos de prova foram do tipo I, o mais indicado para os materiais utilizados neste trabalho. Na Tabela 2 estão apresentados os valores padrão das dimensões mostradas na Figura 19.

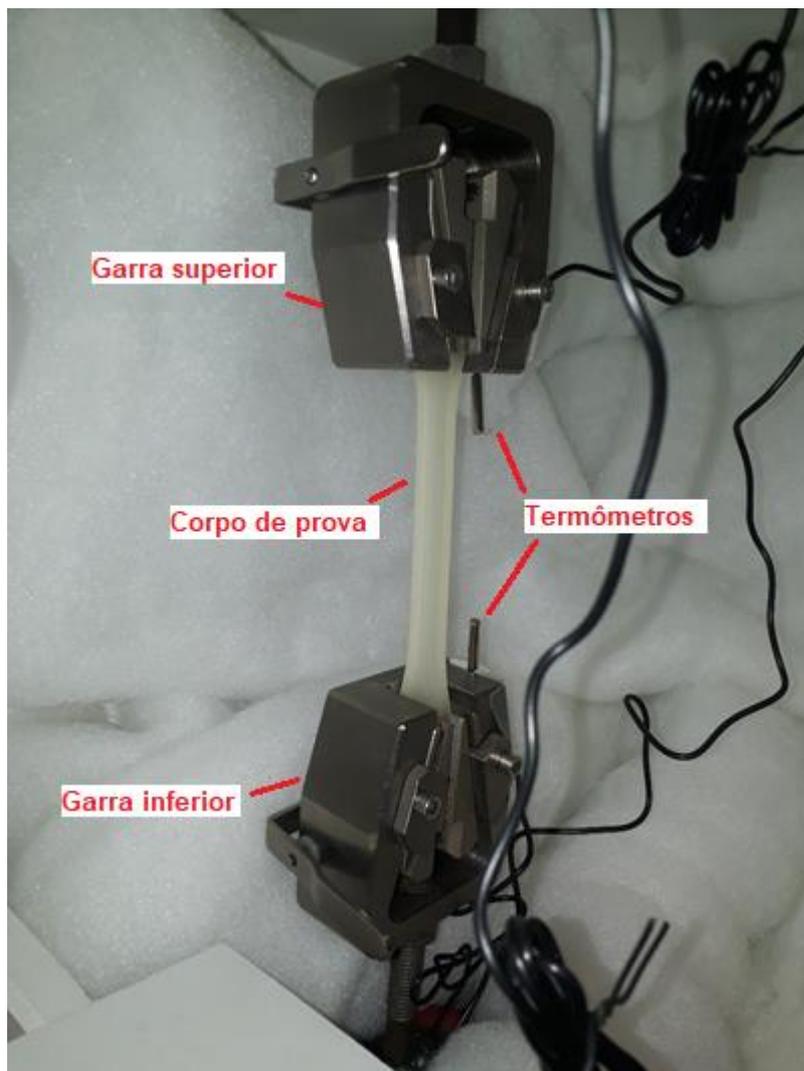
Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova tipo I

Dimensões (conforme Figura 19)	Valores para o tipo I (mm)
b_{total} – Largura total	19,00
b_{util} – Largura útil	13,00
L_{total} – Comprimento total	165,00
L_{util} – Comprimento útil	50,00
D – Distância entre as garras	115,00
h – Espessura	4,00

Fonte: Adaptada de ASTM D638-14, 2014

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova, fixo em ambas extremidades, até a sua ruptura (Figura 20).

Figura 20 – Ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2021

Os ensaios foram realizados até a ruptura ou até a ocorrência de estricção do corpo de prova. Com os dados de força e deslocamento obtidos, foi possível encontrar a tensão de tração (σ_t), dada por:

$$\sigma_t = \frac{F}{hb_{\text{útil}}} \quad (1)$$

onde:

F é a carga aplicada [N];

h é a espessura da seção transversal [mm];

$b_{\text{útil}}$ é largura útil da seção transversal [mm], conforme Figura 19.

A deformação de tração é dada por:

$$\varepsilon_t = \frac{d}{L_{\text{útil}}} \quad (2)$$

onde:

d é o deslocamento obtido no ensaio de tração [mm];

$L_{\text{útil}}$ é o comprimento útil do corpo de prova [mm], conforme Figura 19.

Assim, utilizando as equações (1) e (2), foi possível elaborar gráficos “Tensão x Deformação” para analisar as seguintes propriedades do material:

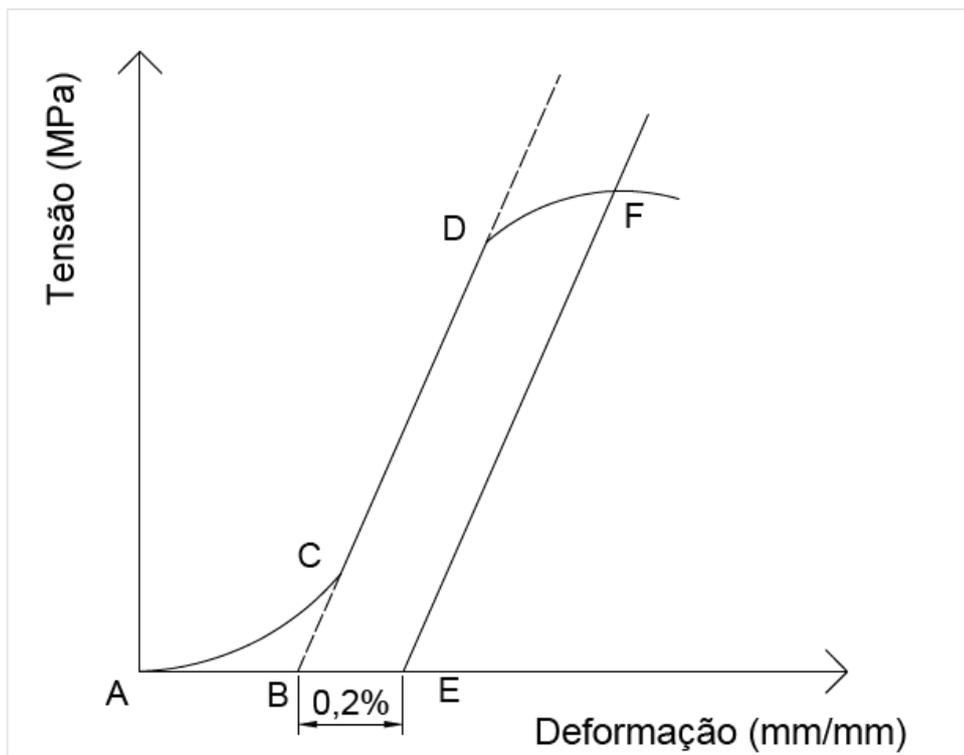
a) Limite de escoamento

O limite de escoamento é o ponto que divide a região elástica da região plástica, ou seja, é a maior tensão que o material pode suportar sem que haja deformação permanente após o descarregamento.

Quando o material não apresenta plasticidade, esse limite é facilmente identificado no gráfico. No entanto, quando essa observação não é nítida, pode ser determinado o limite n , que é um valor convencionalmente internacionalmente para substituir o limite de escoamento (SOUZA, 1982). Ele é calculado por meio de um aumento de n % na deformação após a fase elástica, sendo que o valor adotado geralmente é 0,2 %.

Para obter o limite de escoamento, foi feito o procedimento ilustrado na Figura 21. Primeiramente é obtida a equação da reta referente ao trecho linear da fase elástica da curva. Então, a partir da reta (BD), é feito um deslocamento de 0,2 % para obtenção da reta deslocada (EF). O ponto F onde a reta deslocada cruza a curva é o limite n que poderá ser considerado como o limite de escoamento do material.

Figura 21 – Determinação do limite n no gráfico “Tensão x Deformação”



Fonte: Do autor, 2021

b) Módulo de elasticidade ou módulo de Young

O módulo de elasticidade foi obtido através da inclinação da reta obtida no trecho linear da fase elástica da curva “Tensão x Deformação” (SOUZA, 1982).

c) Tensão máxima de tração

A tensão máxima de tração foi obtida substituindo o valor máximo de força aplicada na equação (1) ou observando diretamente no gráfico o ponto mais alto.

d) Deformação até a tensão máxima

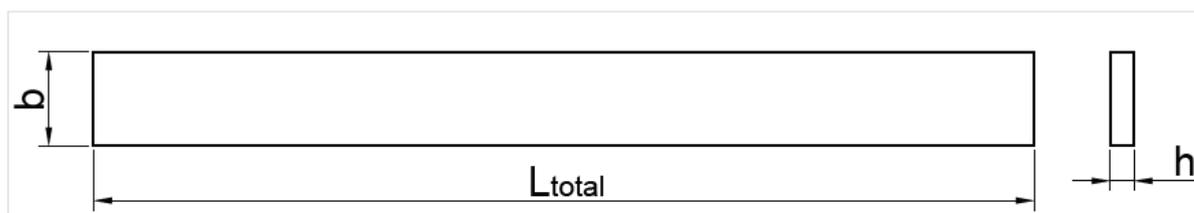
A deformação até a tensão máxima foi obtida pela equação (2), utilizando o maior valor de deslocamento obtido no ensaio.

4.4.2 Ensaio de flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado de acordo com a norma ASTM D790-17, que aborda ensaios de flexão em materiais plásticos e elétricos. Foi utilizado uma célula de carga de 500 N e a velocidade de aplicação da carga foi 2 mm/min. De

acordo com a seção 7 desta norma, as dimensões dos corpos de prova para ensaios com materiais termoplásticos são: 127 mm de comprimento (L_{total}), 12,7 mm de largura (b) e 3,2 mm de espessura (h), conforme Figura 22.

Figura 22 – Desenho esquemático do corpo de prova para ensaio de flexão em três pontos

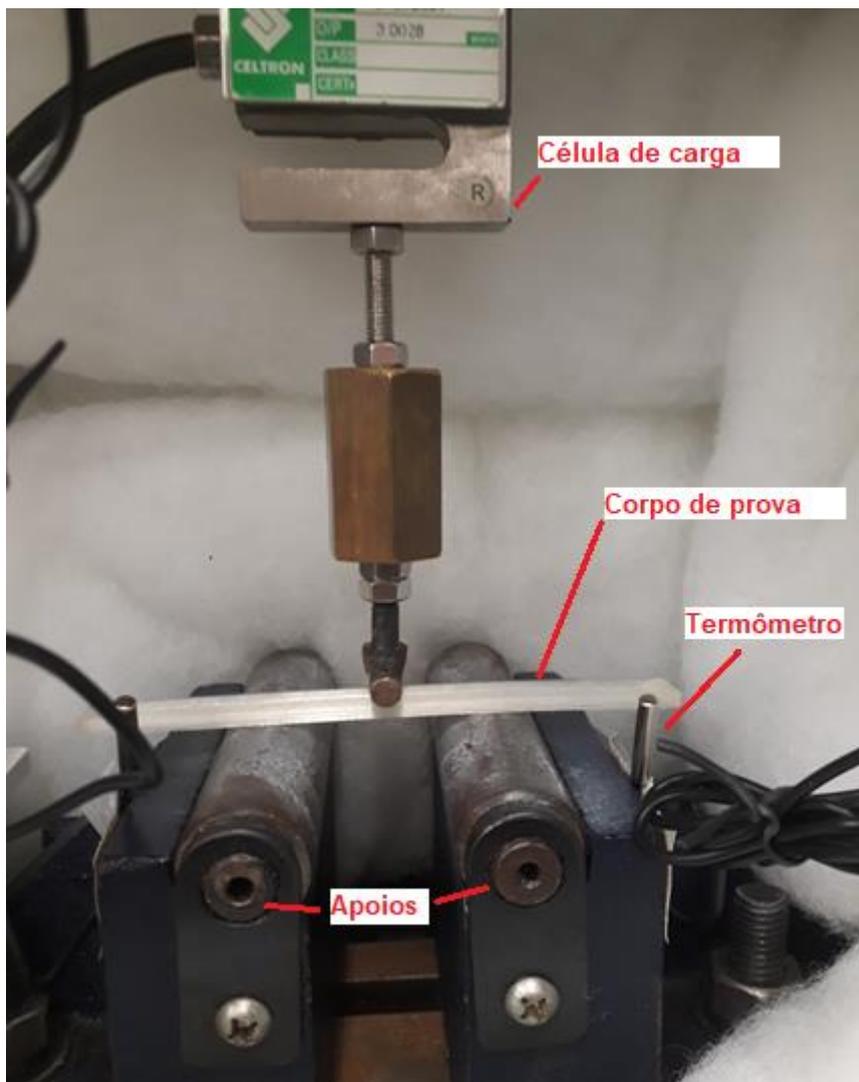


Fonte: Do autor, 2021

Ainda, na mesma seção, é especificado que a distância entre os apoios (L) para realização do ensaio deve ser 16 vezes o valor da espessura do corpo de prova, ou seja, para este trabalho a distância entre os apoios foi de 51,2 mm.

O ensaio consistiu na aplicação de uma carga crescente na metade do comprimento de um corpo de prova apoiado em ambas as extremidades (Figura 23).

Figura 23 – Ensaio de flexão em três pontos



Fonte: Do autor, 2021

No ensaio de flexão, a tensão de flexão (σ_f) do corpo de prova foi calculada de acordo com a equação (3),

$$\sigma_f = \frac{My}{I} \quad (3)$$

onde:

M é o momento fletor na seção onde se quer determinar a tensão [N.mm];

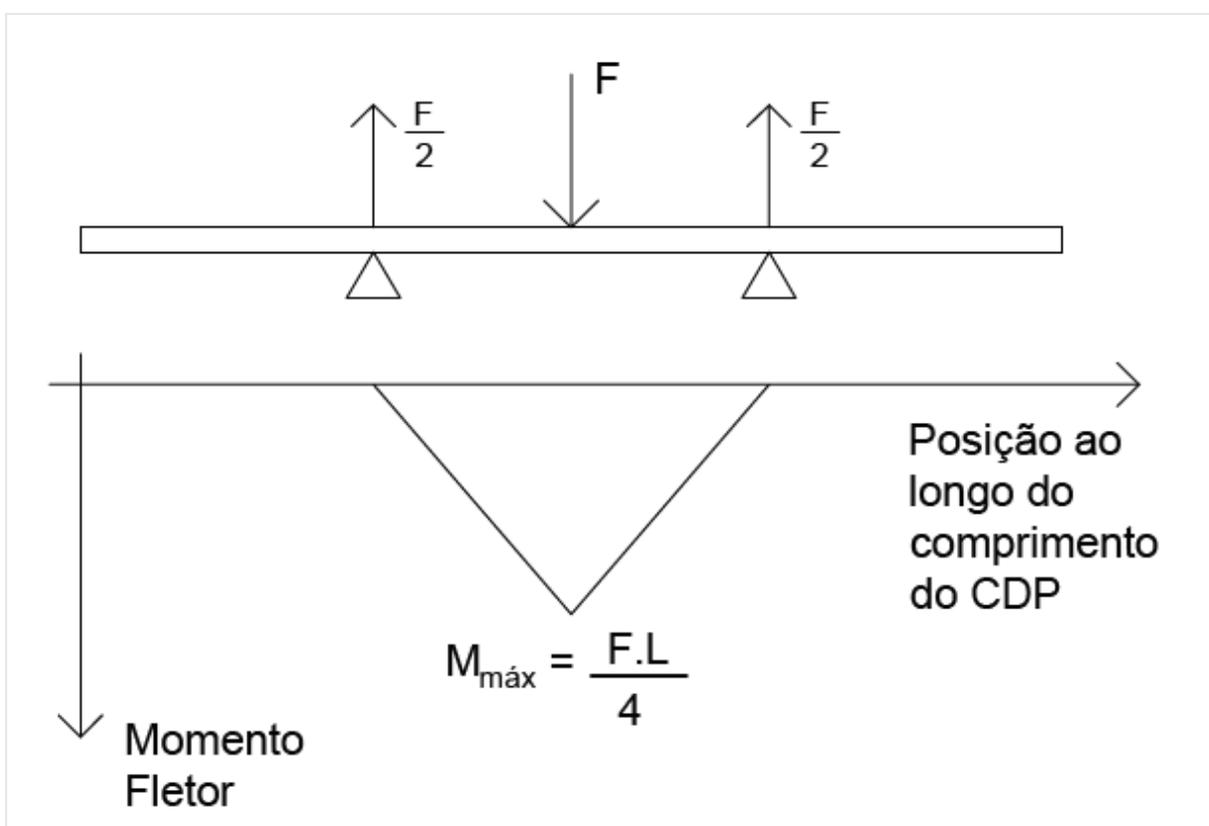
y é a distância perpendicular da linha neutra até o ponto da seção analisado [mm];

I é o momento de inércia de área da seção transversal [mm³].

Considerando as condições de apoio do ensaio, o momento fletor máximo estará no ponto de aplicação da força e será a força de reação (gerada pelo apoio) multiplicada pela distância do ponto de apoio até o ponto de aplicação da força. Consequentemente, o ponto de maior tensão também será esse.

O diagrama mostrado na Figura 24 representa a variação do momento fletor M ao longo de um corpo de prova submetido a uma força F no ponto médio entre dois apoios situados a uma distância L entre si.

Figura 24 – Desenho esquemático das forças envolvidas durante o ensaio de flexão e diagrama de momento fletor



Fonte: Do autor, 2020

De acordo com a Figura 24, o valor momento fletor máximo é dado por $M_{\text{máx}} = \frac{F.L}{4}$ e, como os corpos de prova possuem seção retangular uniforme com espessura h e largura b , temos que o momento de inércia da seção transversal é dado por $I = \frac{b.h^3}{12}$.

O valor máximo da tensão de flexão é atingido na fibra mais distante da linha neutra. Para uma seção transversal retangular, a fibra mais distante da linha neutra

está na posição $y = \frac{h}{2}$. Substituindo na equação (3) encontramos que a tensão máxima de flexão é dada pela equação (4):

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4)$$

onde:

F é a carga aplicada [N];

L é a distância entre os apoios [mm];

b é largura da seção transversal [mm];

h é a espessura da seção transversal [mm].

A deformação de flexão foi obtida utilizando a equação (5):

$$\varepsilon_f = \frac{6dh}{L^2} \quad (5)$$

onde:

d é o deslocamento obtido no ensaio de flexão;

Assim, utilizando as equações (4) e (5) foi possível elaborar gráficos “Tensão x Deformação” para obter as seguintes propriedades mecânicas do material quando submetido a ensaio de flexão em três pontos:

a) Limite de escoamento

O limite de escoamento foi calculado conforme abordado para os ensaios de tração.

b) Módulo de elasticidade ou módulo de Young

O módulo de elasticidade ou módulo de Young (E_f) se refere à rigidez do material. Quanto maior o valor deste módulo, maior será a sua rigidez, ou seja, menor será deformação elástica resultante de um carregamento (SOUZA, 1982).

De acordo com Souza (1982), o módulo de elasticidade de flexão (E_f) do material, considerando seção transversal retangular, é dado por:

$$E_f = \frac{FL^3}{4dbh^3} \quad (6)$$

c) Tensão de flexão máxima

É a maior tensão que o corpo de prova suporta durante o ensaio de flexão, podendo ser calculada utilizando a força máxima atingida no ensaio na equação (4) ou diretamente pelo gráfico (ponto mais alto do gráfico).

d) Deformação até a tensão máxima

A deformação até a tensão máxima foi obtida pela equação (5), utilizando o maior valor de deslocamento obtido no ensaio.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística dos ensaios realizados, foram utilizados os softwares *Microsoft Excel*[®] e *ActionStat*[®].

O tamanho de cada amostra foi definido de acordo com as normas, consistindo em 9 grupos de 5 corpos de prova para cada ensaio. Para cada grupo foi determinado a média, o desvio padrão e os intervalos de confiança. Foi adotado um nível de confiança de 95 % para todas as análises realizadas.

As variáveis respostas estudadas foram: limite de escoamento, tensão máxima, deformação até a tensão máxima e módulo de elasticidade.

Primeiramente, foram realizados testes estatísticos para analisar a normalidade dos dados (teste Kolmogorov-Smirnov) e a homogeneidade das variâncias (teste Bartlett), onde:

- $p_{\text{valor}} \geq 0,05$, as variâncias são iguais e/ou os dados são normalmente distribuídos;
- $p_{\text{valor}} < 0,05$, as variâncias não são iguais e/ou os dados não estão normalmente distribuídos.

Após verificar a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias, foram feitos os testes de hipóteses para analisar a influência de cada nível de temperatura na variável resposta analisada. Dessa maneira, para cada variável

resposta foram feitos 3 testes estatísticos, sendo um teste para cada orientação sob efeito de três temperaturas diferentes.

Então, foram feitos testes de análise de variância ANOVA de um fator (*One Way Analysis of Variance*), considerando as seguintes hipóteses:

- H_0 (hipótese nula): Todas as médias são iguais, $p_{\text{valor}} \geq 0,05$;
- H_1 (hipótese alternativa): No mínimo uma média é diferente das outras, $p_{\text{valor}} < 0,05$.

Quando a hipótese nula é aceita, significa que os níveis do fator analisado não geraram nenhum efeito no valor final da variável resposta observada e, com isso, temos a conclusão da análise.

Quando a hipótese nula é rejeitada, sabemos que um dos níveis do fator influenciou mais que o outro, porém apenas com o teste ANOVA não é possível saber quais foram os níveis que influenciaram mais que os outros. Assim, quando a hipótese nula é rejeitada, é necessário fazer um teste *post hoc*.

Os testes *post hoc* consistem em comparações pareadas para descobrir quais são os grupos que diferem entre si. O teste de comparação múltiplas de médias escolhido foi o teste de Tukey, pois ele se torna um teste exato quando o número de amostras dos grupos é igual.

5 RESULTADOS

5.1 CONTROLE DE TEMPERATURA

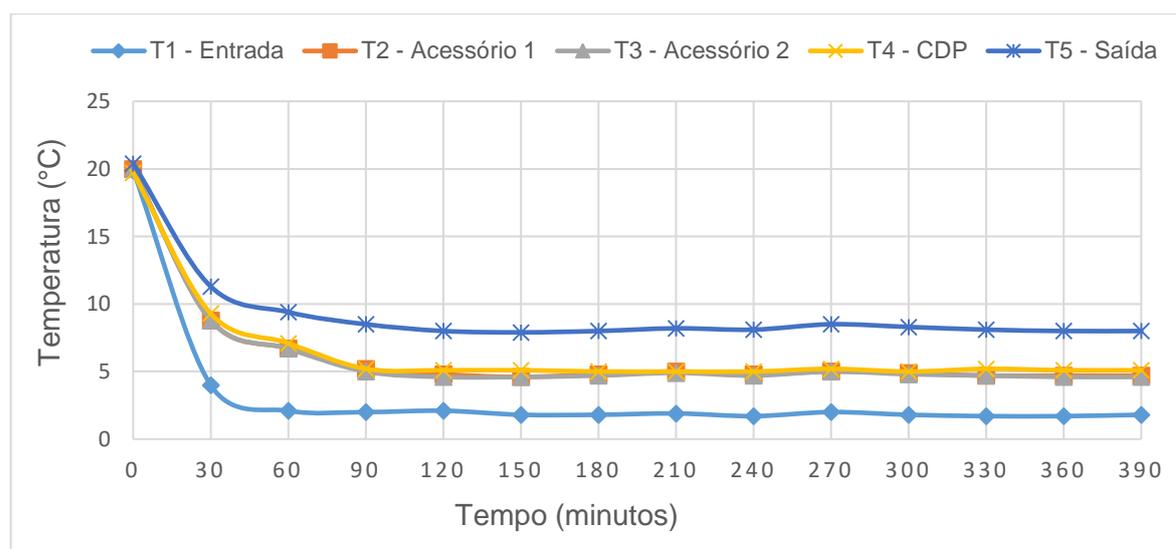
O equilíbrio térmico dos corpos de prova foi considerado alcançado após 20 minutos dentro da câmara que já estava na temperatura desejada (CASTANHEIRA, 2016).

O equipamento manteve a temperatura interna da câmara 2 estável, com uma variação de ± 1 °C, que está de acordo com o trabalho de Grasso et al. (2018), sendo que as temperaturas nos corpos de prova e nos acessórios ficaram próximas de 5 °C.

Para os ensaios a 45 °C, a variação de temperatura dentro da câmara foi de ± 3 °C. Não foi possível alcançar a mesma precisão do ensaio a 5 °C, pois o controle da temperatura da resistência interna do soprador térmico foi feito manualmente, ligando e desligando o soprador quando a temperatura chegava próxima à desejada.

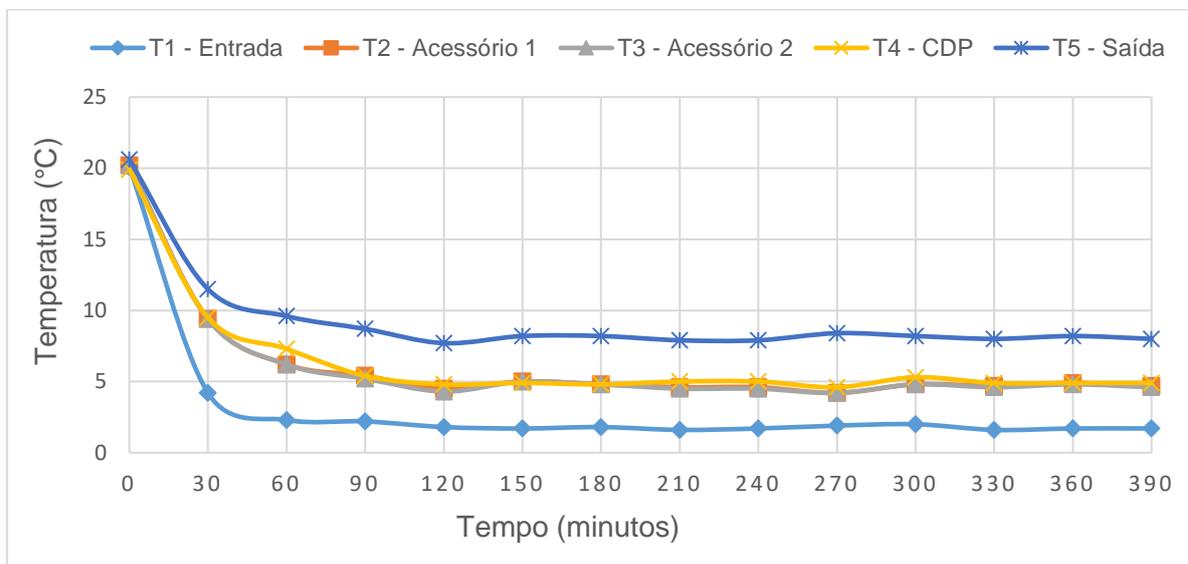
Os registros das temperaturas de cada termômetro foram feitos para as duas montagens de acessórios (tração e flexão) e dispostos em formato de gráfico conforme Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

Figura 25 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de tração à 5 °C



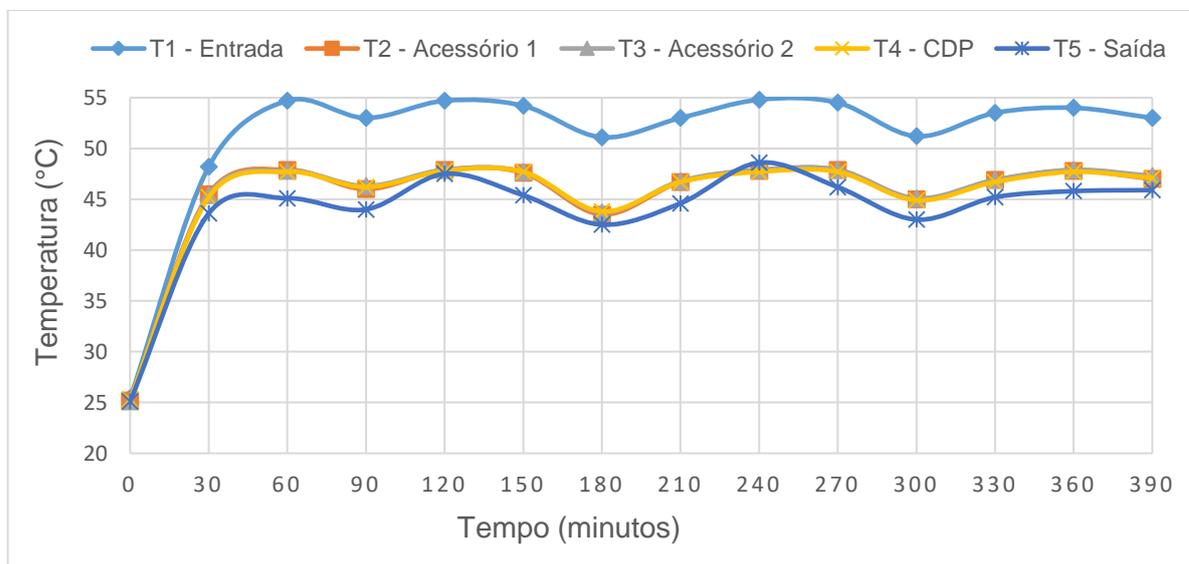
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

Figura 26 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de flexão à 5 °C



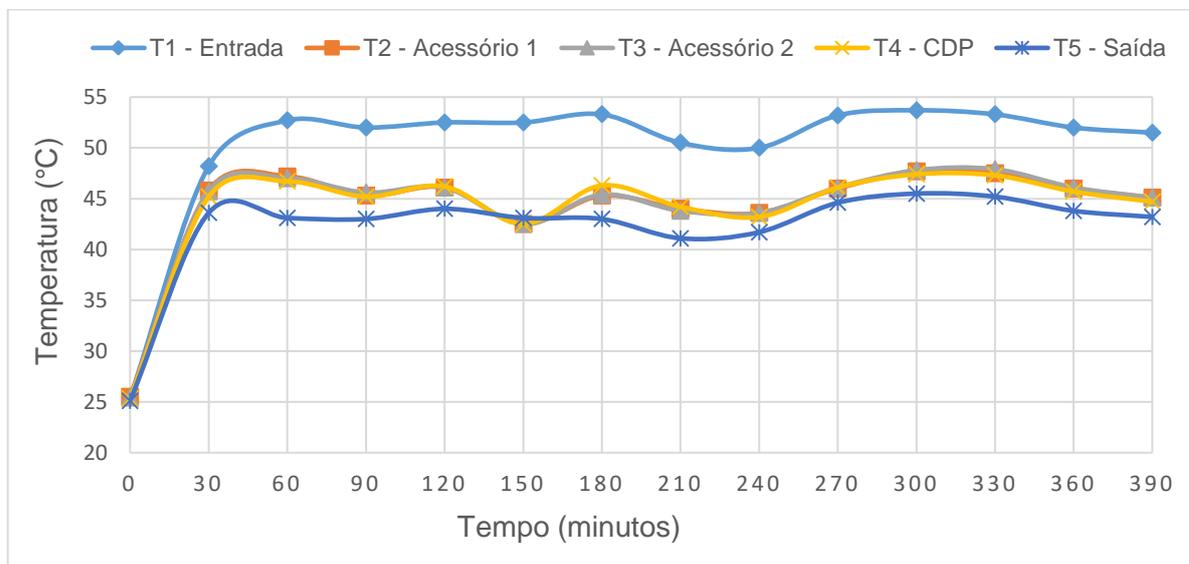
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

Figura 27 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de tração à 45 °C



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

Figura 28 – Registro das temperaturas de cada termômetro dentro da câmara para os ensaios de flexão à 45 °C



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

5.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Os valores de massa e os valores médios de largura e espessura de cada corpo de prova estão nos Apêndices A, B, C, D, E e F. Nas Tabelas 3 e 4 foram dispostos os dados de média e desvio padrão de cada grupo dos ensaios de tração e flexão, respectivamente.

Tabela 3 – Valores da média \pm desvio padrão das medidas dos corpos de prova de cada grupo para os ensaios de tração

Orientação	Medidas	Temperatura		
		5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Largura (mm)	13,07 \pm 0,02	13,19 \pm 0,05	13,08 \pm 0,06
	Espessura (mm)	4,49 \pm 0,03	4,38 \pm 0,05	4,54 \pm 0,06
	Massa (g)	12,776 \pm 0,015	12,806 \pm 0,010	12,827 \pm 0,026
<i>On-edge</i>	Largura (mm)	13,64 \pm 0,04	13,53 \pm 0,01	13,56 \pm 0,01
	Espessura (mm)	4,16 \pm 0,02	4,08 \pm 0,01	3,97 \pm 0,02
	Massa (g)	12,785 \pm 0,019	12,445 \pm 0,026	12,616 \pm 0,020
<i>Upright</i>	Largura (mm)	13,06 \pm 0,01	13,21 \pm 0,03	13,12 \pm 0,04
	Espessura (mm)	4,16 \pm 0,04	4,26 \pm 0,04	4,05 \pm 0,08
	Massa (g)	12,832 \pm 0,021	12,862 \pm 0,026	12,891 \pm 0,018

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Tabela 4 – Valores da média \pm desvio padrão das medidas dos corpos de prova de cada grupo para os ensaios de flexão

Orientação	Medidas	Temperatura		
		5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Largura (mm)	12,79 \pm 0,07	12,82 \pm 0,04	12,65 \pm 0,02
	Espessura (mm)	3,00 \pm 0,14	2,94 \pm 0,09	3,05 \pm 0,01
	Massa (g)	5,512 \pm 0,061	5,495 \pm 0,049	5,195 \pm 0,039
<i>On-edge</i>	Largura (mm)	12,96 \pm 0,15	12,89 \pm 0,16	12,97 \pm 0,17
	Espessura (mm)	3,02 \pm 0,01	3,03 \pm 0,01	3,02 \pm 0,00
	Massa (g)	5,482 \pm 0,010	5,480 \pm 0,009	5,478 \pm 0,027
<i>Upright</i>	Largura (mm)	12,81 \pm 0,07	12,79 \pm 0,04	12,77 \pm 0,06
	Espessura (mm)	3,07 \pm 0,02	3,07 \pm 0,01	3,06 \pm 0,02
	Massa (g)	5,519 \pm 0,032	5,501 \pm 0,047	5,500 \pm 0,043

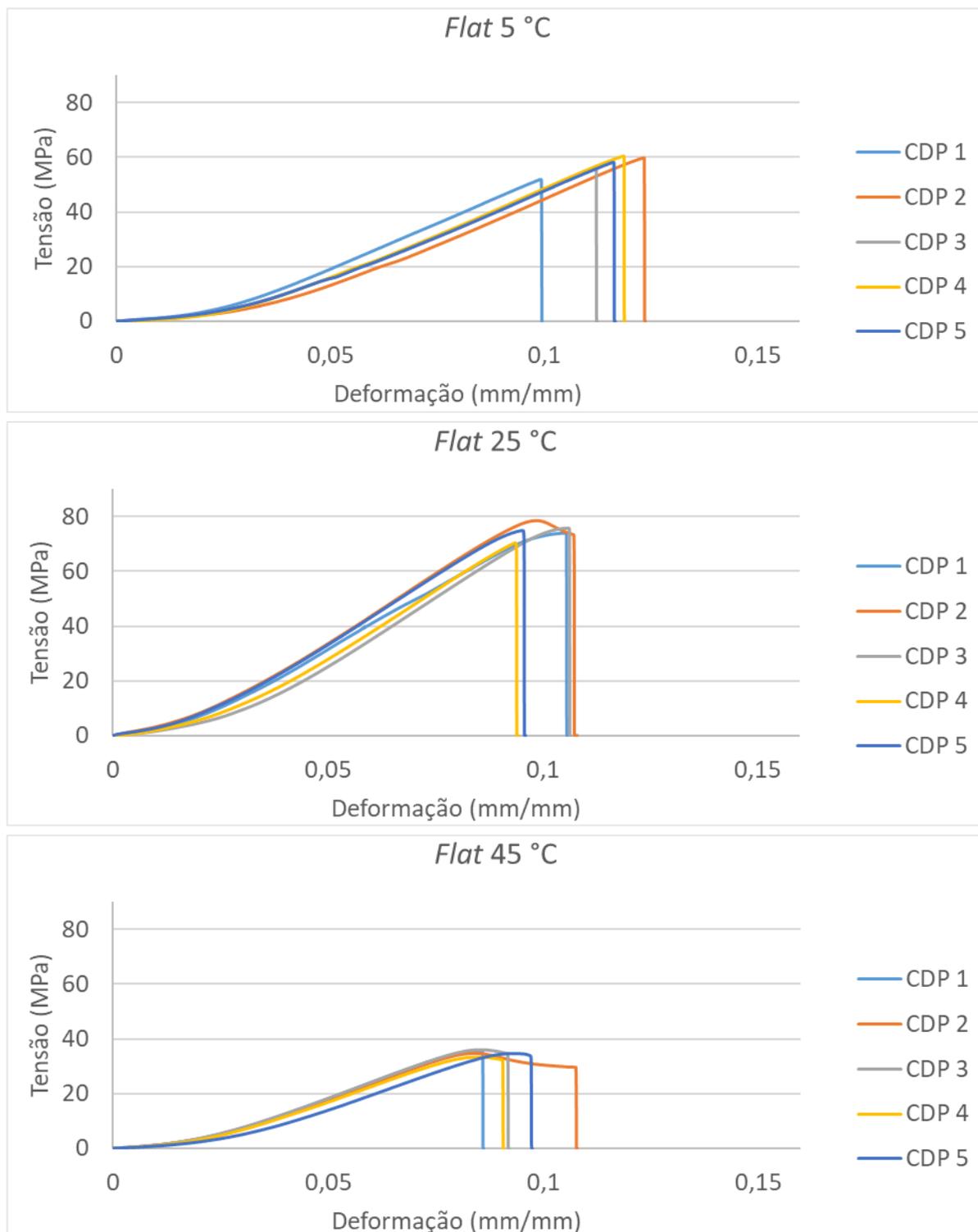
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados obtidos foram dispostos em formato de gráficos “Tensão x Deformação” para orientação e temperatura. Para melhor visualização e comparação, os gráficos foram agrupados de acordo com a orientação de construção e são mostrados nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31.

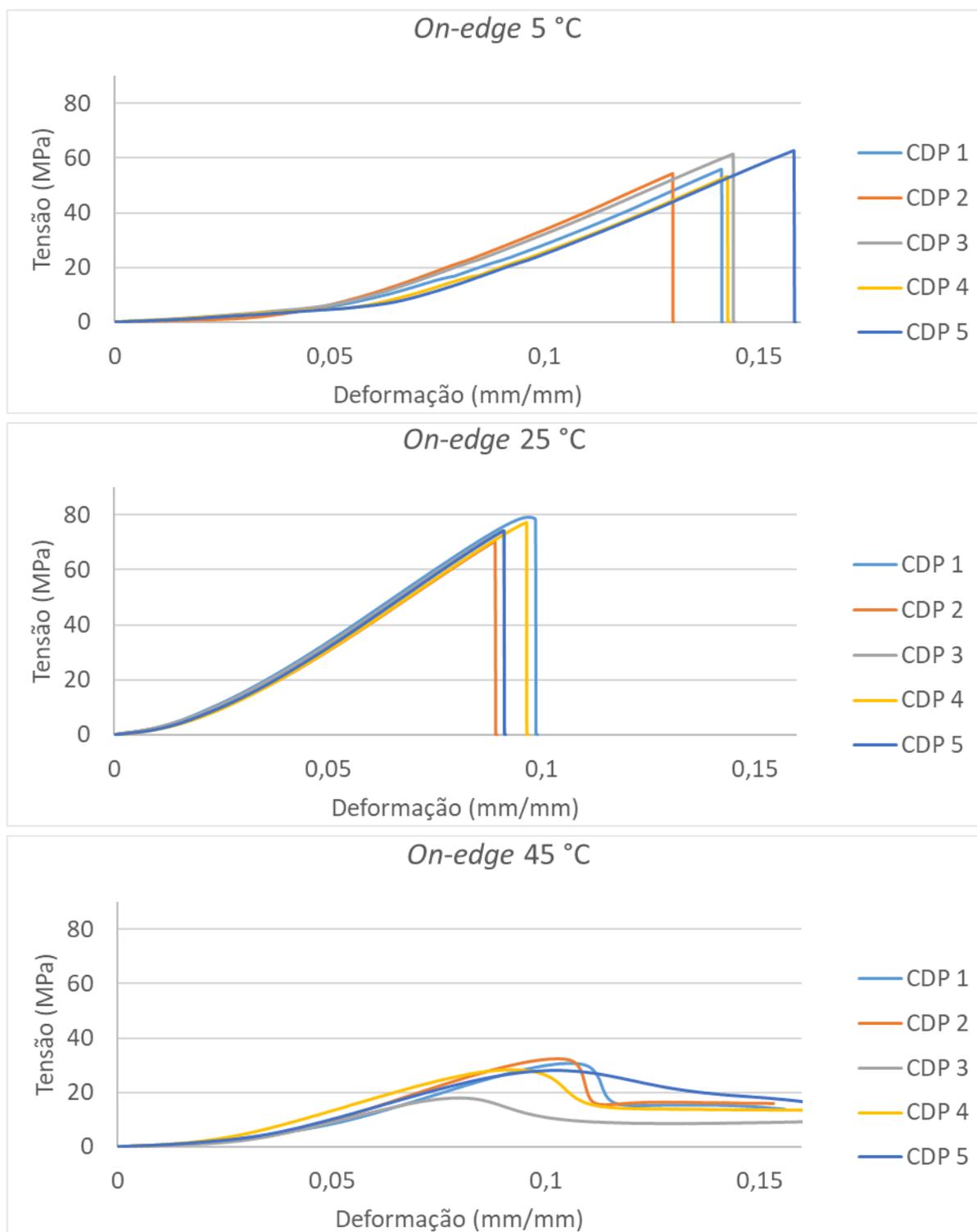
Destaca-se que, dos 45 corpos de prova ensaiados, apenas o CDP nº 5 do ensaio de tração à 25 °C na orientação *upright* apresentou um comportamento muito diferente dos demais dentro do mesmo grupo e, portanto, não foi considerado para os cálculos, conforme evidenciado na Figura 31.

Figura 29 – Gráficos com os resultados dos ensaios de tração sob três diferentes temperaturas, grupo *Flat*



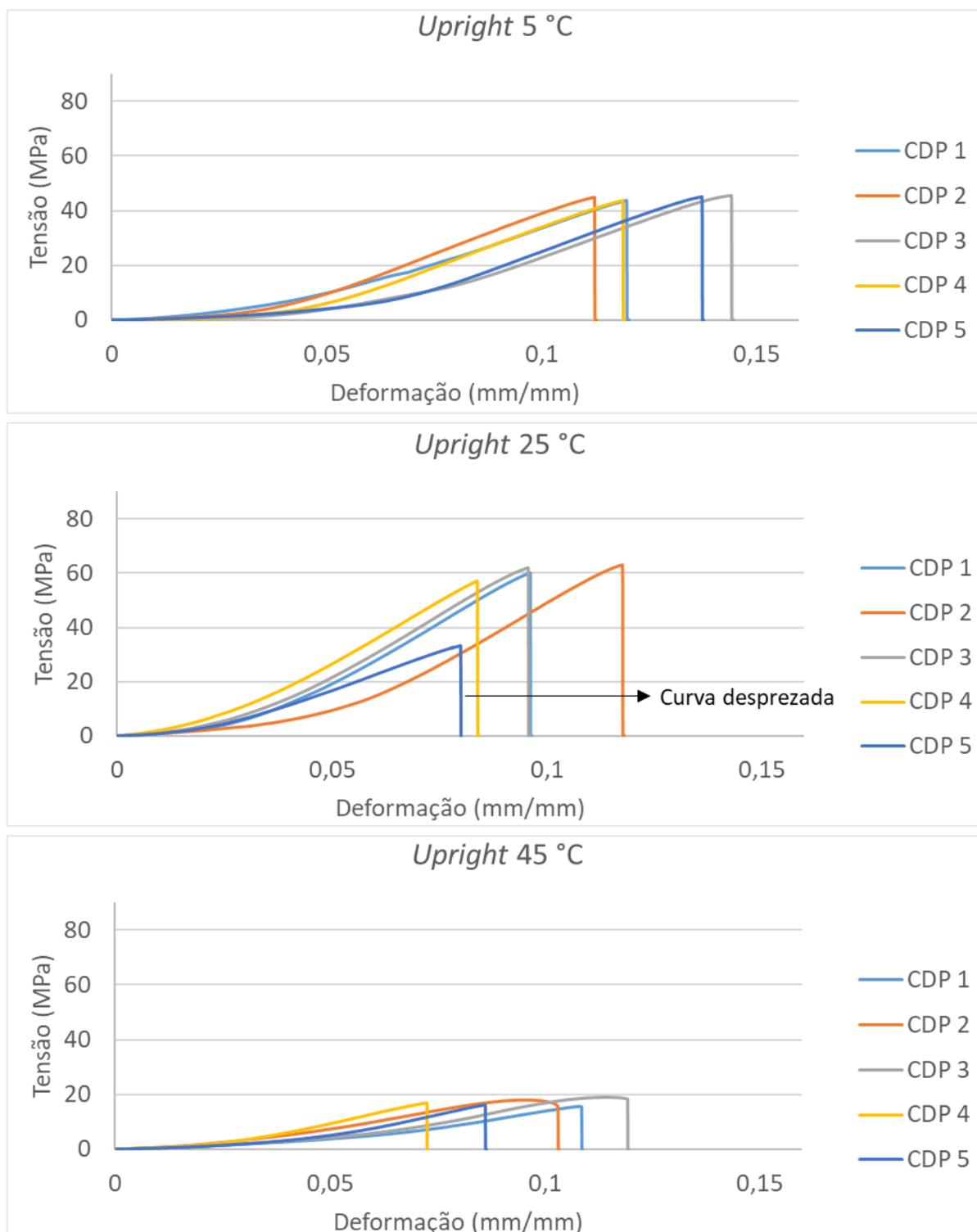
Fonte: Do autor, 2021

Figura 30 – Gráficos com os resultados dos ensaios de tração sob três diferentes temperaturas, grupo *On-edge*



Fonte: Do autor, 2021

Figura 31 – Gráficos com os resultados dos ensaios de tração sob três diferentes temperaturas, grupo *Upright 5*



Fonte: Do autor, 2021

5.3.1 Tensão máxima de tração

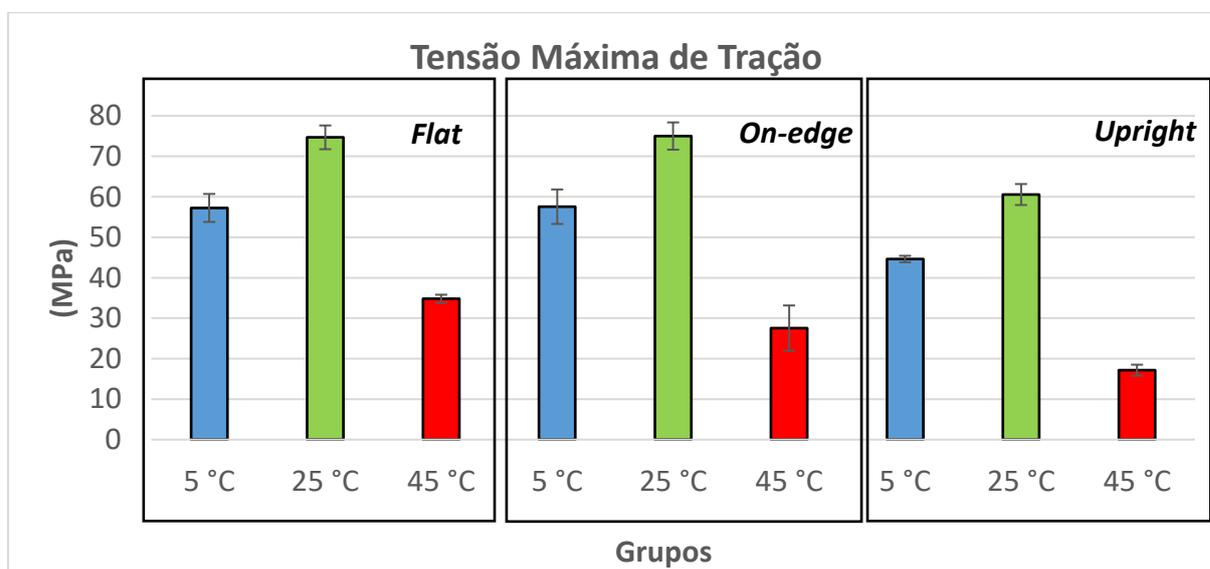
Os valores médios da tensão máxima de tração com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 5 e na Figura 32. Os valores de tensão máxima de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice G.

Tabela 5 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão máxima obtidos nos ensaios de tração

Orientação	Propriedade mecânica		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Tensão Máxima (MPa)	Média	57,24 \pm 3,45	74,69 \pm 2,94	34,81 \pm 0,99
		I.C (95%)	[52,95;61,53]	[71,04;78,34]	[33,58;36,04]
<i>On-edge</i>	Tensão Máxima (MPa)	Média	57,55 \pm 4,26	75,00 \pm 3,37	27,54 \pm 5,60
		I.C (95%)	[52,25;62,84]	[70,82;79,19]	[20,58;34,50]
<i>Upright</i>	Tensão Máxima (MPa)	Média	44,62 \pm 0,79	60,55 \pm 2,59	17,15 \pm 1,36
		I.C (95%)	[43,63;45,60]	[57,33;63,78]	[15,47;18,84]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 32 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão máxima obtidos no ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2021

Primeiramente, foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a tensão máxima obtida nos ensaios de tração

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
Flat	5	0,2049	0,0975
	25	0,2005	
	45	0,2352	
On-edge	5	0,2493	0,6295
	25	0,2082	
	45	0,3399	
Upright	5	0,2514	0,1206
	25	0,4252	
	45	0,1675	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Portanto, como todos os p_{valor} são maiores 0,05, podemos concluir que todos os dados são normalmente distribuídos e as variâncias são iguais.

Assim, com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado dos testes ANOVA para a tensão máxima obtida nos ensaios de tração

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
Flat	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
On-edge		$\cong 0$	Significativa
Upright		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa na tensão máxima de tração, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos testes de Tukey para a tensão máxima obtida nos ensaios de tração

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

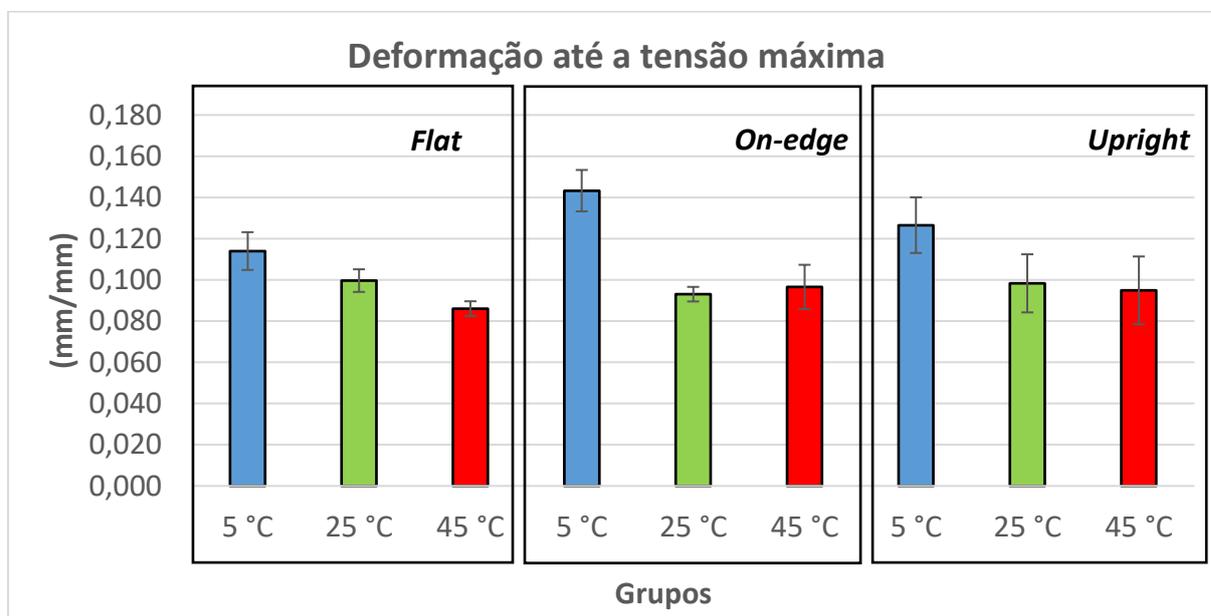
A deformação até a tensão máxima também foi analisada. Os valores médios da deformação até a tensão máxima de tração com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 9 e na Figura 33. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice H.

Tabela 9 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação até a tensão máxima obtidos nos ensaios de tração

Orientação	Propriedade mecânica		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,114 \pm 0,009	0,100 \pm 0,005	0,086 \pm 0,004
		I.C (95%)	[0,103;0,125]	[0,093;0,106]	[0,082;0,090]
<i>On-edge</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,143 \pm 0,010	0,093 \pm 0,004	0,097 \pm 0,011
		I.C (95%)	[0,131;0,156]	[0,089;0,097]	[0,083;0,110]
<i>Upright</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,127 \pm 0,014	0,098 \pm 0,014	0,095 \pm 0,016
		I.C (95%)	[0,110;0,143]	[0,081;0,116]	[0,075;0,115]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 33 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação até a máxima obtidos no ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de tração

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
<i>Flat</i>	5	0,2225	0,2029
	25	0,2260	
	45	0,3906	
<i>On-edge</i>	5	0,2681	0,1624
	25	0,3035	
	45	0,2936	
<i>Upright</i>	5	0,2827	0,9341
	25	0,3443	
	45	0,1879	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Portanto, como todos os p_{valor} são maiores 0,05, podemos concluir que todos os dados são normalmente distribuídos e as variâncias são iguais.

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado dos testes ANOVA para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de tração

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>		0,0127	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira

significativa na deformação no limite de escoamento, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de tração

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
Flat	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0117	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,0160	Significativa
On-edge	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,8034	Não significativa
Upright	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0391	Significativa
	5 °C x 45 °C		0,0155	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,9376	Não significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

5.3.2 Módulo de elasticidade

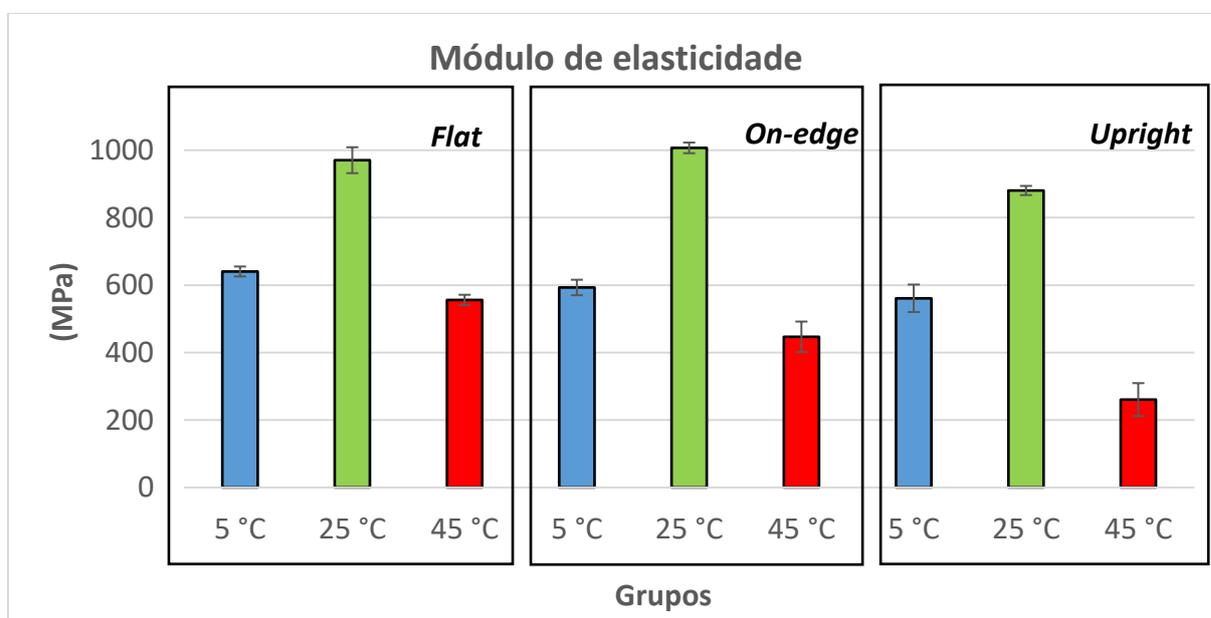
Os valores médios do módulo de elasticidade com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 13 e na Figura 34. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice I.

Tabela 13 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de tração

Orientação	Propriedade mecânica		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	640,41 \pm 14,76	970,34 \pm 38,49	555,89 \pm 15,49
		I.C (95%)	[622,08;658,74]	[922,55;1018,13]	[536,66;575,13]
<i>On-edge</i>	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	592,93 \pm 22,97	1006,88 \pm 15,79	446,69 \pm 45,19
		I.C (95%)	[564,41;621,44]	[987,27;1026,49]	[390,57;502,8]
<i>Upright</i>	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	560,94 \pm 40,73	834,73 \pm 103,10	260,48 \pm 48,84
		I.C (95%)	[510,37;611,51]	[706,72;962,74]	[199,84;321,12]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 34 – Gráfico com valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade obtidos no ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
<i>Flat</i>	5	0,2385	0,1056
	25	0,3221	
	45	0,2437	
<i>On-edge</i>	5	0,3210	0,1314
	25	0,2005	
	45	0,2266	
<i>Upright</i>	5	0,1972	0,1562
	25	0,4173	
	45	0,2187	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Portanto, como todos os p_{valor} são maiores 0,05, podemos concluir que todos os dados são normalmente distribuídos e as variâncias são iguais.

Assim, com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado dos testes ANOVA para o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa no módulo de elasticidade, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados dos testes de Tukey para o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
Flat	5 °C x 25 °C	Tukey	≅ 0	Significativa
	5 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
	25 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
On-edge	5 °C x 25 °C	Tukey	≅ 0	Significativa
	5 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
	25 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
Upright	5 °C x 25 °C	Tukey	≅ 0	Significativa
	5 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
	25 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

5.3.3 Limite de escoamento

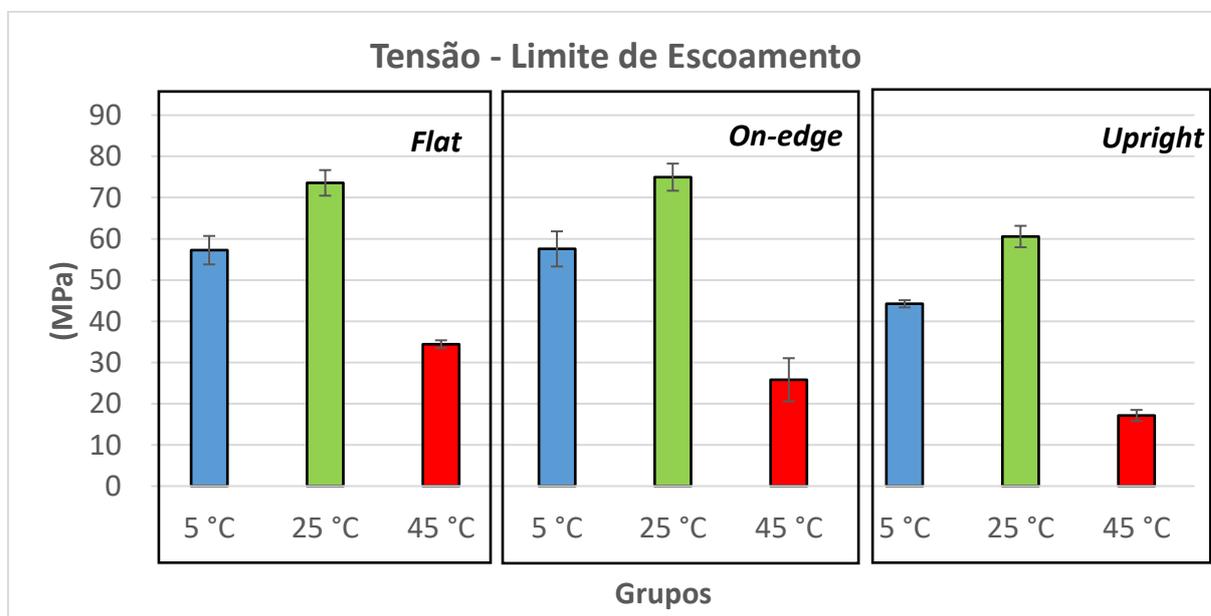
Os valores médios da tensão no limite de escoamento com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 17, na Figura 35. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice J.

Tabela 17 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão no limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração

Orientação	Limite de escoamento		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Tensão (MPa)	Média	57,24 \pm 3,45	73,57 \pm 3,1	34,43 \pm 0,96
		I.C (95%)	[52,95;61,53]	[69,72;77,42]	[33,24;35,61]
<i>On-edge</i>	Tensão (MPa)	Média	57,55 \pm 4,26	74,95 \pm 3,29	25,80 \pm 5,23
		I.C (95%)	[52,25;62,84]	[70,86;79,04]	[19,31;32,3]
<i>Upright</i>	Tensão (MPa)	Média	44,23 \pm 0,88	55,10 \pm 12,39	17,14 \pm 1,35
		I.C (95%)	[43,14;45,32]	[39,72;70,49]	[15,47;18,81]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 35 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão no limite de escoamento obtidos no ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
Flat	5	0,2042	0,0827
	25	0,2117	
	45	0,2255	
On-edge	5	0,2492	0,6884
	25	0,2119	
	45	0,2748	
Upright	5	0,2647	0,1553
	25	0,3645	
	45	0,1660	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Portanto, como todos os p_{valor} são maiores 0,05, podemos concluir que todos os dados são normalmente distribuídos e as variâncias são iguais.

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado dos testes ANOVA para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
Flat	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
On-edge		$\cong 0$	Significativa
Upright		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa na tensão no limite de escoamento, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados dos testes de Tukey para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	≅ 0	Significativa
	5 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
	25 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	≅ 0	Significativa
	5 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
	25 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
<i>Upright</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	≅ 0	Significativa
	5 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa
	25 °C x 45 °C		≅ 0	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

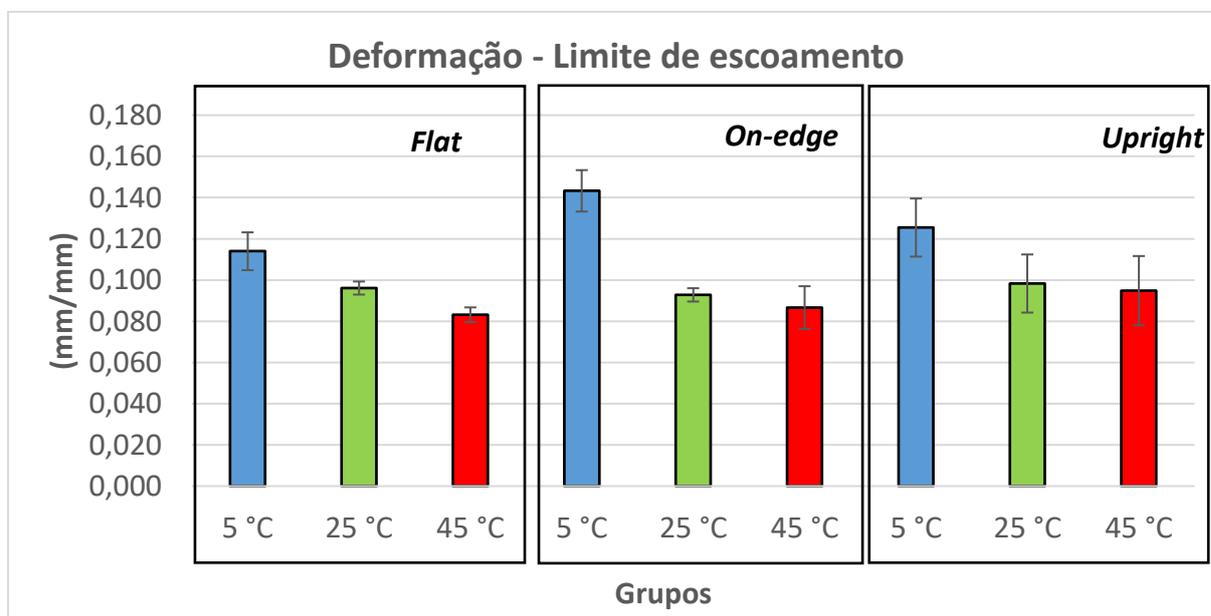
A deformação no limite de escoamento também foi analisada. Os dados foram dispostos na Tabela 21 e na Figura 36. Os valores de cada corpo de prova também estão apresentados no Apêndice J.

Tabela 21 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação no limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração

Orientação	Limite de escoamento		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,114 \pm 0,009	0,096 \pm 0,003	0,083 \pm 0,004
		I.C (95%)	[0,103;0,125]	[0,092;0,100]	[0,079;0,088]
<i>On-edge</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,143 \pm 0,010	0,093 \pm 0,003	0,087 \pm 0,010
		I.C (95%)	[0,131;0,156]	[0,089;0,097]	[0,074;0,100]
<i>Upright</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,125 \pm 0,014	0,095 \pm 0,015	0,095 \pm 0,017
		I.C (95%)	[0,108;0,143]	[0,076;0,113]	[0,074;0,116]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 36 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação no limite de escoamento obtidos no ensaio de tração



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
Flat	5	0,2225	0,0628
	25	0,1986	
	45	0,4160	
On-edge	5	0,2681	0,1339
	25	0,2968	
	45	0,1333	
Upright	5	0,2591	0,9450
	25	0,3453	
	45	0,1839	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Portanto, como todos os p_{valor} são maiores 0,05, podemos concluir que todos os dados são normalmente distribuídos e as variâncias são iguais.

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados dos testes ANOVA para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
Flat	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
On-edge		$\cong 0$	Significativa
Upright		0,0164	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira

significativa na deformação no limite de escoamento, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 24

Tabela 24 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de tração

Grupo	Comparações	Teste	pvalor	Interpretação
Flat	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0013	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,0129	Significativa
On-edge	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,5075	Não significativa
Upright	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0523	Não significativa
	5 °C x 45 °C		0,0213	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,9380	Não significativa

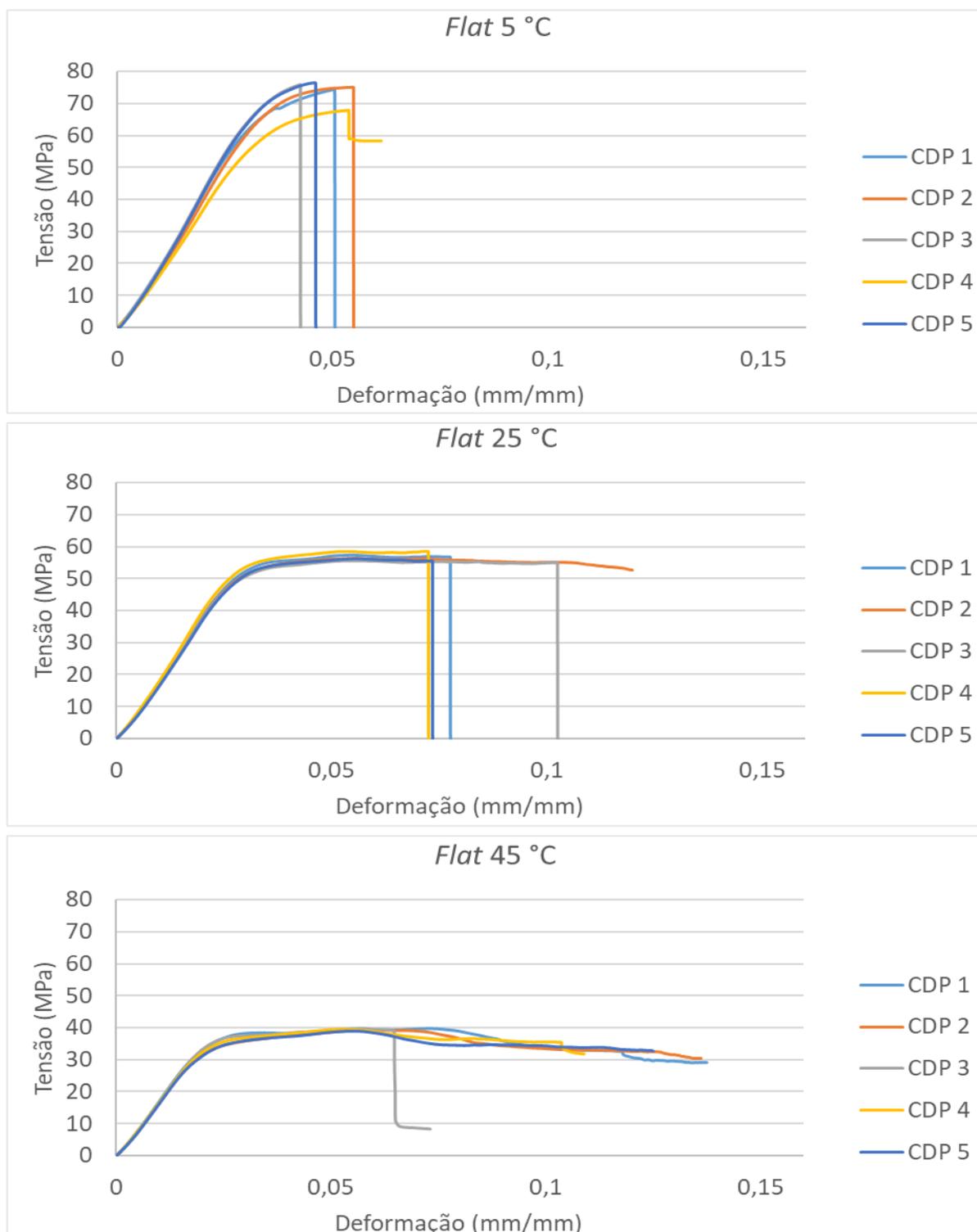
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

5.4 ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos e obtidos os valores de tensão máxima, deformação até a tensão máxima, módulo de elasticidade e limite de escoamento de 5 amostras em 9 grupos distintos.

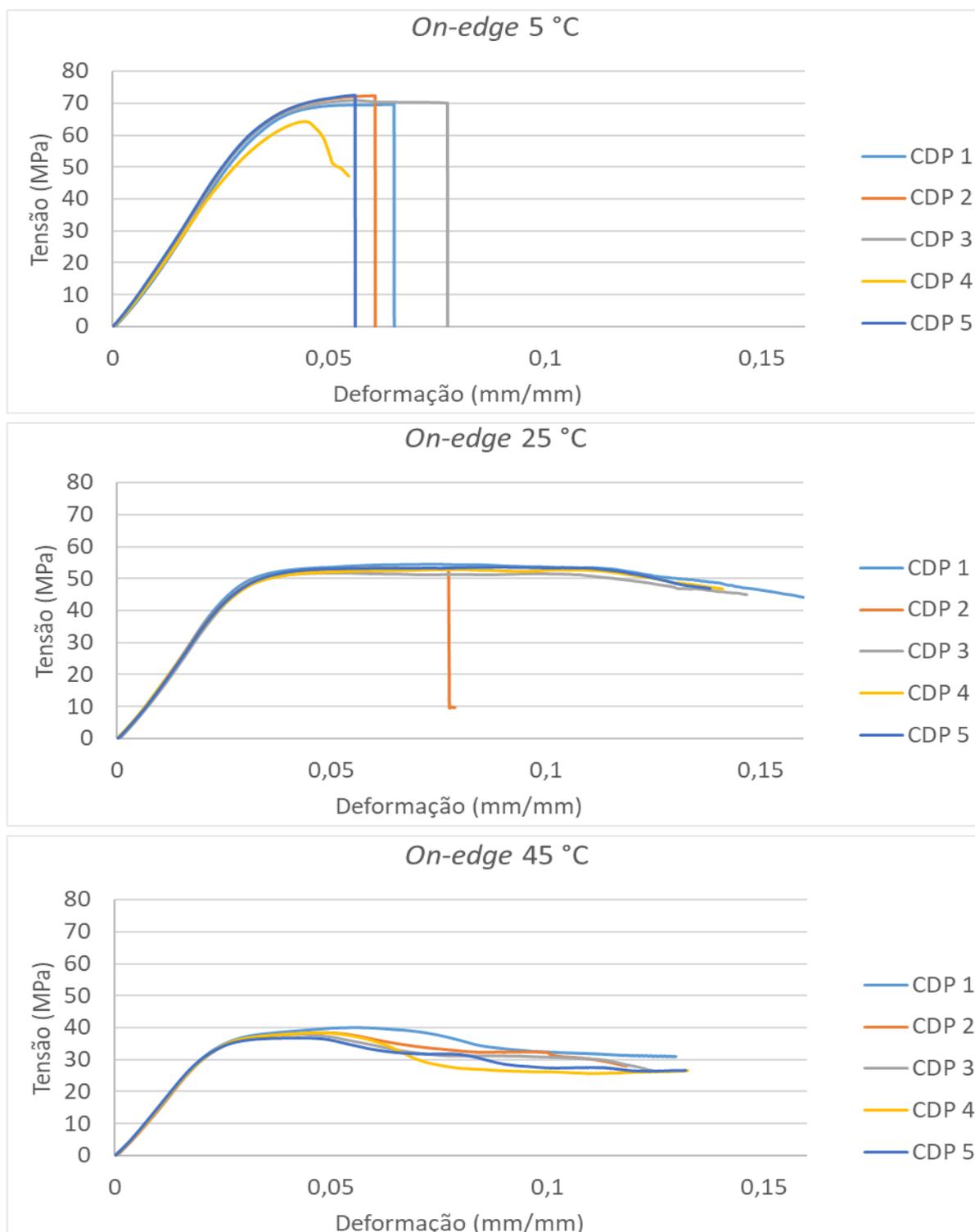
Os gráficos “Tensão x Deformação” foram plotados para cada grupo e estão dispostos nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39.

Figura 37 – Gráficos com os resultados dos ensaios de flexão sob três diferentes temperaturas, grupo *Flat*



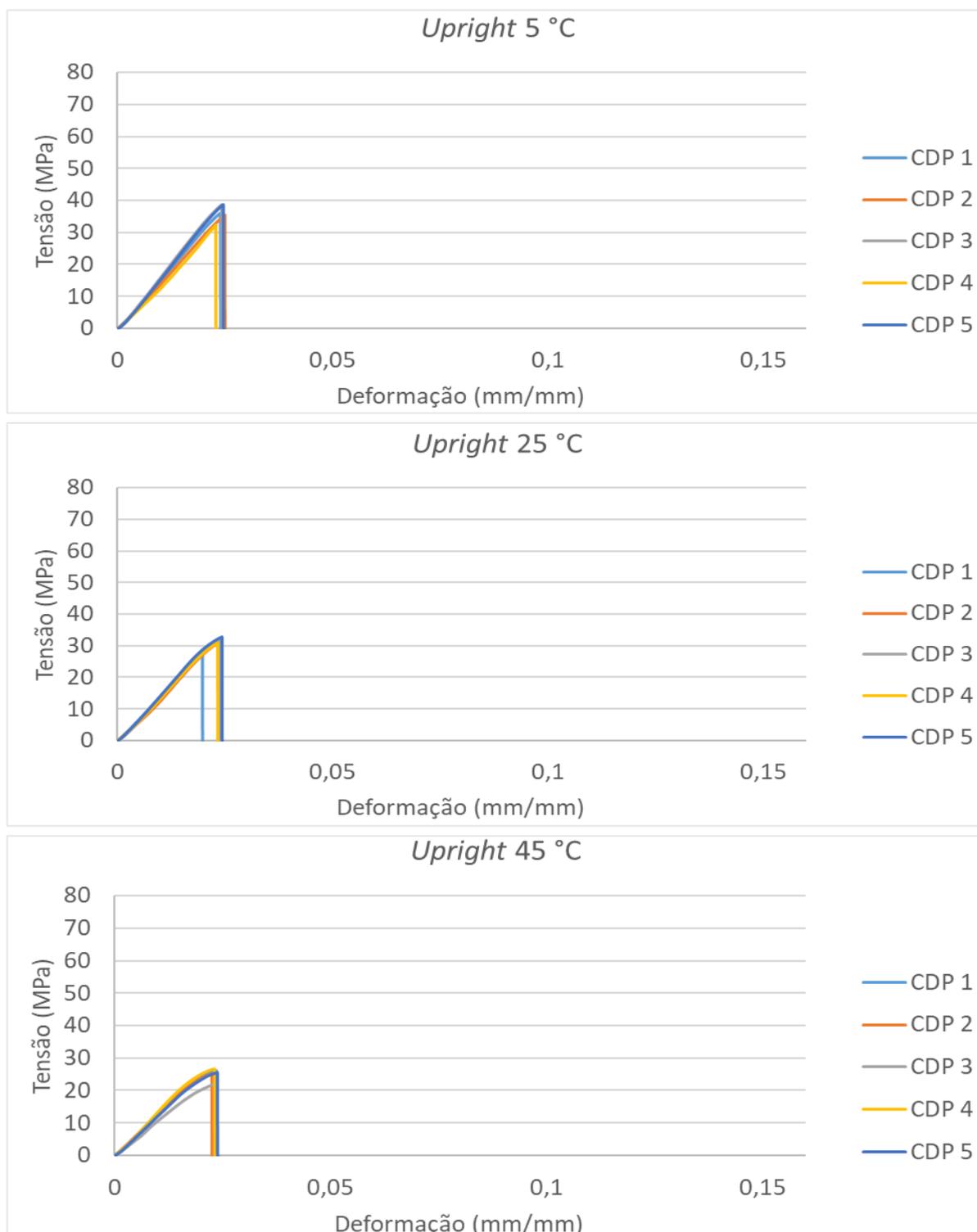
Fonte: Do autor, 2021

Figura 38 – Gráficos com os resultados dos ensaios de flexão sob três diferentes temperaturas, grupo *On-edge*



Fonte: Do autor, 2021

Figura 39 – Gráficos com os resultados dos ensaios de flexão sob três diferentes temperaturas, grupo *Upright*



Fonte: Do autor, 2021

5.4.1 Tensão máxima

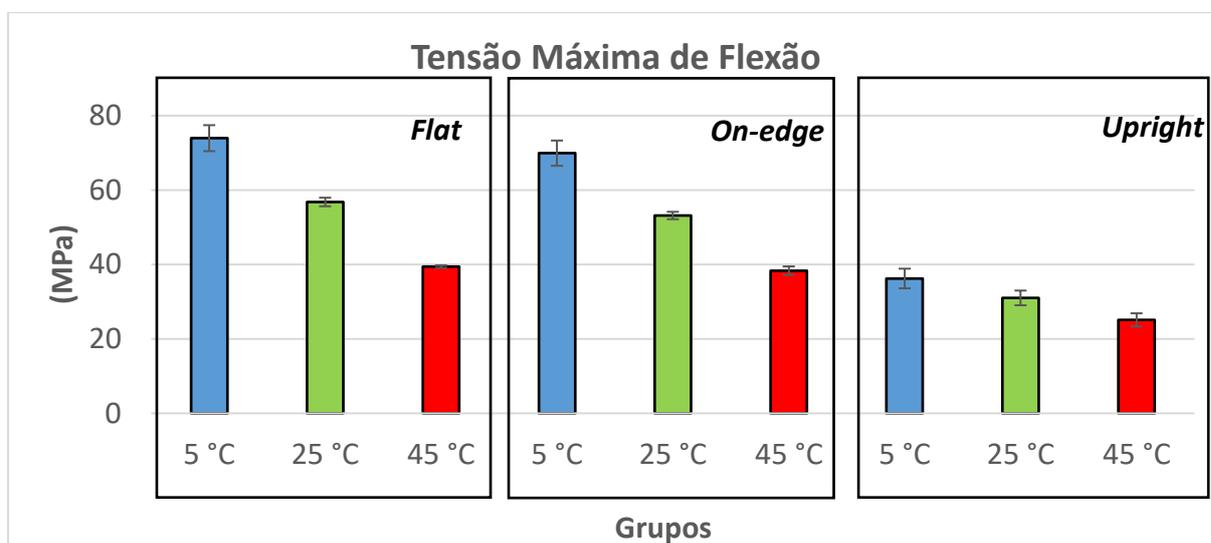
Os valores médios da tensão máxima de flexão com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 25 e na Figura 40. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice K.

Tabela 25 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão máxima obtidos nos ensaios de flexão

Orientação	Propriedade mecânica		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Tensão Máxima (MPa)	Média	73,95 \pm 3,49	56,81 \pm 1,15	39,44 \pm 0,35
		I.C (95%)	[69,62;78,29]	[55,37;58,24]	[39,01;39,87]
<i>On-edge</i>	Tensão Máxima (MPa)	Média	69,92 \pm 3,39	53,17 \pm 1,00	38,33 \pm 1,16
		I.C (95%)	[65,71;74,14]	[51,93;54,41]	[36,89;39,77]
<i>Upright</i>	Tensão Máxima (MPa)	Média	36,24 \pm 2,64	31,02 \pm 1,97	25,11 \pm 1,78
		I.C (95%)	[32,96;39,52]	[28,57;33,47]	[22,91;27,32]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 40 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão máxima obtidos no ensaio de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Primeiramente, foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para tensão máxima de flexão

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
<i>Flat</i>	5	0,3508	0,0489
	25	0,2535	
	45	0,2048	
<i>On-edge</i>	5	0,2634	0,0552
	25	0,1658	
	45	0,2684	
<i>Upright</i>	5	0,2213	0,7297
	25	0,2838	
	45	0,3103	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Podemos observar que o p_{valor} de Bartlett do grupo *flat* foi ligeiramente menor que 0,05. No trabalho de Silveira (1999) é mostrado que o teste ANOVA ainda é robusto quando isso acontece, pois a variância de um dos grupos é muito pequena.

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultado dos testes ANOVA para tensão máxima de flexão

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa na tensão máxima de tração, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando os testes de Tukey, Os resultados foram dispostos na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados dos testes Tukey para tensão máxima de flexão

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0064	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,0026	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

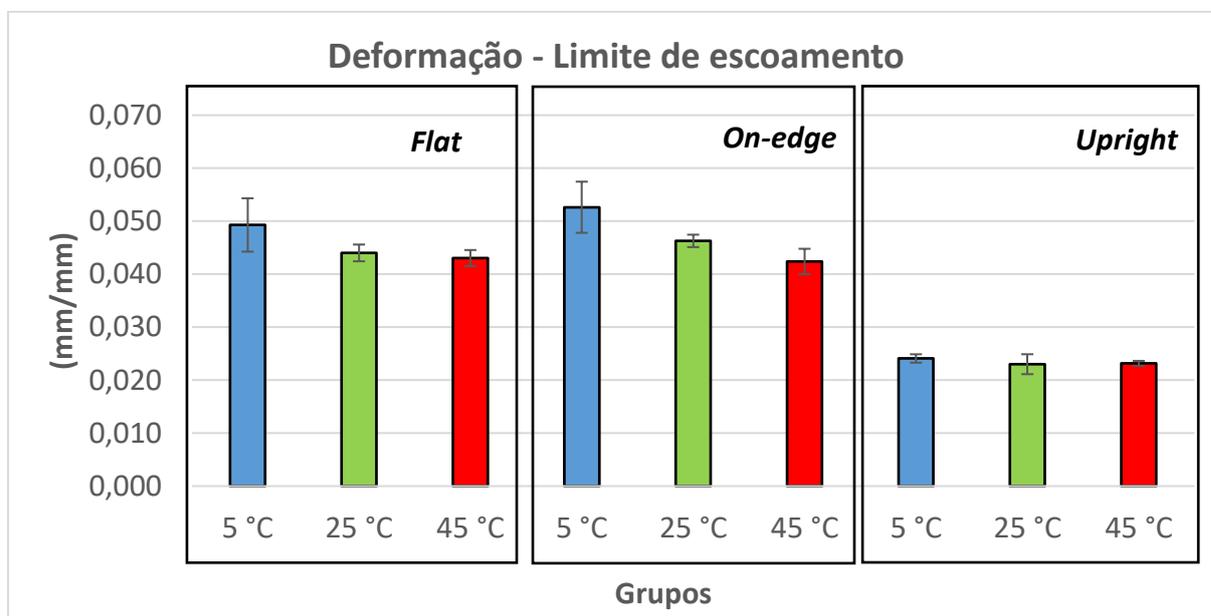
A deformação até a tensão máxima também foi analisada. Os valores médios e os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 29 e Figura 41. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice L.

Tabela 29 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação até a tensão máxima obtidos nos ensaios de flexão

Orientação	Propriedade mecânica		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,049 \pm 0,005	0,044 \pm 0,002	0,043 \pm 0,002
		I.C (95%)	[0,043;0,056]	[0,042;0,046]	[0,041;0,045]
<i>On-edge</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,053 \pm 0,005	0,046 \pm 0,001	0,042 \pm 0,002
		I.C (95%)	[0,047;0,059]	[0,045;0,048]	[0,039;0,045]
<i>Upright</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,024 \pm 0,001	0,023 \pm 0,002	0,023 \pm 0,000
		I.C (95%)	[0,023;0,025]	[0,021;0,025]	[0,023;0,024]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 41 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação até a tensão máxima obtidos no ensaio de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de flexão

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
<i>Flat</i>	5	0,2213	0,0481
	25	0,1364	
	45	0,1364	
<i>On-edge</i>	5	0,3010	0,0558
	25	0,2213	
	45	0,3195	
<i>Upright</i>	5	0,2305	0,1774
	25	0,3181	
	45	0,3000	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultado dos testes ANOVA para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de flexão

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	ANOVA	0,0241	Significativa
<i>On-edge</i>		0,0014	Significativa
<i>Upright</i>		0,2214	Não significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Analisando os resultados, para o grupo *upright* não houve diferença significativa. Para os grupos *flat* e *on-edge*, foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação até a tensão máxima obtida nos ensaios de flexão

Grupo	Comparações	Teste	p _{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0537	Não significativa
	5 °C x 45 °C		0,0227	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,8794	Não significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0211	Significativa
	5 °C x 45 °C		0,0007	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,1729	Não significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

5.4.2 Módulo de elasticidade

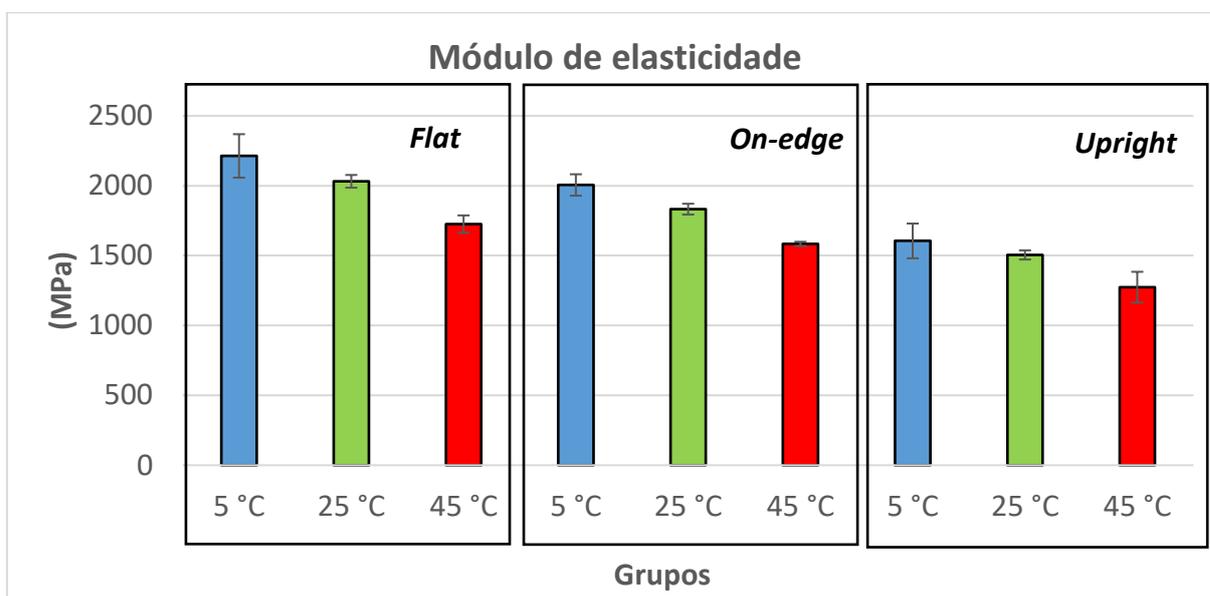
Os valores médios do módulo de elasticidade de flexão com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 33 e na Figura 42. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice M.

Tabela 33 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão

Orientação	Propriedade mecânica		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	2213,64 \pm 155,73	2031,84 \pm 45,57	1725,73 \pm 62,14
		I.C (95%)	[2020,28;2407,01]	[1975,26;2088,42]	[1648,58;1802,88]
<i>On-edge</i>	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	2005,79 \pm 76,56	1832,71 \pm 38,83	1584,16 \pm 15,09
		I.C (95%)	[1910,73;2100,86]	[1784,49;1880,93]	[1565,43;1602,89]
<i>Upright</i>	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média	1605,29 \pm 124,39	1505,06 \pm 32,83	1273,87 \pm 110,3
		I.C (95%)	[1450,83;1759,74]	[1464,3;1545,82]	[1136,91;1410,83]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 42 – Gráfico com valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade obtidos no ensaio de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para módulo de elasticidade de flexão

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
Flat	5	0,2056	0,0507
	25	0,2806	
	45	0,2363	
On-edge	5	0,4522	0,0483
	25	0,2451	
	45	0,3144	
Upright	5	0,2123	0,0717
	25	0,2163	
	45	0,2833	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Resultado dos testes ANOVA para módulo de elasticidade de flexão

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa no módulo de elasticidade, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste de Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 36.

Tabela 36 – Resultados dos testes de Tukey para módulo de elasticidade de flexão

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0352	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,0011	Significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,2753	Não significativa
	5 °C x 45 °C		0,0004	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,0074	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

5.4.3 Limite de escoamento

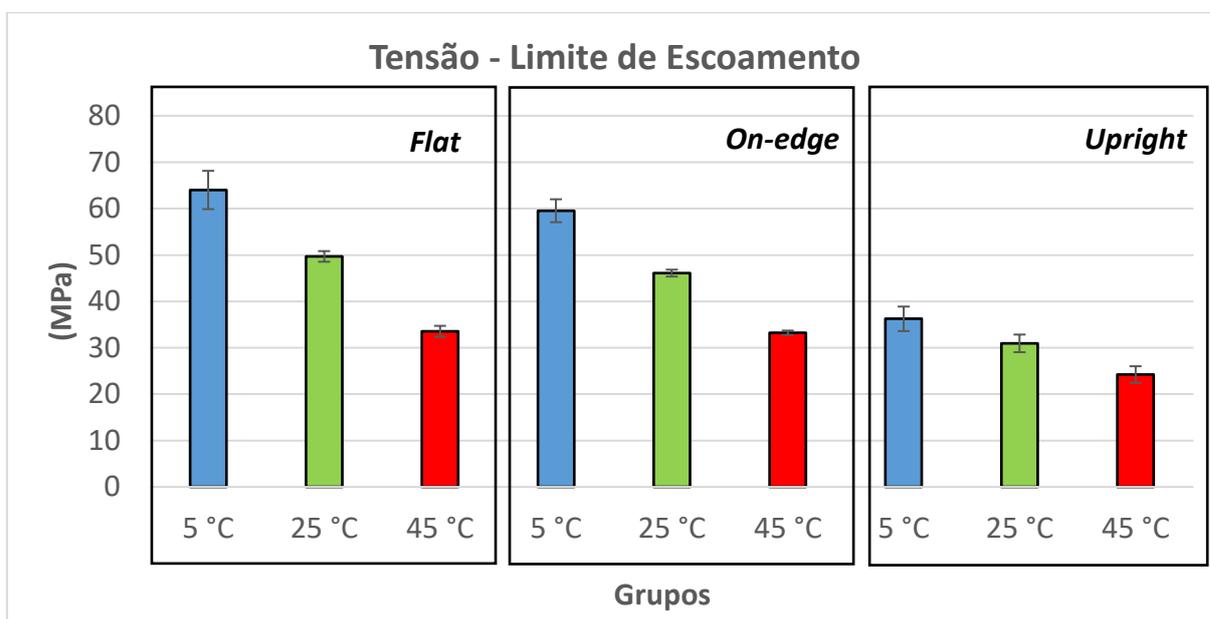
Os valores médios da tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão com os respectivos desvios padrão de cada grupo foram dispostos na Tabela 37 e na Figura 43. Os valores de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice N.

Tabela 37 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança da tensão no limite de escoamento obtidos nos ensaios de flexão

Orientação	Limite de escoamento		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Tensão (MPa)	Média	64,03 \pm 4,13	49,70 \pm 1,15	33,55 \pm 1,18
		I.C (95%)	[58,9;69,15]	[48,27;51,12]	[32,08;35,02]
<i>On-edge</i>	Tensão (MPa)	Média	59,56 \pm 2,47	46,1 \pm 0,74	33,24 \pm 0,46
		I.C (95%)	[56,49;62,63]	[45,18;47,02]	[32,66;33,81]
<i>Upright</i>	Tensão (MPa)	Média	36,24 \pm 2,64	30,95 \pm 1,90	24,23 \pm 1,79
		I.C (95%)	[32,96;39,52]	[28,59;33,31]	[22,01;26,45]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 43 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da tensão no limite de escoamento obtidos no ensaio de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
<i>Flat</i>	5	0,2255	0,0586
	25	0,1965	
	45	0,2321	
<i>On-edge</i>	5	0,3129	0,0465
	25	0,3535	
	45	0,2454	
<i>Upright</i>	5	0,2213	0,7161
	25	0,2983	
	45	0,3111	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Resultado dos testes ANOVA para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa na tensão no limite de escoamento, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste de Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 40.

Tabela 40 – Resultados dos testes de Tukey para a tensão no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,0008	Significativa
	5 °C x 45 °C		0,0055	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

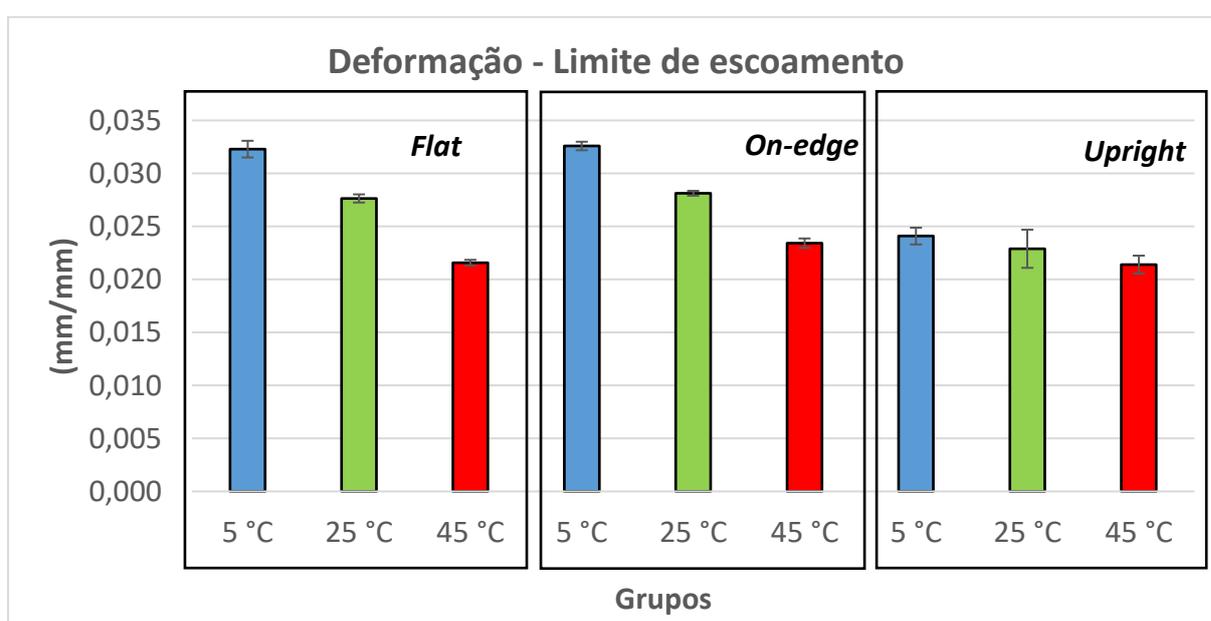
A deformação no limite de escoamento também foi analisada. Os dados foram dispostos na Tabela 41 e na Figura 44. Os valores de cada corpo de prova também estão apresentados no Apêndice N.

Tabela 41 – Valores da média \pm desvio padrão e do intervalo de confiança de deformação no limite de escoamento obtidos nos ensaios de flexão

Orientação	Limite de escoamento		Temperatura		
			5 °C	25 °C	45 °C
<i>Flat</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,032 \pm 0,001	0,028 \pm 0,000	0,022 \pm 0,000
		I.C (95%)	[0,031;0,033]	[0,027;0,028]	[0,021;0,022]
<i>On-edge</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,033 \pm 0,000	0,028 \pm 0,000	0,023 \pm 0,000
		I.C (95%)	[0,032;0,033]	[0,028;0,028]	[0,023;0,024]
<i>Upright</i>	Deformação (mm/mm)	Média	0,024 \pm 0,001	0,023 \pm 0,002	0,021 \pm 0,001
		I.C (95%)	[0,023;0,025]	[0,021;0,025]	[0,020;0,022]

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Figura 44 – Gráfico com os valores médios e desvio padrão da deformação no limite de escoamento obtidos no ensaio de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Foram feitos testes para analisar a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para cada um dos 9 subgrupos. Os resultados estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Resultados dos testes de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão

Grupo	Temperatura (°C)	Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Homogeneidade das variâncias (Bartlett)
Flat	5	0,2305	0,6309
	25	0,3674	
	45	0,3674	
On-edge	5	0,3674	0,9105
	25	0,4726	
	45	0,3674	
Upright	5	0,2305	0,2849
	25	0,3181	
	45	0,3488	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Portanto, como todos os p_{valor} são maiores 0,05, podemos concluir que todos os dados são normalmente distribuídos e as variâncias são iguais.

Com os pressupostos validados, foi possível aplicar os testes ANOVA ao nível de confiança de 95% para verificar o efeito da temperatura em cada grupo. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 – Resultados dos testes ANOVA para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão

Grupo analisado	Teste	p_{valor}	Interpretação
Flat	ANOVA	$\cong 0$	Significativa
On-edge		$\cong 0$	Significativa
Upright		0,0118	Significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

Como os p_{valor} foram menores 0,05, significa que existe diferença estatística em todos os grupos, ou seja, pelo menos uma das temperaturas influenciou de maneira significativa na deformação no limite de escoamento, em todas as orientações analisadas.

Foi analisado o efeito de cada temperatura utilizando o teste Tukey. Os resultados foram dispostos na Tabela 44.

Tabela 44 – Resultados dos testes de Tukey para a deformação no limite de escoamento obtida nos ensaios de flexão

Grupo	Comparações	Teste	p_{valor}	Interpretação
<i>Flat</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>On-edge</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	$\cong 0$	Significativa
	5 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
	25 °C x 45 °C		$\cong 0$	Significativa
<i>Upright</i>	5 °C x 25 °C	Tukey	0,3133	Não significativa
	5 °C x 45 °C		0,0126	Significativa
	25 °C x 45 °C		0,1783	Não significativa

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2021

6 DISCUSSÃO

Atualmente, a quantidade de trabalhos relacionados à impressão 3D vem aumentando progressivamente, porém ainda existem diversos temas a serem pesquisados. Um dos motivos dessa baixa quantidade de trabalhos é que, apesar das tecnologias de impressão 3D terem sido desenvolvidas desde 1980, estas só se tornaram acessíveis a partir de 2009, quando as patentes das diversas tecnologias existentes começaram a perder a validade. No trabalho de Pitágora e Araújo (2018) foi feita uma análise de como a perda da validade das patentes de FFF em 2009 e de SLS em 2014 impactou de maneira significativa em vários setores. Para a tecnologia FFF, os autores constataram que, do ano de 1980 até 2008, existiam cerca de 174 artigos publicados no Science Direct e 184 artigos publicados no portal CAPES com assunto relacionado à impressão 3D; em contrapartida, após a perda de validade da patente, do ano de 2009 até 2017 foram publicados 748 artigos no Science Direct e 933 artigos no portal CAPES, representando um aumento de cerca de 469%.

Esta tendência de aumento nas publicações é acompanhada do interesse pela compra de impressoras 3D, visto que esse mercado está crescendo exponencialmente a cada ano que se passa. A aplicação de peças fabricadas por manufatura aditiva é cada vez mais comum em praticamente todos os setores da indústria e, portanto, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nesta tecnologia é de suma importância, uma vez que quaisquer mudanças nas condições de uso ou da impressão geram diferentes resultados finais.

Um dos objetivos desta pesquisa surgiu do interesse em analisar o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do PLA através de ensaios tração e de flexão em três pontos realizados em corpos de prova fabricados por manufatura aditiva, uma vez que não foram encontradas pesquisas que abordassem este efeito. O outro objetivo surgiu como consequência do primeiro, pois foi necessário desenvolver um equipamento com funcionamento similar ao de uma câmara ambiental, a fim de controlar a temperatura ambiente durante a realização dos ensaios.

O PLA foi o material escolhido para o estudo, pois é um dos materiais mais utilizados na impressão 3D, além de ser biodegradável, renovável, reciclável e objeto constante de estudo da comunidade científica.

O trabalho feito por Chacón et al. (2017) serviu como base para o desenvolvimento do presente estudo. Neste trabalho, os autores variaram alguns parâmetros de impressão (orientação de construção, espessura de camada e velocidade de impressão) e analisaram a interação entre estes fatores, concluindo que todos os parâmetros analisados influenciaram de maneira significativa nas propriedades mecânicas finais do PLA.

A escolha das temperaturas de ensaio foi baseada no trabalho de Grasso et al. (2018), que executou ensaios de tração à 30 °C, 40 °C, 50 °C e 60 °C. Foi definido o valor de 45 °C para os ensaios à altas temperaturas e 25 °C para a temperatura ambiente.

Como não foram encontrados trabalhos que abordassem o efeito de baixas temperaturas nas propriedades do PLA, foi escolhido o valor de 5 °C. Este valor é compatível com diversas aplicações práticas, uma vez que as peças fabricadas por impressão 3D utilizando PLA podem ser utilizadas para utensílios domésticos, itens decorativos e próteses médicas, por exemplo, que podem estar sujeitas a temperatura próxima de 5 °C.

6.1 CÂMARA AMBIENTAL

O equipamento construído apresentou um bom desempenho dentro do que foi proposto para esta pesquisa. Foi possível realizar os ensaios mecânicos à 5 °C e à 25 °C mantendo a temperatura variando em ± 1 °C.

Para os ensaios à 5 °C, observou-se que mesmo após a bancada ficar ligada por 6 horas, a temperatura interna da câmara 2 não diminuía além dos 5 ± 1 °C, indicando que essa é a capacidade máxima de refrigeração da bancada. Por esse motivo, mesmo que fosse implementado um controle automático de temperatura com um termostato, por exemplo, não iria influenciar significativamente neste trabalho.

Para os ensaios à 45 °C, no entanto, a temperatura variou ± 3 °C, pois o soprador térmico era desligado manualmente quando a temperatura dentro da caixa chegava perto dos 45 °C. Esse ponto poderia ter sido melhorado com um controle automático da resistência interna do soprador térmico, utilizando um varivolt, por exemplo. Vale a pena lembrar que as câmaras comerciais apresentam variação de ± 7 °C, apesar de trabalharem com uma maior amplitude de temperatura (INSTRON, 2017).

No Apêndice O é apresentado o custo aproximado de cada componente do equipamento construído. Analisando o preço aproximado de R\$ 1.700,00, podemos concluir que se trata de um equipamento com custo reduzido ao comparar com o preço das câmaras ambientais comerciais que são importadas e chegam a custar até US\$ 60.000,00 (INSTRON, 2017). O preço de cada componente foi obtido considerando peças compradas na cidade de Uberaba, Minas Gerais, e/ou na internet no período de setembro de 2019 até março de 2020. Ainda, vale a pena ressaltar, que este custo é apenas referente as peças, não podendo ser considerado o custo final real do equipamento, uma vez que existem outras variáveis (salário dos professores e técnicos envolvidos, energia elétrica, equipamentos utilizados para a construção e outros) que não foram calculadas, porém influenciam direta ou indiretamente no valor final

Apesar do bom desempenho podemos destacar alguns pontos que poderiam ser melhorados no design e no funcionamento do equipamento:

- As tubulações que direcionam o ar para a câmara 2 foram posicionadas na frente da máquina universal de ensaios e atrapalharam a movimentação de pessoas dentro do laboratório, eles poderiam ter uma aproximação lateral, de modo que a movimentação ficasse livre;
- A câmara 2 ficou com um volume interno maior do que o necessário, ela poderia ter sido projetada para se adequar melhor às condições dos ensaios;
- O controle de temperatura poderia ter sido feito de maneira automática utilizando um termostato e um varivolt, por exemplo;
- No evaporador, devido à alta diferença de temperatura, havia formação de gelo externo que, após o desligamento do equipamento, se tornava água e escorria no suporte da bancada que foi feito de madeira. Poderia ter sido desenvolvido um mecanismo de direcionamento e descarte dessa água de modo a não danificar nenhum componente;

6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A influência da temperatura no comportamento mecânico de polímeros sempre foi objeto de estudo de pesquisadores. Nos trabalhos de Karamanlioglu e Alkan (2019), Grasso et al. (2018), Souza (2015), Gonzalez et al. (2009), Freitas (2014), O'Mahony et al. (2020) e Thota (2019), é abordado o efeito da temperatura de

diferentes maneiras em alguma etapa da fabricação do polímero, porém todos concluem que, de modo geral, o aumento da temperatura provoca perdas mecânicas significativas no material estudado.

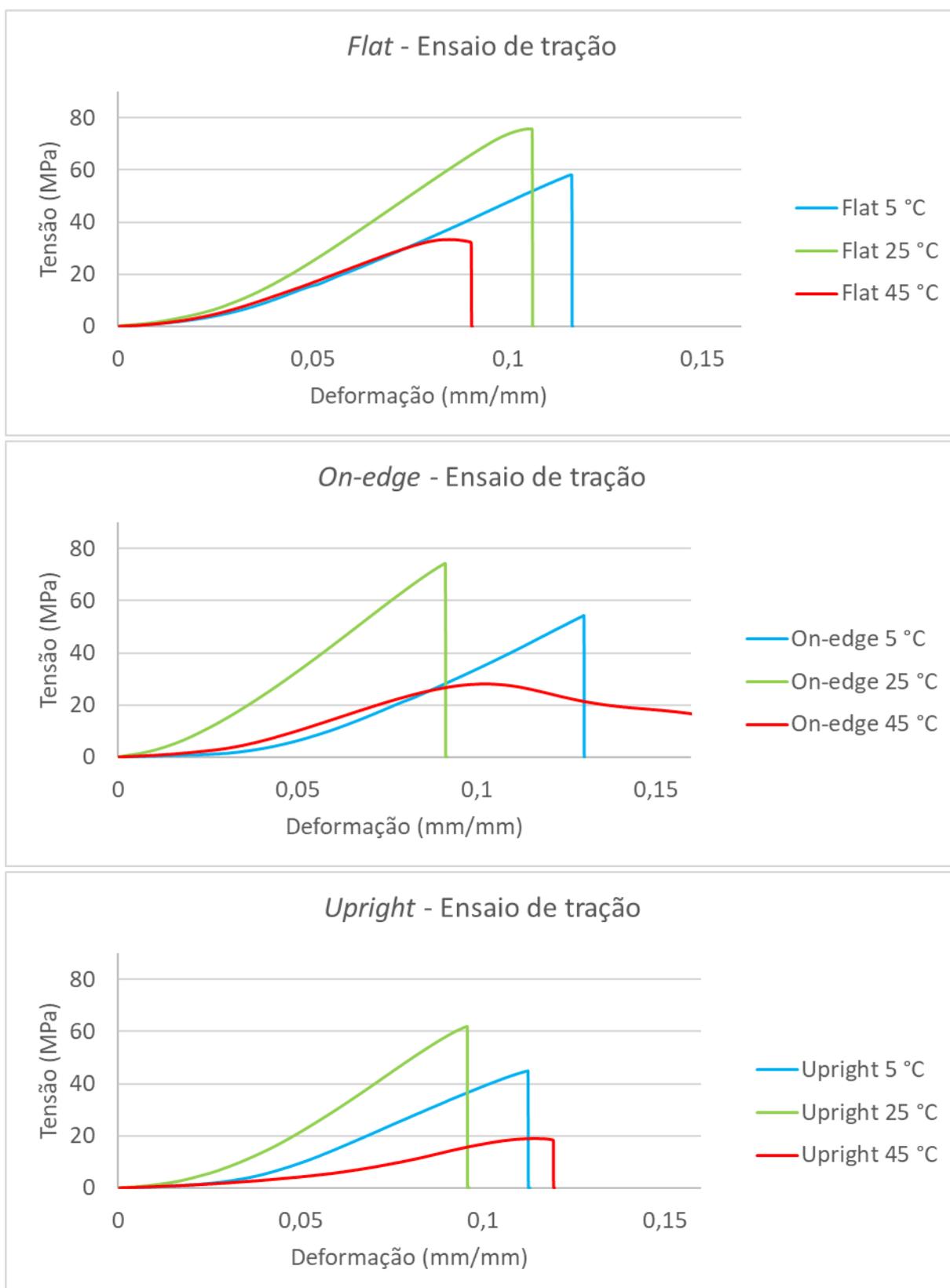
De maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios de tração e de flexão em três pontos sob 3 diferentes temperaturas mostraram que se deve tomar cuidado com a temperatura que a peça de PLA fabricada por impressão 3D estará sujeita na sua aplicação final. Em baixas temperaturas, o PLA se torna mais rígido e apresenta um comportamento frágil, não sendo indicado para peças que não possam sofrer falha catastrófica. Em altas temperaturas, o PLA aumenta sua plasticidade e perde sua resistência, não sendo indicado para peças que suportem altos esforços mecânicos.

Quanto à orientação de construção, conforme já abordado por Chacón et al. (2017), deve-se tomar cuidado com o sentido de aplicação do esforço mecânico em que a peça estará submetida no seu uso final, procurando uma configuração onde a orientação de deposição das camadas esteja paralela ao sentido do carregamento.

6.2.1 Ensaio de tração

Para melhor visualização e comparação do efeito da temperatura, foram plotados gráficos “tensão x deformação” para cada orientação analisada, utilizando curvas que representam o resultado obtido em cada temperatura, conforme mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Gráficos comparando o efeito da temperatura em cada orientação nos ensaios de tração



Fonte: Do autor, 2021

Para a orientação *flat*, houve diferença significativa em todas as propriedades mecânicas analisadas, entre as três temperaturas. As tensões máximas e de escoamento foram maiores nos ensaios realizados a temperatura de 25 °C. A deformação até a tensão máxima e a deformação no limite de escoamento foram maiores nos ensaios à 5 °C. O módulo de elasticidade foi maior nos ensaios à 25 °C. Todas as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de 45 °C foram menores quando comparadas com as outras temperaturas, entrando em concordância com o observado em outros trabalhos (GRASSO et al, 2018; SOUZA, 2015; GONÇALEZ, 2009).

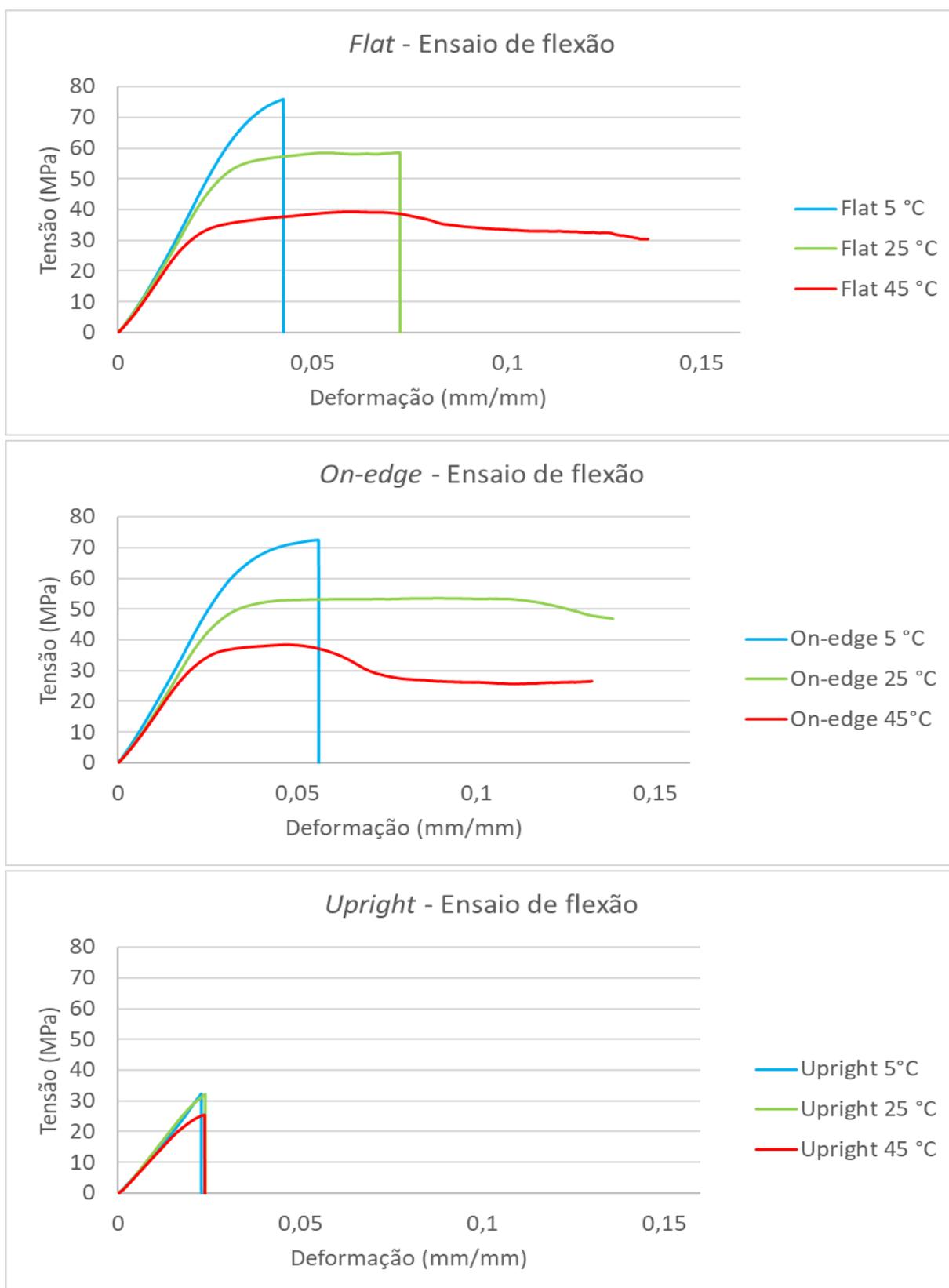
No geral, observou-se a ausência de fase plástica nos corpos de prova ensaiados a 5 °C e 25 °C, e o aumento da plasticidade nos ensaios a 45 °C, devido a proximidade da temperatura de transição vítrea. Sendo assim, quanto mais próximo da temperatura de transição vítrea, maior o ganho de energia e mobilidade das cadeias poliméricas, fazendo com que o material apresente maior plasticidade.

Ainda, observou-se que a resistência à tração para as orientações *flat* e *on-edge* apresentam valores similares, ambos maiores que os valores obtidos para a orientação *upright*, entrando em concordância com os resultados de Chacón et al. (2017).

6.2.2 Ensaio de flexão

Para melhor visualização e comparação do efeito da temperatura, foram plotados gráficos “tensão x deformação” para cada orientação analisada, utilizando curvas que representam o resultado obtido em cada temperatura, conforme mostrado na Figura 46.

Figura 46 – Gráficos comparando o efeito da temperatura em cada orientação nos ensaios de flexão



Fonte: Do autor, 2021

Em particular, para a orientação *upright*, os corpos de prova apresentaram comportamento semelhante independente da temperatura, evidenciado pelas curvas plotadas na Figura 46. Este resultado também entra em concordância com o trabalho de Chacón et al. (2017), onde o autor conclui que a orientação *upright* é aquela que apresenta os menores valores de módulo de elasticidade e resistência à flexão e tração. A causa desse comportamento inferior às outras orientações é que a deposição das camadas na orientação *upright* é perpendicular ao seu comprimento, fazendo com que a carga aplicada seja suportada apenas pela força de adesão entre as camadas, ou seja, as fibras de PLA não auxiliam na resistência do corpo de prova.

Em todas as orientações a tensão máxima, o módulo de elasticidade e a tensão no limite de escoamento apresentaram diferença significativa entre as três temperaturas, sendo que os maiores valores foram obtidos na temperatura de 5 °C. Isso acontece pois, em baixas temperaturas, o PLA se torna mais rígido, aumentando seu módulo de elasticidade e diminuindo a sua plasticidade.

Os resultados dos testes de Tukey para a deformação até a tensão máxima e a deformação no limite de escoamento apontaram, em algumas comparações entre as temperaturas, diferenças não significativas. Porém, no geral, também é possível afirmar que as deformações analisadas foram maiores na temperatura de 5 °C e menores na temperatura de 45 °C. Apesar de não ter sido abordado a deformação total dos corpos de prova, ressalta-se que os corpos ensaiados a 45 °C apresentaram a maior deformação total e não sofreram ruptura devido à maior plasticidade do PLA nesta temperatura, fazendo com que os ensaios tivessem que ser interrompidos. Na temperatura de 25 °C também aconteceu este fenômeno, indicando um comportamento dúctil natural do PLA.

7 CONCLUSÕES

- 1) A temperatura ambiente (ou de serviço) influencia, de forma significativa, o comportamento mecânico do PLA impresso em FFF, em todas as direções de impressão e tanto para tensões de flexão como de tração. De maneira geral, os ensaios realizados a 5 °C mostraram um aumento da resistência e da rigidez, enquanto os ensaios realizados a 45 °C mostraram um aumento da plasticidade e diminuição das propriedades mecânicas. Nos ensaios a 25 °C foi evidenciado um comportamento dúctil intermediário.
- 2) As orientações de construção têm influência direta no comportamento mecânico do PLA, sendo que as orientações *flat* e *on-edge* apresentam um desempenho similar, sendo que a escolha entre as duas deve ser feita por outros fatores não abordados neste trabalho (tempo de impressão, qualidade de acabamento e outros). Devido ao sentido de deposição de camadas em relação ao sentido de aplicação das forças, a orientação *upright* apresentou desempenho mecânico muito inferior, ou seja, deve-se procurar manter o sentido de carregamento paralelo ao sentido de deposição de camadas a fim de obter uma peça com melhores propriedades mecânicas.
- 3) O equipamento construído manteve a temperatura dentro da câmara térmica controlada nos valores escolhidos, porém ele pode ser melhorado para possibilitar ensaios em outros valores de temperatura.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao presente trabalho, sugere-se:

- Fazer uma Microscopia Eletrônica de Varredura para analisar as fraturas e outras propriedades do PLA sob diferentes temperaturas.
- Executar os mesmos testes e análises em outros materiais utilizados em impressão 3D.
- Executar outros tipos de ensaios mecânicos (fadiga, dureza, impacto, abrasão), principalmente em baixas temperaturas.
- Alterar os parâmetros de impressão (velocidade de impressão, espessura da camada, temperatura de impressão, etc) e verificar se sofrem as mesmas influencias com a temperatura ambiente.

REFERÊNCIAS

- 3D PRINTING INDUSTRY (3DPI). **The free beginner's guide**. 3D Printing Industry: 2016. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- 3DFILA. **40 erros mais comuns de impressão 3D que você deve evitar**. 3D Fila: 2020. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/40-erros-mais-comuns-de-impressao-3d-que-voce-deve-evitar/>>. Acesso em 23 fev. 2020.
- 3DHUBS. **FDM 3D printing materials compared**. 3D Hubs: 2017. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/FFF-3d-printing-materials-compared/>>. Acesso em: 23 fev. 2020.
- ABREU, S. A. C. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2015.
- AFINKO. **Filamentos: os 4 mais utilizados e suas características**. Afinko: 2018. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/4-filamentos-mais-utilizados-FFF/>>. Acesso em: 23 fev. 2020.
- AIRBUS. **Airbus tests high-tech concepts with an innovative 3D-printed mini aircraft**. Airbus: 2016. Disponível em: <<https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/06/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft.html>>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- ANDERSON, C. **Makers: A Nova Revolução Industrial**. Tradução Afonso Celso da Cunha Serra. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. Título original: Makers: the new industrial revolution. ISBN 978-85-352-3954-6.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D638-14**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, 2014.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D790-17**: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, 2017.
- AZEVEDO, F.M. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. rev. e amp. São Paulo: Atiliber Editora Ltda., 2006, 280p.
- CARNEIRO, L. R. R., BARBAR, G. D., DOS SANTOS, L. C. P., GUARATO, A. Z. **Influência da temperatura da mesa de impressão 3D na dureza e dimensões geométricas de amostras em ABS**. In: XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Ilhéus, BA, 2019.

CASTANHEIRA, A. T. G. **Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, Mi. A. **Termodinâmica**. 5 ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2006. ISBN 9788586804663.

CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. A.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. **Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling**: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, [s.l.], v. 124, p.143-157, jun. 2017. Elsevier BV.

EMBRACO. **Tabela de aplicação de compressores 50 Hz, 60 Hz, R-134a e Mistura (Blends)**. Santa Catarina: Embraco, 2009.

ELGIN. **Compressores**. São Paulo: Elgin, 2020.

FERNANDES, J. F. M. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2016.

FREITAS, R. L. M. **Efeito da temperatura de resfriamento sobre as propriedades de polímeros amorfos e semicristalinos**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GONÇALEZ, V.; COSTA, M. F.; PASQUALINO, I. S. **Influência da temperatura no comportamento mecânico do polifluoreto de vinilideno**. *In: 10º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS*, Foz do Iguaçu, 2009.

GRASSO, M., AZZOUZ, L., RUIZ-HINCAPIE, P., ZARRELLI, M., REN, G. **Effect of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens**. *Rapid Prototyping Journal*, [S.L.], v. 24, n. 8, p. 1337-1346, 12 nov. 2018. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-04-2017-0055>.

ICON. **New Story and ICON Unveil the First Permitted 3D-Printed Home**. ICON: 2018. Disponível em: <<https://www.iconbuild.com/updates/this-house-can-be-3d-printed-for-cheap>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

IDE CURSOS. **Tecnologia na saúde**: veja como a impressão 3D está sendo utilizada na saúde. Faculdade IDE: 2018. Disponível em: <<https://www.faculdadeide.edu.br/blog/tecnologia-na-saude-veja-como-a-impressao-3d-esta-sendo-utilizada-na-saude/>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

INSTRON. **Environmental Chambers**: 3119-600 Series. Illinois: Instron, 2017.

KARAMANLIOGLU, M.; ALKAN, U. **Influence of time and room temperature on mechanical and thermal degradation of poly(lactic) acid**. *Thermal Science*, [s.l.], v. 23, p. 383-390, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSC181111051K>

KOR ECOLOGIC. **Urbee 2**. Kor Ecologic: 2013. Disponível em: <https://korecologic.com/about/urbee_2/>. Acesso em: 28 ago. 2019.

MARTINELLI, L. C. J. **Introdução às Máquinas Térmicas Refrigeração**. Paraná, 2008. Disponível em: <<http://www.martinelli.eng.br/ebooks.htm>>. Acesso em 08 de setembro de 2020. ISBN: 978-85-908775-0-9.

MARTÍNEZ, G. A. R. **Modelagem e simulação do processo de produção de PLA (poli-ácido láctico) obtido a partir de fontes renováveis para uso biomédico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

MARTINHÃO, N. E. M. **Estudo do impacto de fatores de impressão 3D nas dimensões em peças fabricadas em ABS pela manufatura aditiva Fused Deposition Modelling (FDM)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2019.

MOILANEN, J., VADÉN, T. **Statistical Studies of Peer Production. Another industrial Revolution**. Statistical Studies of Peer Production, 2013.

MOREIRA, R. M. D. **Concepção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2016.

O'MAHONY, C., GKARTZOU, E., HAQ, E.U. et al. **Determination of thermal and thermomechanical properties of biodegradable PLA blends: for additive manufacturing process**. J Therm Anal Calorim 142, 715–722 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09859-6>

PEREIRA, R. B.; MORALES, A. R. **Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto**. Polímeros, São Carlos, v. 24, n. 2, p. 198-202, 2014.

PITÁGORA, H. C.; ARAÚJO, K. V. **Ciclo de vida de patentes: uma análise do cenário global da manufatura aditiva a partir de 2009 e 2014**. Cadernos de Prospecção, Salvador, v. 11, n. 1, p.64-73, jan./mar. 2018.

PORTELA, S. **4 dicas para escolha ideal do filamento para impressora 3D**. Minas Gerais: 3D Lab, 2018. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/como-escolher-o-filamento-para-impressora-3d/>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

PORTO, T. M. S. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

RIBEIRO, G. P. **Caracterização mecânica de estruturas manufaturadas por adição de material termoplástico com diferentes níveis e formas de**

preenchimento. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeroespacial) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

SILVA, G. C.; SILVA, J. V. L. O.; CASTRO, S. B. M. N.; OLIVEIRA, T. P. **Estudo sobre o uso da impressão 3D na construção civil**. In: SEMANA DE ENGENHARIA DO MARANHÃO, 6., São Luís, MA, 2018.

SILVA, M. N. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

SILVEIRA, M. M. **Alternativas para ANOVA e para comparações múltiplas em modelos normalmente distribuídos com fatores fixos que apresentam problema de heterogeneidade de variâncias**. Dissertação (Bacharelado em Estatística) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SOUZA, G. P. S. **Estudo da influência da temperatura e da frequência do carregamento no comportamento da fadiga em flexão de um polipropileno**. 2015. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Universidade de São João del-Rei, São João del-Rei, MG, 2015.

SOUZA, S.A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. São Paulo: Blucher, 1982. 286 p.

SOUZA, T. M. C. G. P.; BOTURA JR, G. **Uso da prototipagem rápida no processo de produção de semijoias como fator de aumento da produtividade e qualidade do produto**. In: 1º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ERGONOMIA APLICADA, p. 1072-1081, São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2357-7592.

SPINACE, M. A. S; DE PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. Quím. Nova, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

THOMSON, I. **Dutch doctors replace woman's skull with 3D-printed plastic copy**. The Register UK: 2014. Disponível em: <https://www.theregister.co.uk/2014/03/29/dutch_doctors_replace_womans_skull_with_3dprinted_plastic_copy/>. Acesso em: 28 ago. 2019.

THOTA, S. **A study of the effect of heat treatment on 3D printed PLA impact strength**. Dissertação (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) – South Dakota State University, South Dakota, 2019.

UFTM. **Manual para apresentação de trabalhos acadêmicos baseado nas normas de documentação da ABNT**. Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Biblioteca Central. 3. ed., Uberaba, MG, 2019.

VAN WIJK, A.; VAN WIJK, I. **3d printing with Biomaterials: Towards a sustainable and circular economy**. Amsterdam: IOS Press, 2015.

VASSOLER, J. M. **Modelos constitutivos variacionais de viscoelasticidade e viscoplasticidade para materiais termoplásticos submetidos a deformações**

finitas. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

APÊNDICES

Nos Apêndices A, B e C estão apresentadas as propriedades geométricas dos corpos de prova utilizados para os ensaios de tração.

Nos Apêndices D, E e F estão apresentadas as propriedades geométricas dos corpos de prova utilizados para os ensaios de flexão.

Nos Apêndices G, H, I e J estão apresentadas as propriedades mecânicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração.

Nos Apêndices K, L, M e N estão apresentadas as propriedades mecânicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão.

Por fim, no Apêndice O é mostrado uma tabela com o custo total aproximado das peças utilizadas para a construção do equipamento.

APÊNDICE A – MASSA DOS CORPOS DE PROVA (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Massa (g) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	12,768	12,779	12,818	12,816	12,467	12,889	12,792	12,642	12,865
2	12,760	12,817	12,865	12,806	12,403	12,878	12,818	12,592	12,898
3	12,775	12,781	12,824	12,805	12,455	12,833	12,831	12,611	12,909
4	12,778	12,780	12,839	12,814	12,437	12,846	12,829	12,604	12,903
5	12,801	12,767	12,812	12,791	12,464	12,855*	12,863	12,631	12,881
Média	12,776	12,785	12,832	12,806	12,445	12,862	12,827	12,616	12,891
Desvio Padrão	0,015	0,019	0,021	0,010	0,026	0,026	0,026	0,020	0,018

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE B – LARGURA DOS CORPOS DE PROVA (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Largura (mm) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	13,08	13,62	13,05	13,19	13,52	13,18	13,00	13,55	13,16
2	13,06	13,63	13,07	13,22	13,53	13,19	13,08	13,55	13,17
3	13,05	13,70	13,06	13,25	13,52	13,23	13,04	13,55	13,11
4	13,09	13,59	13,06	13,16	13,53	13,26	13,13	13,56	13,10
5	13,07	13,65	13,05	13,13	13,53	13,25*	13,13	13,57	13,08
Média	13,07	13,64	13,06	13,19	13,53	13,21	13,08	13,56	13,12
Desvio Padrão	0,02	0,04	0,01	0,05	0,01	0,03	0,06	0,01	0,04

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE C – ESPESSURA DOS CORPOS DE PROVA (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Espessura (mm) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	4,53	4,16	4,21	4,42	4,08	4,21	4,47	3,97	4,11
2	4,46	4,16	4,13	4,30	4,06	4,30	4,50	3,96	4,13
3	4,46	4,12	4,14	4,35	4,09	4,25	4,54	4,00	4,04
4	4,48	4,15	4,13	4,39	4,08	4,27	4,63	3,96	3,96
5	4,51	4,18	4,18	4,42	4,10	4,24*	4,55	3,98	3,99
Média	4,49	4,16	4,16	4,38	4,08	4,26	4,54	3,97	4,05
Desvio Padrão	0,03	0,02	0,04	0,05	0,01	0,04	0,06	0,02	0,08

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE D – MASSA DOS CORPOS DE PROVA (ENSAIO DE FLEXÃO)

Massa (g) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	5,514	5,486	5,530	5,560	5,489	5,445	5,203	5,445	5,467
2	5,487	5,482	5,495	5,528	5,480	5,466	5,223	5,468	5,549
3	5,537	5,497	5,523	5,447	5,466	5,556	5,239	5,507	5,463
4	5,427	5,47	5,482	5,489	5,487	5,499	5,161	5,466	5,544
5	5,593	5,475	5,565	5,452	5,479	5,537	5,148	5,504	5,478
Média	5,512	5,482	5,519	5,495	5,480	5,501	5,195	5,478	5,500
Desvio Padrão	0,061	0,010	0,032	0,049	0,009	0,047	0,039	0,027	0,043

APÊNDICE E – LARGURA DOS CORPOS DE PROVA (ENSAIO DE FLEXÃO)

Largura (mm) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	12,81	13,08	12,84	12,81	12,90	12,83	12,62	12,67	12,76
2	12,79	12,94	12,87	12,81	12,75	12,79	12,68	13,00	12,71
3	12,85	12,88	12,70	12,77	13,16	12,75	12,63	13,10	12,86
4	12,67	13,14	12,85	12,88	12,83	12,82	12,66	13,04	12,75
5	12,81	12,78	12,78	12,82	12,80	12,76	12,66	13,06	12,81
Média	12,79	12,96	12,81	12,82	12,89	12,79	12,65	12,97	12,77
Desvio Padrão	0,07	0,15	0,07	0,04	0,16	0,04	0,02	0,17	0,06

APÊNDICE F – ESPESSURA DOS CORPOS DE PROVA (ENSAIO DE FLEXÃO)

Espessura (mm) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	3,01	3,01	3,08	2,94	3,03	3,06	3,05	3,02	3,05
2	3,10	3,02	3,09	2,90	3,04	3,06	3,07	3,02	3,06
3	2,85	3,02	3,07	2,98	3,01	3,07	3,04	3,03	3,10
4	3,17	3,02	3,05	2,82	3,03	3,06	3,04	3,02	3,07
5	2,87	3,03	3,06	3,07	3,02	3,09	3,05	3,02	3,05
Média	3,00	3,02	3,07	2,94	3,03	3,07	3,05	3,02	3,06
Desvio Padrão	0,14	0,01	0,02	0,09	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02

APÊNDICE G – TENSÃO MÁXIMA (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Tensão Máxima (MPa) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	51,92	55,91	43,79	73,95	79,12	60,09	35,32	30,76	15,66
2	59,75	54,35	44,91	78,49	70,25	63,02	34,74	32,42	18,01
3	55,91	61,44	45,50	75,73	74,25	61,99	36,02	18,03	18,99
4	60,47	53,31	43,77	70,40	77,17	57,12	33,33	28,38	16,94
5	58,16	62,71	45,11	74,88	74,22	33,30*	34,65	28,10	16,16
Média	57,24	57,55	44,62	74,69	75,00	60,55	34,81	27,54	17,15
Desvio Padrão	3,45	4,26	0,79	2,94	3,37	2,59	0,99	5,60	1,36

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE H – DEFORMAÇÃO ATÉ A TENSÃO MÁXIMA (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Deformação até a Tensão Máxima (mm/mm) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	0,099	0,141	0,120	0,105	0,097	0,096	0,084	0,106	0,108
2	0,123	0,130	0,112	0,099	0,089	0,118	0,084	0,103	0,095
3	0,112	0,144	0,144	0,106	0,091	0,096	0,085	0,080	0,113
4	0,119	0,143	0,119	0,094	0,097	0,084	0,084	0,092	0,073
5	0,116	0,158	0,137	0,095	0,091	0,080*	0,092	0,102	0,086
Média	0,114	0,143	0,127	0,100	0,093	0,098	0,086	0,097	0,095
Desvio Padrão	0,009	0,010	0,014	0,005	0,004	0,014	0,004	0,011	0,016

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE I – MÓDULO DE ELASTICIDADE (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Módulo de elasticidade (MPa) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	664,48	571,13	503,37	903,71	1022,60	885,81	570,43	455,05	192,72
2	635,18	606,38	603,22	993,09	983,73	872,87	561,60	505,79	250,46
3	627,24	610,56	536,94	998,03	998,76	896,99	568,64	379,94	252,11
4	643,72	564,83	590,21	972,48	1010,90	866,47	541,56	455,02	326,66
5	631,44	611,73	570,96	984,40	1018,40	651,51*	537,23	437,64	280,45
Média	640,41	592,93	560,94	970,34	1006,88	880,54	555,89	446,69	260,48
Desvio Padrão	14,76	22,97	40,73	38,49	15,79	13,60	15,49	45,19	48,84

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE J – LIMITE DE ESCOAMENTO (ENSAIO DE TRAÇÃO)

Tensão (MPa) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	51,92	55,91	43,79	70,83	78,87	60,09	34,80	29,88	15,66
2	59,75	54,35	43,86	78,02	70,25	63,02	34,52	30,26	17,94
3	55,91	61,44	45,41	74,39	74,25	61,99	35,59	17,28	18,99
4	60,47	53,31	43,25	70,40	77,17	57,12	32,97	26,13	16,94
5	58,16	62,71	44,85	74,23	74,22	33,30*	34,25	25,47	16,16
Média	57,24	57,55	44,23	73,57	74,95	60,55	34,43	25,80	17,14
Desvio Padrão	3,45	4,26	0,88	3,10	3,29	2,59	0,96	5,23	1,35

*Desprezado para os cálculos

Deformação (mm/mm) – Ensaio de tração									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	0,099	0,141	0,120	0,096	0,096	0,096	0,081	0,100	0,108
2	0,123	0,130	0,110	0,097	0,089	0,118	0,082	0,093	0,094
3	0,112	0,144	0,144	0,101	0,091	0,096	0,082	0,073	0,114
4	0,119	0,143	0,118	0,094	0,097	0,084	0,081	0,080	0,073
5	0,116	0,158	0,137	0,093	0,091	0,080*	0,089	0,087	0,086
Média	0,114	0,143	0,125	0,096	0,093	0,098	0,083	0,087	0,095
Desvio Padrão	0,009	0,010	0,014	0,003	0,003	0,014	0,004	0,010	0,017

*Desprezado para os cálculos

APÊNDICE K – TENSÃO MÁXIMA (ENSAIO DE FLEXÃO)

Tensão Máxima (MPa) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	74,40	69,61	36,03	57,37	54,48	27,73	39,74	40,03	26,17
2	75,06	72,35	35,49	56,35	53,23	31,43	39,31	38,41	25,16
3	75,92	70,90	38,67	55,57	51,76	32,19	39,76	37,98	22,11
4	67,88	64,23	32,32	58,52	52,83	30,94	39,48	38,42	26,65
5	76,51	72,52	38,69	56,22	53,56	32,81	38,92	36,80	25,48
Média	73,95	69,92	36,24	56,81	53,17	31,02	39,44	38,33	25,11
Desvio Padrão	3,49	3,39	2,64	1,15	1,00	1,97	0,35	1,16	1,78

APÊNDICE L – DEFORMAÇÃO ATÉ A TENSÃO MÁXIMA (ENSAIO DE FLEXÃO)

Deformação até a Tensão Máxima (mm/mm) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	0,050	0,052	0,024	0,044	0,047	0,020	0,041	0,045	0,023
2	0,054	0,055	0,025	0,046	0,045	0,024	0,043	0,045	0,022
3	0,042	0,055	0,024	0,043	0,048	0,024	0,044	0,040	0,023
4	0,054	0,044	0,023	0,042	0,045	0,023	0,042	0,041	0,023
5	0,046	0,056	0,025	0,045	0,046	0,024	0,045	0,041	0,024
Média	0,049	0,053	0,024	0,044	0,046	0,023	0,043	0,042	0,023
Desvio Padrão	0,005	0,005	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,000

APÊNDICE M – MÓDULO DE ELASTICIDADE (ENSAIO DE FLEXÃO)

Módulo de elasticidade (MPa) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	2228,15	2042,97	1633,69	2047,06	1890,60	1475,27	1777,70	1573,83	1273,88
2	2176,43	2044,10	1511,10	2010,45	1824,63	1495,35	1664,87	1591,38	1302,26
3	2345,88	2037,16	1722,80	2004,41	1838,07	1515,22	1797,05	1575,62	1107,77
4	1969,23	1868,99	1443,27	2104,76	1782,05	1482,35	1726,18	1572,52	1416,18
5	2348,52	2035,74	1715,56	1992,50	1828,20	1557,11	1662,86	1607,46	1269,26
Média	2213,64	2005,79	1605,29	2031,84	1832,71	1505,06	1725,73	1584,16	1273,87
Desvio Padrão	155,73	76,56	124,39	45,57	38,83	32,83	62,14	15,09	110,30

APÊNDICE N – LIMITE DE ESCOAMENTO (ENSAIO DE FLEXÃO)

Tensão (MPa) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	62,94	59,64	36,03	50,32	47,34	27,73	34,42	33,89	25,76
2	65,35	61,28	35,49	49,15	45,93	31,43	32,41	33,29	24,28
3	67,17	60,05	38,67	48,31	45,90	32,19	34,98	33,11	21,20
4	57,35	55,37	32,32	51,30	45,33	30,94	33,60	33,30	25,31
5	67,33	61,46	38,69	49,42	46,00	32,45	32,33	32,59	24,60
Média	64,03	59,56	36,24	49,70	46,10	30,95	33,55	33,24	24,23
Desvio Padrão	4,13	2,47	2,64	1,15	0,74	1,90	1,18	0,46	1,79

Deformação (mm/mm) – Ensaio de flexão									
CDP	5 °C			25 °C			45 °C		
	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>	<i>Flat</i>	<i>On-edge</i>	<i>Upright</i>
1	0,031	0,033	0,024	0,028	0,028	0,020	0,022	0,024	0,022
2	0,033	0,033	0,025	0,028	0,028	0,024	0,021	0,024	0,021
3	0,032	0,032	0,024	0,027	0,029	0,024	0,022	0,024	0,022
4	0,032	0,032	0,023	0,027	0,028	0,023	0,022	0,023	0,020
5	0,033	0,033	0,025	0,028	0,028	0,024	0,021	0,023	0,022
Média	0,032	0,033	0,024	0,028	0,028	0,023	0,022	0,023	0,021
Desvio Padrão	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001

**APÊNDICE O – CUSTO TOTAL APROXIMADO DAS PEÇAS PARA
CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO**

Descrição do equipamento	Quantidade	Preço unitário	Valor
Chapa PVC Expandido 1220 x 2440 mm	1	R\$ 270,00	R\$ 270,00
Compressor Embraco FFI 8,5 HAK	1	R\$ 460,00	R\$ 460,00
Disjuntor bifásico	2	R\$ 20,00	R\$ 40,00
Filtro secador 3/4	1	R\$ 6,00	R\$ 6,00
Joelho 90° Krona DN100	4	R\$ 10,00	R\$ 40,00
Micro motor ventilador 1/40 bivolt	2	R\$ 35,00	R\$ 70,00
Placa de acrílico transparente 38x41x3 mm	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Soprador térmico Vonder STV 2000N	1	R\$ 180,00	R\$ 180,00
Termômetro com display LCD	5	R\$ 17,00	R\$ 85,00
Trocador de calor CDE 2775	2	R\$ 105,00	R\$ 210,00
Tubo capilar 0,42"	3	R\$ 15,00	R\$ 45,00
Tubo de cobre 1/4	3	R\$ 20,00	R\$ 60,00
Tubo de PVC Krona DN100 - 3 metros	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Válvula Schrader 1/4	3	R\$ 5,00	R\$ 15,00
Outros	-	-	R\$ 100,00
VALOR TOTAL			R\$ 1.691,00