

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THAIS FURTADO FERNANDES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DIMENSIONAIS DE
DIFERENTES POLÍMEROS PROCESSADOS PELO MÉTODO FDM**

Blumenau

2022

Thais Furtado Fernandes

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DIMENSIONAIS DE
DIFERENTES POLÍMEROS PROCESSADOS PELO MÉTODO FDM**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro de Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Materiais.

Orientador: Prof, Dr. Leonardo Ulian Lopes
Coorientador: M.Sc Adriano Passini

Blumenau

2022

Ficha de identificação da obra

Fernandes , Thais Furtado
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DIMENSIONAIS DE
DIFERENTES POLÍMEROS PROCESSADOS PELO MÉTODO FDM / Thais
Furtado Fernandes ; orientador, Leonardo Ulian Lopes ,
coorientador, Adriano Passini, 2022.
109 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Engenharia de Materiais.
3. Impressão 3D. I. Ulian Lopes , Leonardo . II. Passini,
Adriano. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

Thais Furtado Fernandes

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DIMENSIONAIS DE
DIFERENTES POLÍMEROS PROCESSADOS PELO MÉTODO FDM**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira de Materiais” e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Materiais

Blumenau, 26 de julho de 2022.

Thais Furtado Fernandes

Graduanda

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina - Blumenau

Banca Examinadora:

Prof. Dr., Leonardo Ulian Lopes
Orientador(a)
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina - Blumenau

Prof. Dr., Johnny de Nardi Martins
Avaliador
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina - Blumenau

Prof. Dr., Claudio Michel Poffo
Avaliador
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina - Blumenau

Este trabalho é dedicado a pessoa que eu mais amo no mundo,
Ana Beatriz Furtado dos Anjos, que sempre foi minha maior fonte
de força para ir em busca do melhor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus por toda a força e conhecimento nessa trajetória.

Ao meu querido pai, por todo esforço, amor e apoio que me deu durante todos estes anos. Essa conquista também é dele.

À minhas irmãs que foram fonte de inspiração e força para a realização desta jornada.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelos anos de aprendizagem e pelos amigos colecionados.

À Embraer pelo apoio e aprendizado concebido

Ao meu orientador pelo apoio e ensinamentos.

Ao meu coorientador e amigo, Adriano Passini, pelo apoio, força e conhecimento passados diariamente.

Ao time da Manufatura Ágil da Embraer por viabilizar todos os processos necessários para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Caio, Ghabriell e Larissa por me apoiarem em toda a jornada da graduação e me ajudando a ser cada vez melhor.

Ao meu amigo Renan pela paciência, ajuda e incentivo durante a realização deste trabalho.

RESUMO

A manufatura aditiva vem se tornando uma técnica potencializadora e capacitadora quando integrada na linha de produção, na qual sabe-se que um dos pilares da Indústria 4.0 é o uso de manufatura aditiva para impressão 3D. Uma das técnicas mais versáteis para a manufatura aditiva de peças poliméricas é a Fused Deposition Modeling, esse processo é caracterizado por depositar o material fundido em forma de filamento, onde em um bico calibrado utiliza-se temperaturas superiores à de fusão do material, tornando possível realizar a extrusão do material. A formação do objeto desejado consiste em sobrepor camadas de filamentos fundidos até obter a geometria desejada. Essa técnica tem se popularizado ao longo dos anos devido à sua versatilidade e relativo baixo custo, no entanto, a falta de normas e orientações específicas para os parâmetros de processamento acabam impondo uma certa dificuldade quanto ao uso dessa tecnologia em relação à reprodutibilidade das propriedades. Paralelamente, novos materiais são inseridos no mercado para aplicação deste tipo de técnica, tornando cada vez mais necessário o desenvolvimento de estudos para fornecer dados técnicos aos utilizadores. Este trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade dimensional e o comportamento mecânico de amostras impressas pelas impressoras Stratasys Fortus 450mc, GTMax Core GT4 E GTMax Core GT5 com filamentos à base de ABS, Policarbonato, Copoliéster e Polieterimida (PEI). Dentre as amostras impressas pela Stratasys, foram definidos diferentes parâmetros quanto à percentual de preenchimento da peça, já as amostras impressas pela GTMax Core GT4 foram alternadas parâmetros como a percentual de preenchimento e a temperatura de mesa, pois a impressora oferece essa possibilidade. Em relação ao comparativo entre as propriedades dimensionais das amostras impressas na Stratasys Fortus 450mc de ABS M30 e Polieterimida (PEI) foi constatado que o Polieterimida (PEI) tem maior estabilidade dimensional e apresenta uma menor variância em relação ao modelo CAD projetado. Devido às características da técnica de fabricação, as medidas obtidas na direção da espessura das amostras apresentaram maior variação em relação às medidas da largura da área de seção reduzida. Já em relação ao comparativo entre as propriedades mecânicas do material, as amostras de ABS M30 impressas pela Stratasys Fortus 450mc apresentaram valores superiores de limite de resistência em relação aos resultados obtidos das amostras de filamento de Polieterimida (PEI), diferentemente do previsto pelos fabricantes do filamento. Já as amostras impressas pela GTMax Core GT5 apresentaram dependência das propriedades mecânicas quando variadas a percentual de preenchimento e temperatura de mesa. Para as amostras impressas nessa impressora com filamento de ABS Premium os resultados se mostraram variar conforme a percentual de preenchimento e a temperatura de mesa, diferentemente dos resultados obtidos para o Policarbonato e o Copoliéster, foi encontrada pouca influência da variação da temperatura de mesa. As amostras impressas com filamento de policarbonato impressos na GTMax Core GT5 percebe-se que houve uma variação, onde todos os dados obtidos pela impressora GTMax Core GT5 se apresentaram inferiores.

Palavras-Chave: Impressão 3D, FDM, Manufatura Aditiva

ABSTRACT

The additive manufacturing has become a powerful technique when integrated to the shop floor. In addition, it is known that one of the pillars from industry 4.0 is the use of additive manufacturing for 3D printing. One of the most versatile techniques for additive manufacturing of polymeric parts is FDM. This process is characterized by depositing the molten material in filament form, where a calibrated nozzle uses temperatures higher than the melting point of the material, making it possible to extrude the material. The formation of the desired object consists of superimposing layers of fused filaments until obtaining the required geometry. This technique has become popular over the years due to its versatility and relatively low cost, however, the lack of specific norms for the processing parameters end up imposing a certain difficulty regarding the use of this technology in relation to the replication of properties. At the same time, new materials are introduced in the market for the application of this technique, making it necessary the development of studies to provide technical information to users. This work aims to evaluate the dimensional stability and mechanical behavior of samples printed by Stratasys Fortus 450mc, GTMax Core GT4 and GTMax Core GT5 printers with filaments based on ABS, Polycarbonate, Copolyester and Polyetherimide. Among the samples printed by Stratasys, different parameters were defined regarding the density of the piece. The samples printed by GTMax Core GT4 have switched parameters such as fill density and table temperature as the printer offers this possibility. With different aspects to be defined, it is necessary to control the process in order to achieve reproducibility in order to achieve the desired properties for a project. Regarding the comparison between the dimensional properties of the samples printed on Stratasys Fortus 450mc of ABS M30 and Polyetherimide (PEI), it was found that PEI has greater dimensional stability and lower variance in relation to the designed CAD model. It is known that the measurements obtained from the thickness of the samples presented bigger variation in relation to the measurements of the width of the reduced section area and CAD design. Regarding the comparison between mechanical properties of the material, the ABS M30 samples printed by Stratasys Fortus 450mc showed higher values in relation to the results obtained from the PEI filament samples, different from that indicated by the data sheet. On the other hand, samples printed by GTMax Core GT5 showed a behavioral variation in relation to density and table temperature changes. The samples showed different levels of interactions between the selected printing parameters. For samples printed with ABS Premium filament, results varied based on density and table temperature. Unlike the results

obtained for Polycarbonate and Co-polyester, these samples showed that their results have a greater influence on the fill density than on the table temperature. In the samples printed with polycarbonate filament using the GTMax Core GT5, it was noticed that there was a variation, where all the data obtained by the printer were inferior.

Keywords: 3D Printing, FDM, Additive Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de uma molécula de polietileno da unidade repetida e das estruturas da cadeia.....	18
Figura 2: Estado amorfo, indicado na região azul e estado cristalino na região em vermelho.	19
Figura 3: Dois tipos de deslizamento cristalográfico. a) deslizamento de cadeia e b) deslizamento transverso. As setas indicam a movimentação da cadeia.	21
Figura 4: Estiramento a frio de um polímero linear com um pequeno aumento da tensão.....	22
Figura 5: Representações esquemáticas dos copolímeros.....	22
Figura 6: Exemplos de aplicação de polímeros termoplásticos.	23
Figura 7: Curva tensão-deformação esquemática para um polímero, mostrando como são determinados os limites de escoamento e de resistência à tração e ao lado Curva tensão-deformação esquemática em tração para um polímero semicristalino.	24
Figura 8: Módulo Secante e Modulo tangencial de um material não linear.....	25
Figura 9: Curvas de tensão-deformação de tração para termorrígidos e termoplásticos	26
Figura 10: Monômeros constituídos na composição química de ABS.	26
Figura 11: Unidade repetitiva do Policarbonato.....	27
Figura 12: Estrutura química do monômero da PEI ULTEM®.....	29
Figura 13: Processo de manufatura aditiva.	30
Figura 14: Processo FDM.....	32
Figura 15: Distribuição de temperatura e formato do filamento depositado durante a deposição da primeira camada na modelagem de deposição por extrusão de material.....	34
Figura 16: Estágio intermediário de deposição da segunda camada mostrando a distribuição de temperatura na modelagem de extrusão do material.....	35
Figura 17: Geometria e malha antes da simulação de tensão residual e empenamento de duas camadas de filamentos.....	35
Figura 18: Tensão residual em estado estacionário (esquerda) e empenamento/deformação (direita) resulta da simulação em material.	36
Figura 19: Sistema de Extrusora ON-Head (a) e OFF-Head (b).....	36
Figura 20: Esquema de uma extrusora de material duplo.	37

Figura 21: SeeMeCNC Rostock MAX v3.2 tridimensional.....	38
Figura 22: Rugosidade de amostras impressas com diferentes alturas de camadas... 39	39
Figura 23: diferentes orientações para o processamento de um mesmo material.	40
Figura 24: Relação entre o tempo para produção, entre a quantidade de material necessário para o modelo 3D e a relação de uso de materiais para o suporte	40
Figura 25: micrografia de diferentes valores de percentual de preenchimento para a amostra de policarbonato.....	41
Figura 26: Efeito da Temperatura de Extrusão na Ligação Entre Camadas	42
Figura 27: diferentes Toolpath	43
Figura 28: Dilatação do material devido a matriz.	43
Figura 29: distorção causada pela dilatação do material na matriz.	44
Figura 30: diferentes temperaturas em um processo de fabricação 3D.....	45
Figura 31: Tensão residual em uma materia sobre aquecimento.	45
Figura 32: Amostra de Polieterimida (PEI) à.....	45
Figura 33: Amostra de Polieterimida (PEI) à esquerda e ABS GTMax Core GT4 empenada.....	46
Figura 34: modelo de impressora 3D GTMax Core GT4 / GT5.....	46
Figura 35: Esquematização da impressora GTMax Core GT4/GT5.....	47
Figura 36: Processo de fabricação de uma peça na impressora 3D GTMax.....	47
Figura 37: Funções nos display LCD das impressoras GTMax.....	48
Figura 38: Peça impressa pela GTMax Core GT4	48
Figura 39: modelo de impressora 3D Stratatsys Fortus 450mc.....	49
Figura 40: Exemplo de Protótipo desenvolvido pela impressora 3D Stratasys Fortus 450mc	50
Figura 41: Esquematização dos componentes da impressora 3D Stratasys Fortus 450mc	50
Figura 42: Esquematização da câmara de impressão da Stratasys Fortus 450mc.....	51
Figura 43:Lista de materiais compatíveis com a Impressora Stratasys Fortus 450mc.....	51
Figura 44: Exemplos de peças impressas com Filamento de ABS	54
Figura 45: orientações utilizadas para impressão.....	54
Figura 46: Peças impressas com filamento de Polieterimida.....	57
Figura 47: Dimensões das amostras conforme a norma (ASTM D638).	58
Figura 48: Modelo CAD.....	59
Figura 49: esquematização de pontos para coleta de dados de amostras impressas. .	59

Figura 50: Fluxograma de atividades desenvolvidas para obtenção de medidas ...	61
Figura 51: disposição das amostras na camara de impressão.....	62
Figura 52: a máquina de modelo EMIC DL10000 para a realização dos Ensaio de Tração	62
Figura 53: Gráfico para obtenção de dados.....	64
Figura 54: Esquematização de parametros selecionado para a obtenção de amostras construídas com a Stratasys.....	64
Figura 55: Esquematização de parametros selecionado para a obtenção de amostras construídas com a GTMax3D.....	65
Figura 56: Esquematização de parâmetros selecionado para a obtenção de amostras construídas com a GT5.....	66
Figura 57: Distribuição Gaussiana – medidas do tipo B das amostras construídas com filamento de ABS M30 e Polietereimida (PEI).....	67
Figura 58: Distribuição Gaussiana – medidas do tipo A das amostras construídas com filamento de ABS M30 e Polietereimida (PEI).....	67
Figura 59: Distribuição Gaussiana das amostras de ABS M30 e Polietereimida (PEI) agrupada por percentual de preenchimento	69
Figura 60: Distribuição Gaussiana das amostras de ABS M30 e Polietereimida (PEI) agrupada por percentual de preenchimento do tipo B	70
Figura 61: Gráfico de Tensão x Deformação de corpos de prova de filamento ABS M-30.....	71
Figura 62: Gráfico de Tensão x Deformação de corpos de prova de filamento POLIETERIMIDA (PEI).....	72
Figura 63: Modo de fraturas das demais fraturas, CDP01 e CDP15.....	73
Figura 64: gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 80% de percentual de preenchimento	75
Figura 65: Gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 100% de percentual de preenchimento.....	76
Figura 66: gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 80% de percentual de preenchimento.....	77
Figura 67: Gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 100% de percentual de preenchimento.....	78

Figura 68: gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 80% de percentual de preenchimento.....	79
Figura 69: Gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 100% de percentual de preenchimento.....	80
Figura 70: Gráfico de tensão e deformação das amostras de Policarbonato construídas na GTMax Core GT5.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação percentual de monômeros do ABS.	27
Tabela 2: Propriedades gerais do policarbonato.....	28
Tabela 3: Vantagens e desvantagens do uso da manufatura aditiva.....	31
Tabela 4: ABS M30 – Propriedades intrínsecas.....	54
Tabela 5: ABS Premium – Propriedades e propriedades de processo.	55
Tabela 6: Policarbonato – Propriedades intrínsecas.....	56
Tabela 7: Média e desvio padrão de cada material	66
Tabela 8: média e desvio padrão das medidas do tipo A obtidas pelas amostras de ABS M30 e POLIETERIMIDA (PEI)	68
Tabela 9: média e desvio padrão das medidas do tipo B obtidas pelas amostras de ABS M30 e POLIETERIMIDA (PEI)	69
Tabela 10: Média e desvio padrão das amostras com filamento de ABS M-30	71
Tabela 11: Comparativo entre os resultados obtidos das amostras com 100% de percentual de preenchimento e Datasheet	72
Tabela 12: Propriedade Mecânica dos filamentos de POLIETERIMIDA (PEI)	72
Tabela 13: Comparativo entre os resultados obtidos das amostras com 100% de percentual de preenchimento e Datasheet	74
Tabela 14: Médias obtidos das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 80% de percentual de preenchimento	75
Tabela 15: Médias obtidos das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 100% de percentual de preenchimento	76
Tabela 16: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 80% de percentual de preenchimento	77
Tabela 17: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 100% de percentual de preenchimento	77
Tabela 18: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 80% de percentual de preenchimento	79
Tabela 19: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 100% de percentual de preenchimento	80
Tabela 20: Resultados obtidos das médias das amostras impressas com filamento de Policarbonato com a Temperatura de Mesa igual a 110 °C.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS - Acrilonitrila-butadieno-estireno
ASA - Acrilonitrila estireno e acrilato
ASTM - American Society for Testing and Materials
CAD - Computer Aided Design
CDP - Corpo de prova
DSC - Differential scanning calorimetry
FDM - Fused Deposition Modeling
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MA - Manufatura aditiva
PC - Policarbonato
PETG - Polietileno tereftalato glicol
PEI – Polietierimida
PLA - Poli ácido láctico
PP - Polipropileno
Tc - Temperatura de cristalização
Tg - Temperatura de transição vítrea
Tm - Temperatura de fusão cristalina
TMA - Thermomechanical Analysis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	MATERIAIS POLIMÉRICOS.....	18
2.2	MECANISMO DE DEFORMAÇÃO DE UM POLÍMERO.....	20
2.3	HOMOPOLÍMERO, COPOLÍMERO E TERPOLÍMERO.....	22
2.4	TERMOPLÁSTICOS.....	23
2.5	COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	23
2.6	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	24
2.7	POLÍMEROS DE ENGENHARIA.....	26
2.8	MANUFATURA ADITIVA.....	29
2.9	MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA.....	32
2.9.1	Parâmetros que influenciam a qualidade do projeto.....	38
2.9.2	Impressoras FDM.....	46
3	METODOLOGIA.....	53
3.1	MATERIAIS.....	53
3.2	AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECANICAS EM DIFERENTES MÁQUINAS E DIFERENTES POLIMEROS.....	58
3.2.1	Análise de medidas das amostras de ABS M30 e de Polieterimida (PEI).....	60
3.2.2	Análise da influência da percentual de preenchimento.....	60
3.3	AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECANICAS EM DIFERENTES MÁQUINAS E DIFERENTES POLIMEROS.....	61
3.3.1	Comparação entre as amostras de filamentos de ABS M30 e Polieterimida (PEI) na impressora Stratasys Fortus 450mc.....	64

3.3.2	Comparação entre as amostras de filamento de ABS Premium, Policarbonato e Copoliéster impressas pela GTMax Core GT4	65
3.3.3	Comparação entre as amostras de filamento de Policarbonato pela GTMax Core GT5	65
4	RESULTADOS	66
4.1	AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DAS AMOSTRAS IMPRESSAS PELA STRATASYS FORTUS 450MC	66
4.1.1	Análise de medidas das amostras de ABS M30 e de Polietirimida (PEI).....	66
4.1.2	Análise da influência da percentual de preenchimento	68
4.2	AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECANICAS EM DIFERENTES MÁQUINAS E DIFERENTES POLIMEROS	70
4.2.1	Comparação entre as amostras de filamentos de ABS M30 e Polietirimida (PEI) na impressora Stratasys Fortus 450mc	70
4.2.2	Comparação entre as amostras de filamento de ABS Premium, Policarbonato e Copoliéster impressas pela GTMax Core GT4	74
4.2.3	Comparação entre as amostras de filamento de Policarbonato impressas pela GTMax Core GT5	81
5	CONCLUSÃO.....	83
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICES	88

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, processos para a rápida prototipagem vem ganhando cada vez mais destaque. Conhecido como manufatura aditiva, o desenvolvimento de objetos do zero ou semi-acabados em tempo reduzido é possível em virtude de recentes tecnologias, bem como, melhoria de processos (VAYRE, et al., 2012). Conforme a ASTM (2012), a definição de manufatura aditiva é dada como o conjunto de tecnologias capazes de agregar materiais afim de produzir componentes a partir de modelos 3D, convencionalmente, produzidos pela deposição de camada sobre camada de material. Desta forma, diferente do processo tradicional de produção de materiais, a MA possui vasta flexibilidade para reprodução de geometrias (JEFFERSON et al., 2021).

Na indústria aeroespacial a manufatura aditiva vem trazendo grandes contribuições para todo o segmento, seja em aeronaves comerciais, militares ou espaciais, como também, inovações para sistemas de mísseis. Isto se deve justamente por vantagens oferecidas pela manufatura aditiva, como produção de projetos complexos, baixo custo, redução dos níveis de desperdícios, produção de peças com materiais de alta performance e curto tempo de manufatura (NAJMON, et al., 2019).

Basicamente, a manufatura aditiva é dividida em sete processos principais: jato de ligantes (*binder jetting, BJ*), deposição direta de energia (*directed energy deposition, DEB*), jato de material (*material jetting, MJ*), extrusão de material (*material extrusion, ME*), fusão em leito de pó (*powder bed fusion, PBF*), laminação em folhas (*sheet lamination, SL*), cubo de fotopolimerização (*vat photopolymerization, VP*), conforme citado por Altparmak e Xiao (2021). Nos diferentes processos diversos podem ser os metais e polímeros, utilizados como material precursor para a manufatura aditiva.

O processo de fabricação utilizado nesse trabalho é o processo de Fused Deposition Modeling (FDM) por depositar o material fundido em forma de filamento, onde em um bico calibrado utiliza-se temperaturas superiores à de fusão do material, tornando possível realizar a extrusão do material. Desse modo, através do bico calibrado o material é depositado sobre uma mesa, e assim a formação do objeto desejado consiste em sobrepor camadas de filamentos fundidos até obter a geometria desejada (CUNICO, 2015)

Dentre os quais, polímeros destacam-se como materiais promissores para a produção de componentes, sendo aplicados em suas mais variadas formas e composições (ALTIPARMAK, et al., 2021). Assim, pode-se citar como principais materiais poliméricos

empregados na manufatura aditiva termoplásticos como acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), poli (ácido láctico) (PLA), poliamida (PA 6 e PA 6.6), polipropileno (PP), entre outros (YASA, et al., 2018).

A literatura indica que para assegurar a qualidade e performance final do produto da manufatura aditiva, alguns parâmetros de processo são fundamentais. Como por exemplo, cita-se o diâmetro do bocal, temperatura do envelope, espessura da camada, temperatura de extrusão, tamanho da partícula de enchimento, velocidade de extrusão, além de outros fatores que podem impactar as propriedades do material em desenvolvimento (LIU *et al.*, 2021; MOHAN *et al.*, 2017; YASA e ERSOY, 2018). Soma-se a esse fato que diferentes equipamentos dão ao usuário maior ou menor liberdade na determinação desses parâmetros de processamento, o que limita a capacidade de otimizar as propriedades mecânicas e dimensionais das peças produzidas.

Neste sentido, o presente trabalho visa prover informações de processamento essenciais para fabricação de ferramentais utilizados no setor aeroespacial através da manufatura aditiva tipo FDM. Nessa aplicação, a capacidade de atingir as propriedades mecânicas estabelecidas pelo fabricante do filamento e a garantia da precisão dimensional são essenciais para que o ferramental fabricado via manufatura aditiva desempenhe suas funções adequadamente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos parâmetros de processamento de impressão 3D por FDM nas propriedades mecânicas e nas propriedades dimensionais, utilizando diferentes polímeros e diferentes equipamentos de impressão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a estabilidade dimensional das amostras impressas pela Stratasys Fortus 450mc obtidas a partir de filamento de ABS e Polieterimida.
- Avaliar a influência do percentual de preenchimento nas propriedades mecânicas para as amostras impressas pela Stratasys Fortus 450 obtidas a partir de filamento de ABS e Polieterimida;
- Avaliar a influência da temperatura de mesa e percentual de preenchimento nas propriedades mecânicas das amostras impressas pela GTMax Core GT4 obtidas a partir de filamentos de ABS, Policarbonato e Copoliéster.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

O polímero é considerado um material orgânico ou inorgânico de alta massa molar, a qual pode variar de dez mil a dez milhões de ordens, cuja estrutura consiste na repetição dessas pequenas unidades. A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Desse modo, um polímero é uma macromolécula constituída por dezenas de milhares de unidades de repetição denominadas meros, as quais são ligadas por ligação covalente (**Canevarolo, 2002**).

A matéria-prima do polímero é dada pela unidade de repetição, a qual denominamos monômero e é destacada na Figura 1. As cadeias poliméricas podem apresentar variação quanto à forma como os meros se repetem ao longo da cadeia, essas variações afetam diretamente nos comportamentos físico e físico-químico.

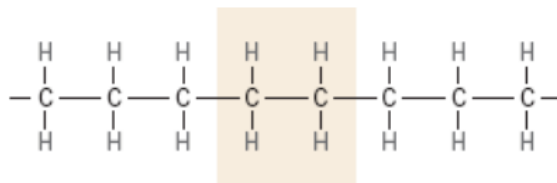


Figura 1: Representação de uma molécula de polietileno da unidade repetida e das estruturas da cadeia.

As propriedades intrínsecas dos materiais poliméricos são definidas a partir do monômero presente na estrutura e do tipo de ligação covalente estabelecida, a partir desses parâmetros pode-se dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras. A classe de materiais plásticos indica os materiais poliméricos de alta massa molar, sólido como produto acabado e que pode ser subdividido em Termoplásticos e Termofixos, as quais veremos as definições a diante. A borracha são os materiais que se comportam como elastômeros naturais ou sintéticos. Já as fibras são os materiais termoplástico pré-orientados com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal e deve satisfazer a condição geométrica de o comprimento ser, no mínimo, cem vezes maior que o diâmetro (**Canevarolo, 2002**).

Cada classe de material se difere das demais devido seu conjunto específico de propriedades. As propriedades dependem de um conjunto de parâmetros sobre a molécula polimérica, sendo um deles o comprimento da massa molar. Como os polímeros normalmente envolvem uma larga faixa de valores de massa molar, existe uma grande variação em suas propriedades, as pequenas alterações no tamanho da molécula provocam grandes mudanças nas

suas propriedades físicas. Estas alterações produzem comercialmente vários tipos de polímeros para atender as necessidades particulares de uma dada aplicação ou técnica de processamento. (Callister, 2018)

O que acontece de fato é que essa distribuição de massa molar afeta as propriedades físicas, pois as moléculas menores interrompem as interações intermoleculares, diminuindo a coesão e, conseqüentemente, a resistência. Essas moléculas menores acabam plastificando o sistema, ou seja, interrompe as interações intermoleculares e podem ser desejadas ou indesejadas.

Além dos parâmetros mencionados, as moléculas de polímeros podem assumir disposições variadas no espaço, provenientes da possibilidade de rotação dos átomos em torno de ligação covalentes. O termo configuração refere-se ao arranjo proveniente das ligações químicas, enquanto a conformação se origina da rotação em torno de ligações covalentes. As diferentes conformações afetam amplamente as propriedades físicas de um polímero, dando origem a estados amorfos e cristalinos, evidenciados na Figura 2. O estado amorfo mostra uma configuração de enovelados ao acaso, sem regularidade espacial e estado cristalino são regiões de registros periódicos de ordenação espacial. (Akcelrud, 2007)

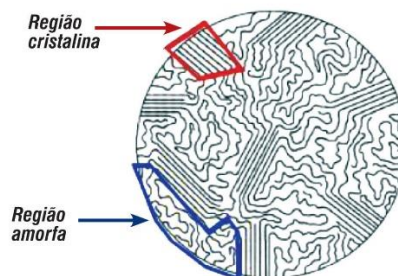


Figura 2: Estado amorfo, indicado na região azul e estado cristalino na região em vermelho.

Para se passar de uma configuração para outra, é necessário quebrar ligações, mover substituintes e formar novas ligações. A configuração não se altera com a rotação em torno de ligações originando diferentes conformações, mas a estabilidade das diferentes conformações pode ser afetada pela macromolécula. À medida que a temperatura aumenta, as moléculas adquirem energia o suficiente para romper as ligações intermoleculares, desse modo, quanto mais flexíveis forem as cadeias do polímero, mais facilmente adquirirão mobilidade translacional, iniciando o deslizamento de umas sobre as outras. O limite para a degradação

térmica situa-se no ponto em que as vibrações atingissem amplitudes que rompem as ligações interatômicas. (Akcelrud, 2007)

2.2 MECANISMO DE DEFORMAÇÃO DE UM POLÍMERO

O mecanismo de deformação de um polímero está diretamente ligado com seu grau de cristalinidade. A cristalinidade afeta diretamente o módulo de elasticidade, a resistência ao escoamento e a dureza do material, quanto maior o grau de cristalinidade de um polímero, maiores serão as propriedades mecânicas destes (Canevarolo, 2002).

A deformação de polímeros semicristalinos é o resultado da soma das deformações de cada um dos seus constituintes, fases amorfa e cristalina, e suas interações. Para a deformação que acontece na região amorfa pode-se encontrar dois mecanismos, o deslizamento entre lamelas (interlamelar), e o de separação interlamelar. (YOUNG, 1974).

1. Deslizamento Interlamelar

Este mecanismo de deformação ocorre quando há o cisalhamento de lamelas paralelas entre si. Este é um mecanismo que acontece facilmente quando os polímeros estão em uma temperatura acima da T_g. A porção reversível na deformação dos polímeros é devido ao deslizamento interlamelar. Como resultado das partes cristalinas e amorfas estarem interconectadas, durante a deformação as cadeias entrelaçadas, os cristais e as moléculas de amarração são estendidos (BARTZAK, 2010). A Figura 4.a ilustram o processo de deslizamento interlamelar.

2. Separação Interlamelar

Para este mecanismo de deformação ocorrer necessita de uma componente de tensão trativa perpendicular à superfície da lamela. Este mecanismo não ocorre a volume constante, sendo fonte de cavitação e crazes na região amorfa entre lamelas nos polímeros semicristalinos. Desse modo, este mecanismo depende da quantidade e comprimento das cadeias na região amorfa e da espessura da lamela (G'SELL, 1994).

Ambos os mecanismos irão atuar continuamente durante a deformação do polímero, progressivamente orientando a região amorfa na direção da tensão aplicada. Entretanto, estes processos são restringidos pela limitação de movimentação imposta pelas lamelas aos espaços interlamelares e pela extensão reduzida das cadeias altamente emaranhadas. Esta limitação leva a dois cenários distintos: (ADDIEGO et al., 2006)

- **Ativação dos mecanismos de deformação irreversível da região cristalina;**
- **Há a possibilidade da formação de pequenos vazios nas regiões amorfas.**

Diante deste cenário, polímeros com maior grau de cristalinidade sofrem mais cavitação intensa durante ensaios de tração, enquanto em polímeros com menor grau de cristalinidade sofrem menor grau de cavitação.

O modo de deslizamento dos polímeros é diferente dos metais porque é restrita pela estrutura das cadeias poliméricas, sabe-se que os deslizamentos não são capazes de romper as ligações poliméricas (as ligações C-C), o que mantém a simetria da rede e impõe que os deslizamentos sejam possíveis em planos que são paralelos ao eixo da cadeia polimérica. Desse modo, existem dois métodos possíveis: deslizamento de cadeia (na direção do eixo da cadeia – indicado na Figura 3-a e o deslizamento transverso (normal ao eixo da cadeia – indicado na Figura 3-b).

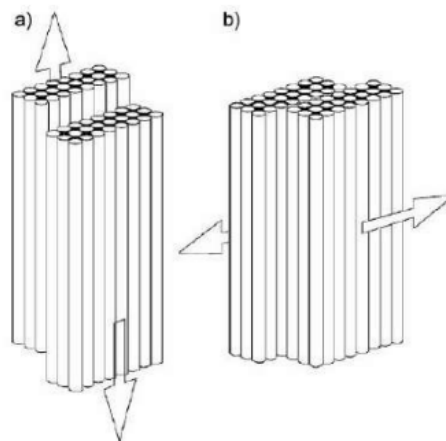


Figura 3: Dois tipos de deslizamento cristalográfico. a) deslizamento de cadeia e b) deslizamento transverso. As setas indicam a movimentação da cadeia.

Desse modo, o processo de ensaio de tração é esquematizado em relação a cristalinidade na Figura 4, onde nota-se que as cadeias inicialmente emaranhadas (sem aplicação da carga) se desenrolam com a aplicação da carga, endireitando-se e alinhando-se na direção do carregamento. Esse processo é inicialmente localizado, produzindo uma estrição no corpo de prova, seguido da propagação desta estrição pelo corpo de prova até que todo o material esteja com suas cadeias estiradas e alinhadas ao eixo de aplicação da carga. Em seguida observa-se a fratura da amostra.

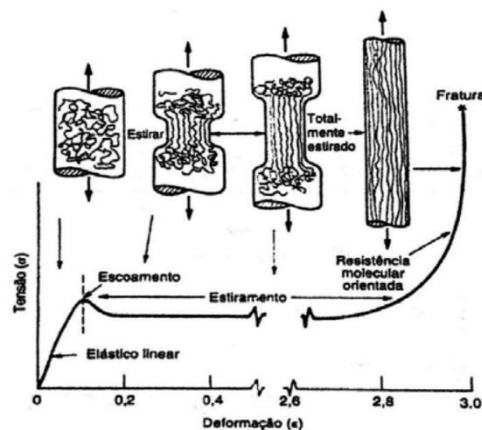


Figura 4: Estiramento a frio de um polímero linear com um pequeno aumento da tensão.

2.3 HOMOPOLÍMERO, COPOLÍMERO E TERPOLÍMERO

Com o desenvolvimento da ciência dos materiais novos polímeros foram surgindo com o propósito de ser fácil e economicamente sintetizados e fabricados, ter melhores combinações de propriedades e maior gama de aplicação. Dessa forma, os copolímeros e terpolímeros foram criados afim de aumentar as combinações entre os materiais poliméricos. (Callister, 2018)

Como discutido anteriormente, os polímeros têm como base sua unidade de repetição, aqueles que em sua estrutura constituir apenas um tipo de mero são classificados como homopolímeros.

Os copolímeros são polímeros compostos por duas unidades de repetição com diferentes sequencias de arranjos das unidades repetidas ao longo das cadeias poliméricas, como indicado na Figura 5. Um copolímero pode ser classificado como: aleatório (a), alternado (b), bloco (c) e enxertado (d) (Callister, 2018).

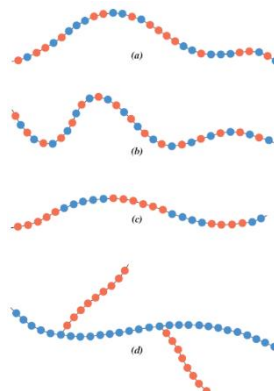


Figura 5: Representações esquemáticas dos copolímeros

O terpolímero é a classificação dos polímeros que em sua cadeia principal é constituída por três meros diferentes. Dependendo das características físicas desejadas para formar

materiais a partir de polímeros, faz-se necessária o controle da porcentagem de cada mero (Canevarolo, 2003).

2.4 TERMOPLÁSTICOS

O termo termoplástico indica uma subdivisão dos materiais poliméricos. Os materiais termoplásticos são aqueles que contêm a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Esta alteração é uma transformação física, reversível, a qual acontece quando o polímero é semicristalino pois o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. Conforme a temperatura eleva, as forças de ligação secundárias diminuem devido ao aumento do movimento da molécula, de tal forma que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. Com o aumento gradual de temperatura pode-se atingir uma temperatura elevada o suficiente para gerar uma degradação irreversível. Alguns exemplos de aplicação de termoplásticos estão identificados na Figura 6. (Callister, 2018)



Figura 6: Exemplos de aplicação de polímeros termoplásticos.

2.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO

A mobilidade da cadeia polimérica do material vai determinar as características físicas deste, os polímeros apresentam três temperaturas de transição relevantes: temperatura de transição vítrea, temperatura de fusão cristalina e temperatura de cristalização.

- 1) Temperatura de Transição Vitrea (T_g): Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura que durante o aquecimento, permite as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade. Em temperaturas abaixo do valor de T_g o polímero se encontra em seu estado vítreo e não tem energia interna o suficiente para a mobilidade das cadeias

poliméricas. Quando um material atingir sua temperatura de transição vítrea as cadeias começam apresentar mobilidade que aumentam com o aumento da temperatura. Esta temperatura está associada à natureza amorfa do polímero, sendo uma reação exclusiva no estado amorfo.

- 2) Temperatura de fusão cristalina (T_m): Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura em que, durante o aquecimento, transformam as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos. Nesta temperatura, existe energia o suficiente para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina. Neste estado, o material muda sua textura de borrachoso para viscoso e fundido. Esta mudança termodinâmica de primeira ordem afeta variáveis como volume específico e entalpia. Esta transição só ocorre na fase cristalina, portanto, só é presente em polímeros semicristalinos.
- 3) Temperatura de cristalização (T_c): Quando o material se encontra em seu estado fundido e sofre por um resfriamento ele atingira uma temperatura baixa o suficiente para que em um ponto específico na massa fundida, um número suficiente de cadeias se organize espacialmente de forma regular. Esta ordenação espacial permite a formação de uma estrutura cristalina naquele ponto. Isso reflete em toda a massa polimérica fundida da produzindo a cristalização.

2.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Para definir as propriedades mecânicas dos polímeros é necessário mensurar parâmetros como o módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração, como evidenciado na Figura 7.

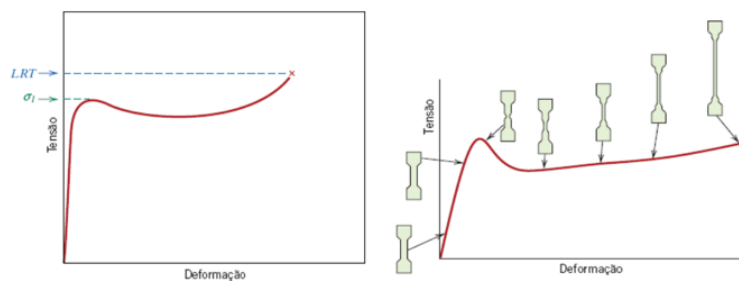


Figura 7: Curva tensão-deformação esquemática para um polímero, mostrando como são determinados os limites de escoamento e de resistência à tração e ao lado Curva tensão-deformação esquemática em tração para um polímero semicristalino.

O módulo de elasticidade determina a rigidez ou como uma resistência do material à deformação elástica e essa deformação não é permanente. O módulo de elasticidade pode ser

determinado a partir de uma relação linear da tensão e deformação, sendo a inclinação desse segmento linear o módulo de elasticidade E . Porém, existem alguns materiais para os quais essa porção elástica não é linear, desse modo, utiliza-se normalmente ou o módulo tangente ou o módulo secante, indicados na Figura 8. (Callister, 2018)

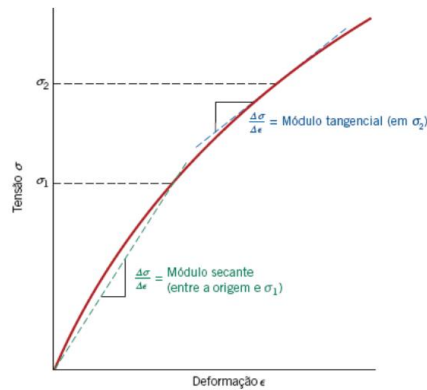


Figura 8: Módulo Secante e Módulo tangencial de um material não linear.

O limite de escoamento é tomado como o valor máximo da curva, que ocorre imediatamente após o término da região elástica linear, neste ponto a tensão é máxima suportada pelo material até ocorrer a fratura do material. O limite de resistência a tração corresponde à tensão na qual ocorre a fratura, este parâmetro pode ser maior ou menor que o limite de escoamento (Canevarolo, 2003).

Na Figura 9, é exemplificado os tipos de curvas de tensão-deformação encontradas em materiais termorrígidos e em materiais termoplásticos. Com a esquematização abaixo observa-se um comportamento frágil nos materiais termorrígidos, ou seja, há pouca deformação plástica antes da ruptura. Na primeira curva observa-se um módulo de elasticidade alto, porém, os materiais são duros e quebradiços com baixa deformação elástica. Na segunda curva, o termorrígido tem um módulo de elasticidade mais baixo, mas apresenta uma deformação antes da ruptura da amostra, esses são os termorrígidos com menor percentual de preenchimento de reticulados, estes conferem de um comportamento duro e forte. Já os materiais termoplásticos apresentam módulo de elasticidade menor que os materiais termorrígidos, porém, confere maior deformação no material antes da ruptura. (Gotro, 2017)

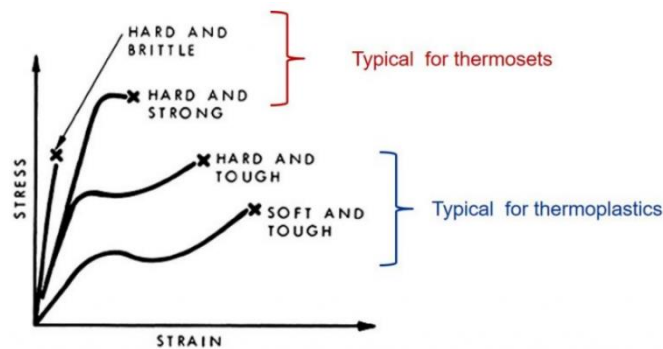


Figura 9: Curvas de tensão-deformação de tração para termorrígidos e termoplásticos

2.7 POLÍMEROS DE ENGENHARIA

- ABS (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno)

O ABS é um polímero classificado como terpolímero, o qual tem como característica a formação da cadeia principal por três meros diferentes, acrilonitrila-butadieno-estireno. O modo de distribuição dos meros dentro da cadeia polimérica é de forma grafitizado, ou enxertado, onde a estrutura química é formada principalmente por uma cadeia de homopolibutadieno enxertada com um copolímero aleatório de estireno-acrilonitrila, como indicada na Figura 10. (Sanchez, 2021)

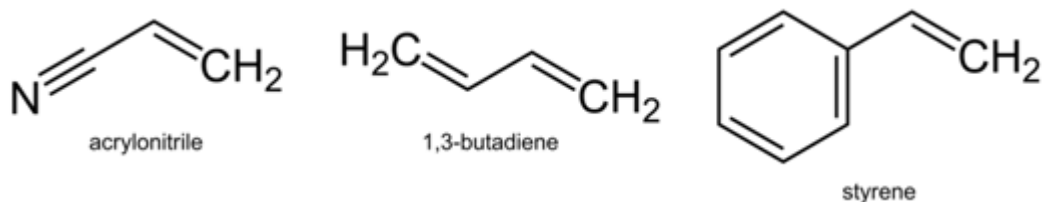


Figura 10: Monômeros constituídos na composição química de ABS.

A síntese do monômero acrilonitrila foi inicialmente relatada pelo químico francês Charles Moureu em 1893. Este polímero é um termoplástico derivado do petróleo e sua fórmula química é $C_8H_8-C_4H_6-C_3H_3N$, cuja a proporção de cada componente pode variar conforme o processo de fabricação (Sanchez, 2021).

A alteração da proporção de cada componente e a adição de aditivos especiais permitem a produção de grades com propriedades bem específicas, pois, cada monômero confere diferentes propriedades ao terpolímero. Dessa forma, o monômero de estireno reflete uma boa processabilidade, a acrilonitrila rigidez, resistência térmica e química enquanto o butadieno torna o produto mais resiliente à baixas temperaturas (Sanchez, 2021). A proporção de monômeros pode variar conforme o indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Variação percentual de monômeros do ABS.

Monômeros	Acrilonitrila	Butadieno	Estireno
Percentual	15-35%	5-30%	40-60%

Fonte: (RABELLO, 2021).

O resultado físico deste copolímero é um material termoplástico rígido e leve, com uma flexibilidade e resistência na absorção de impacto, este termoplástico pode assumir quaisquer formas e cores com a adição de pigmentos. Atualmente é um dos materiais mais utilizados em impressoras 3D, na forma de filamentos para manufatura aditiva.

- Policarbonato

Os materiais de Policarbonato (PC) são obtidos por reação entre os compostos poli-hidróxi e ácido carbônico (Brydson, 1999). Os polímeros podem ser classificados como alifáticos e aromáticos. Os polímeros alifáticos são utilizados na síntese de poliuretanos, plastificantes e apresenta uma estabilidade térmica inferior aos polímeros aromáticos (CHANDA, et al., 1987). Os polímeros aromáticos são classificados como um termoplástico de engenharia obtido da policondensação do fosgênio e do bisfenol-A (Canevarolo, 2002).

O Policarbonato de bisfenol-A contém anéis benzênicos e grupos carbonato na cadeia principal, com grupos metila à essa cadeia (Melo, 2004), como pode ser observado na Figura 12. Os anéis aromáticos aumentam a estabilidade térmica do polímero ininterrupto a temperaturas acima de 150 °C.

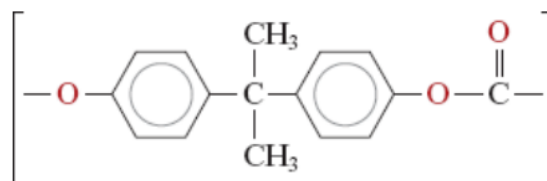


Figura 11: Unidade repetitiva do Policarbonato

O polímero de Policarbonato é utilizado em uma ampla gama de aplicações industriais devido suas propriedades como alta durabilidade; excelentes propriedades mecânicas, como resistência ao impacto e grande módulo de elasticidade; alta resistência térmica; alta transparência, bom isolamento elétrico e inércia fisiológica (Ronkay, 2013) (Brydson, 1999).

Porém, as principais desvantagens desse material são: preço elevado em relação a outros termoplásticos de uso geral, precisa de cuidados especiais no processamento, cor amarela, resistência limitada aos produtos químicos e à luz ultravioleta, sensibilidade ao entalhe e susceptibilidade a fissurar sob tensão (Brydson, 1999).

Os polímeros de policarbonato são, em geral, amorfos, podendo ser cristalizado por aquecimento em elevadas temperaturas, por tratamento com solventes, por estiramento de fibras ou filmes. A temperatura de transição vítrea do policarbonato é de 150 °C, o que pode ser atribuído à restrição de movimento dos segmentos de cadeia, contendo o anel aromático, e às grandes unidades repetitivas quando comparadas a outros polímeros. Possui excelente estabilidade térmica, com decomposição a temperaturas superiores a 350 °C e a perda de componentes voláteis acima de 400 °C. Suas propriedades ópticas apresenta alto índice de refração devido ao alto conteúdo de anéis aromáticos, sendo transparentes e transmitindo quase 90% da luz visível (Melo, 2004). A Tabela 2 indica os valores de propriedades gerais do Policarbonato (Kutz, 2001).

Propriedades do PC	
Densidade (mg/m ³)	1,20
Módulo de elasticidade (GPa)	2,4
Resistência a tração (MPa)	65
Alongamento (%)	110
Impacto Izod (J/m)	860
Temperatura de deflexão térmica a 1,81 MPa (°C)	132*
Temperatura de serviço (°C)	121
Dureza (Rockwell M)	70

Tabela 2: Propriedades gerais do policarbonato.

- Polieterimida (PEI)

O polímero comercial utilizado é denominado Ultem 9085 fornecido pela Stratasys é um termoplástico de polieterimida (PEI) que foi utilizado para a fabricação dos corpos de prova na Impressora 3D Stratasys Fortus 450mc. Este polímero, este é considerado um polímero avançado de engenharia que contém enlaces éter e grupos de imida na sua corrente de polímero (Leonhardt, 2018). Este polímero ganhou um posto entre os materiais mais potentes para aplicação de filamentos para impressão 3D. Estes polímeros utilizados em aplicações em que alta temperatura é exigida, contém essa estabilidade térmica devido a sua grande quantidade de anéis aromáticos em sua cadeia principal (Decarli, 2018).

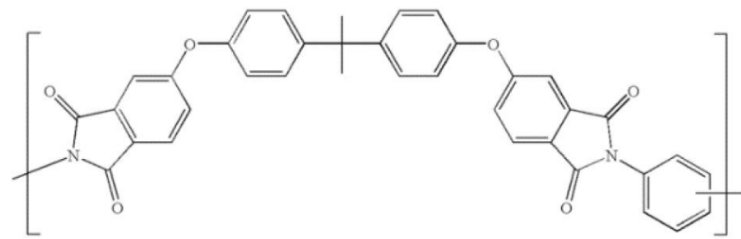


Figura 12: Estrutura química do monômero da PEI ULTEM®.
Fonte: (Decarli, 2018).

A polieterimida (PEI) de estrutura química conforme a Figura 12, apresenta ótimas propriedades térmicas por ser um retardante de chamas intrínseco (JIANG, 2014) e possui estabilidade dimensional acompanhada por um elevado módulo elástico (CARROCCIO, et al., 2011)

- Copoliéster

Os filamentos utilizados da empresa GTMax Core GT5 denominado Tritan é considerado um copoliéster, esse se forma quando são feitas modificações no processamento de poliésteres com combinações de diácidos e dióis. Introduzindo outros diácidos, como ácido isoftálico (IPA), ou outros dióis, como ciclohexanona dimetanol (CHDM) ao poliéster polietileno tereftalato (PET), o material se torna um copoliéster devido ao número de monômero em sua estrutura (Jaarsma, 2002).

Os copoliésteres são fortes e amplamente utilizados. São materiais higroscópicos, claros e amorfos que se formam quando são feitas modificações nos poliésteres. Os copoliésteres retêm propriedades mecânicas, como resistência e clareza, mesmo quando expostos a produtos químicos que normalmente afetam outros materiais, como policarbonatos (PC).

Os copoliésteres são efetivamente usados no projeto de peças de alto volume e baixo custo, bem como peças componentes mais caras. Duráveis e inquebráveis, os copoliésteres são confiáveis para aplicações que exigem estabilidade a longo prazo.

2.8 MANUFATURA ADITIVA

A elevada concorrência e a crescente complexidade dos produtos têm exigido do mercado alterações no desenvolvimento visando reduzir o tempo de produção, aumentar a qualidade e competitividade dos produtos. Essas alterações podem envolver aspectos de gestão, quanto o emprego de novas técnicas e ferramentas para auxílio do projeto. Sabe-se que sucesso

comercial está associado em entender a demanda, identificar a real necessidade do cliente e desenvolver rapidamente um produto para atendê-los. Desse modo, é de suma importância reduzir a possibilidade de falhas e melhorar a qualidade, atendendo aos requisitos do cliente.

De acordo com as necessidades e a novas complexidade do mercado, no final da década de 1980, um novo princípio de fabricação baseado na adição de material foi apresentado, denominado de Manufatura Aditiva ou Impressão 3D. O processo de Manufatura Aditiva consiste nas etapas evidenciadas na Figura 13 (Volpato, 2017).

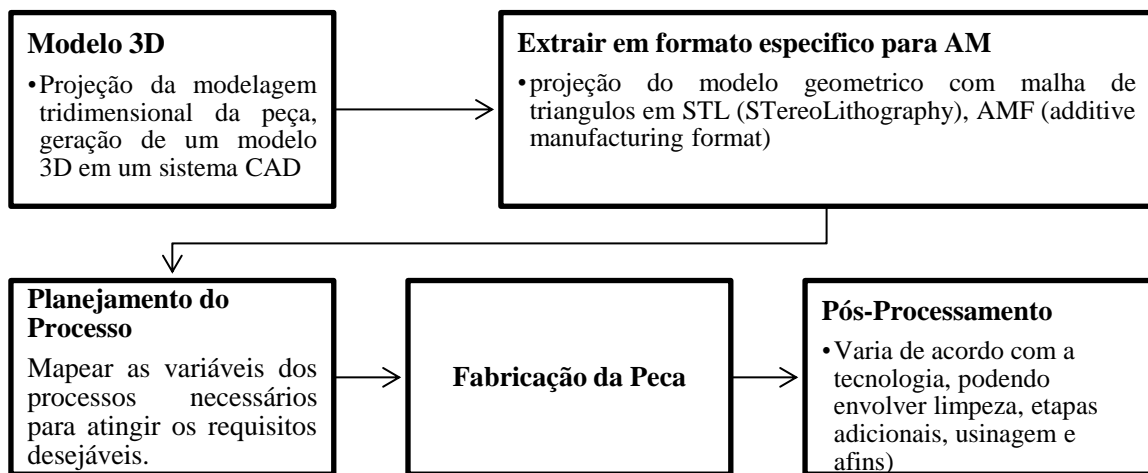


Figura 13: Processo de manufatura aditiva.

A Manufatura Aditiva pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D, originado de um modelo geométrico do sistema CAD (Computer-Aided Design). Em virtude de seu processo, a Manufatura Aditiva possui uma capacidade de fabricação de peças com geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma série de geometria 2D mais simples. Esse processo de fabricação se tornou possível pela integração desde outros processos convencionais com diversas outras tecnologias (Volpato, 2017).

Uma característica importante para a manufatura aditiva é a sua facilidade em automatizar, minimizando a intervenção do operador durante o processo. É necessário um operador para a preparação do equipamento, com a alimentação de materiais e ajustes de parâmetros e no final do processo com retirada da peça e limpeza da máquina. Porém, durante a fabricação o sistema é integrado ao software da impressora que o abastece de informações geométricas da representação gráfica do produto.

Segundo Neri (2021) o processo de fabricação de Manufatura Aditiva contém algumas vantagens e por outro lado algumas restrições ou deficiências que acabam limitando o processo de fabricação.

Tabela 3: Vantagens e desvantagens do uso da manufatura aditiva.

Vantagens	Desvantagens
- Geometria de peças complexas Maior liberdade para criação de projetos e a possibilidade de otimização;	- Propriedades anisotrópicas Peças produzidas por camadas, o que resulta em uma propriedade anisotrópica;
- Pouco desperdício e utilização eficiente de energia;	Acabamento superficial inferiores;
- Processo automático e sem intervenção Não há necessidade de intervenção do operador durante o processo e a peça é fabricado em um único equipamento;	Limitação de escolha de materiais, diferentemente do que acontece nas demais tecnologias.
- Possível produção de peças finais Com o uso de materiais metálicos ou polímeros de engenharia a Manufatura Aditiva apresenta uma flexibilidade para a produção de peças com grandes aplicações e com grande diversidade geométrica, essa produção apresenta uma relação de custo menor para demandas menores;	Problemas como distorção e empenamento do material podem ser observado após o processamento de Manufatura Aditivas, com o desenvolver das máquinas esses problemas se amenizaram;
- Algumas tecnologias têm o potencial de misturar materiais diferentes, ou mesmo diminuir o percentual de preenchimento ao longo da estrutura;	Considerando grandes lotes, a Manufatura Aditiva é lenta comparada aos processos tradicionais;
- Vantagens na produção de protótipos físicos e complexos.	Alto custo para implementação de operação e aquisição do equipamento;

(Volpato, 2017).

2.9 MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA

Para a produção de peças em aditivos poliméricos pode ser utilizado quatro tipos de técnicas para o processo de fabricação, sendo: a extrusão de materiais, fusão em pó, polimerização em cuba e jateamento de material. Para cada tipo de polímero é utilizado um processo diferente para melhor compatibilidade entre processo e material, para os polímeros termoplásticos é utilizado técnicas de extrusão e fusão em pó, já para os materiais termofixos são utilizadas técnicas de polimerização em cuba e jateamento de materiais.

Fused Deposition Modeling – FDM

Esse processo é caracterizado por depositar o material fundido em forma de filamento, onde em um bico calibrado utiliza-se temperaturas superiores à de fusão do material, tornando possível realizar a extrusão do material. Desse modo, através do bico calibrado o material é depositado sobre uma mesa, e assim a formação do objeto desejado consiste em sobrepor camadas de filamentos fundidos até obter a geometria desejada (CUNICO, 2015). A Figura 14 apresenta a representação esquemática do processo de FDM.

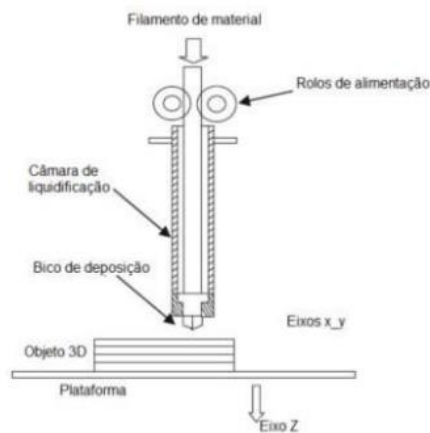


Figura 14: Processo FDM.
Fonte: (CUNICO, 2015).

Durante o processo de deposição dos materiais extrusados na plataforma, o bico de deposição controlado realiza movimentos nas direções X-Y, onde a geometria é então formada realizando o preenchimento da peça do contorno até o núcleo. Quando a camada é totalmente preenchida, a plataforma de extrusão se ajusta se afastando do bico, no eixo Z, e possibilita o início de uma nova camada sobre a anterior até a altura necessária do projeto. (RELVAS, 2018)

Nas impressoras 3D por FDM o bico de deposição funciona como um extrusor, o qual é alimentado por filamento que sob condições de temperatura e pressão controlados obtém um

produto com comprimento ilimitado e seção transversal constante. O fluxo do material através do bico de deposição é semelhante ao fluxo capilar e é controlado pela pressão entre a câmara e a atmosfera.

PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

O processo de extrusão é baseado em empurrar o material através de um orifício moldado chamado matriz, a qual confere sua forma na seção transversal que o material está sendo extrusado. Existem processos de extrusão a quente, processos de extrusão a frio e processos de extrusão baseados em produtos químicos, cada um permitindo uma diversidade de materiais compatíveis com a técnica de serem extrusados.

Nas impressoras estudadas o processo utilizado é de extrusão a quente, a qual utiliza a energia térmica no material para aumentar sua viscosidade, permitindo que ele seja empurrado pela matriz em um nível de velocidade e pressão determinado.

A extrusão pode ser um processo muito complicado quando se considera a enorme variedade de materiais, a complexidade das seções transversais desejadas e quantidade desejada de fluxo de material. As propriedades dos filamentos, como ductilidade, viscosidade e cristalinidade tem um impacto profundo nos processos de extrusão, desse modo, o processo de Impressão 3D é composto por uma combinação de ajustes levando em consideração as características intrínsecas dos materiais.

Os parâmetros que podem ser ajustados em uma impressão 3D variam conforme as máquinas utilizadas, mas de uma forma geral são parâmetros como: velocidade do cabeçote, taxa de fluxo do material, temperatura do bico depositador, temperatura da plataforma de produção, temperatura de câmara e umidade. Cada combinação está associada a um conjunto de vantagens e desvantagens para o produto.

A extrusão consiste em aquecer o material acima da temperatura de transição vítrea (T_g), ponto em que o material começa apresentar maior viscosidade para ser extrusado, mas mantido abaixo da temperatura de fusão (T_m), pois não se tem um controle do material em seu estado fundido.

Em uma impressora 3D, a taxa de alimentação é balanceada com o estado do material e o controle de movimentos para fornecer uma quantidade desejada de material depositado no estado específico na plataforma de construção.

Ao ser depositado o material extrusado é exposto a taxa de resfriamento a qual inicia um processo de solidificação do polímero. As distribuições de temperaturas ao longo do

material exposto na câmara dependem do tempo e fornecem informações sobre as características do polímero, como sua taxa de resfriamento e ligação entre filamentos (M.A. Yardimci, 1996).

Com auxílio de um software de análise de elementos finitos é capaz de simularmos o fluxo de fluido necessário para o processo por FDM. Watanabe et al capturou processos térmicos experimentados durante a deposição de material usando o software ANSYS Polyflow e ANSYS Mechanical, onde desenvolveram uma sequência de simulações que foram vinculadas umas às outras através dos perfis de temperatura em função do tempo.

O primeiro modelo de simulação foi o preenchimento da camada em contato com a plataforma de construção, a plataforma de construção se mantém com uma temperatura de 80 °C. Para esta sequência de simulações, foi utilizado uma temperatura no bico de deposição de 220 °C, uma velocidade de 0,2mm/s com uma altura de camada de 0,03mm, os quais representam valores típicos de configurações de variáveis de processo FDM para polipropileno. (Watanabe, et al., 2016)

A Figura 16 mostra o comportamento da taxa de resfriamento ao longo do material extrusado durante o preenchimento da primeira camada. O depósito de 5 mm levou 0,25s, e a primeira parte do filamento depositado já estava esfriando a aproximadamente 200 °C. Como resultado, o filamento depositado foi deixado resfriar por 1,25 s após o término da deposição, tempo suficiente para que todo o filamento resfriasse até a temperatura da plataforma de construção. (Watanabe, et al., 2016)

O segundo modelo de simulação foi do preenchimento da segunda camada sobre a primeira camada e o resfriamento de ambas as camadas. A distribuição de temperatura após o resfriamento da primeira camada foi exportada da simulação anterior. O procedimento para este modelo de simulação foi semelhante ao de resfriamento da primeira camada. No entanto, foi

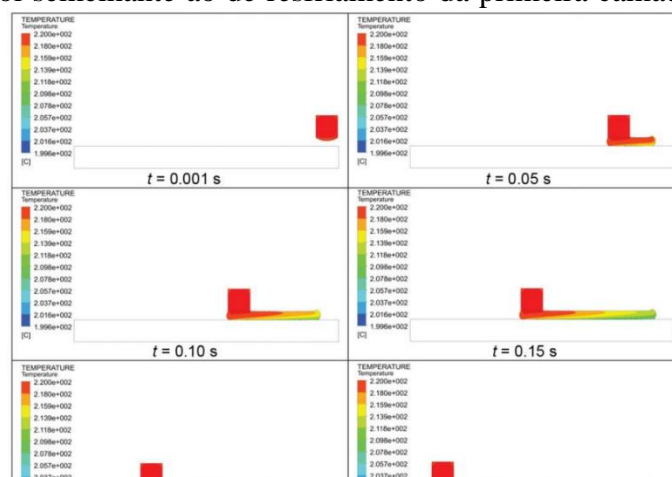


Figura 15: Distribuição de temperatura e formato do filamento depositado durante a deposição da primeira camada na modelagem de deposição por extrusão de material.

crucial simular a transferência de calor por condução entre as duas camadas, o que foi realizado usando a capacidade de contato fluido-fluido no Polyflow.

A Figura 11 mostra a simulação de 0,2s do preenchimento da segunda camada. Observa-se que o filamento inicialmente foi aquecido significativamente acima da temperatura da plataforma de construção, desse modo, a temperatura na interface entre os filamentos estão acima da temperatura de fusão do material, o que ajuda a garantir uma boa ligação entre os filamentos.

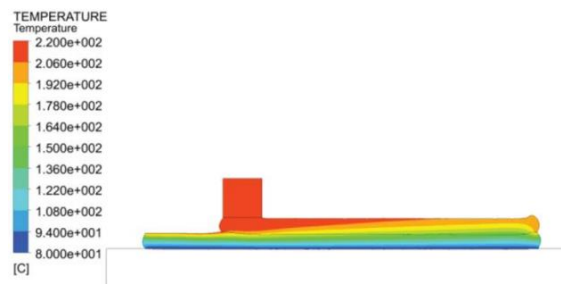


Figura 16: Estágio intermediário de deposição da segunda camada mostrando a distribuição de temperatura na modelagem de extrusão do material.

A última simulação determinou a tensão residual e empenamento/deformação das duas camadas de filamentos depositados. As distribuições de temperatura obtidas e os formatos dos filamentos depositados foram importados para o ANSYS Mechanical para realização de algumas análises estruturais. Fixando o ponto médio na superfície inferior da primeira camada à plataforma de construção e aplicando força zero em todos os outros lugares, a tensão residual e o empenamento durante o processo de resfriamento foram calculados. O domínio computacional e as condições de contorno são mostrados na Figura 18.

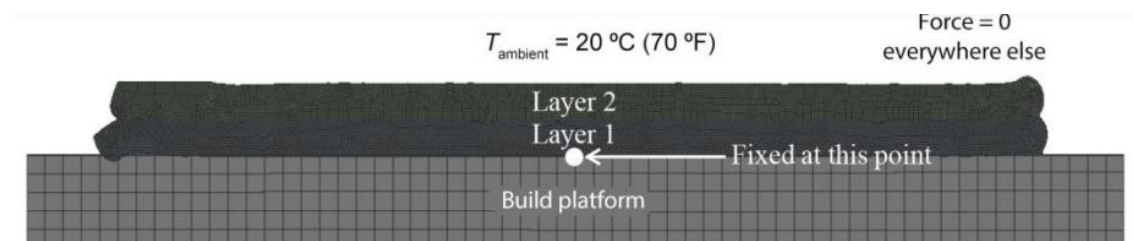


Figura 17: Geometria e malha antes da simulação de tensão residual e empenamento de duas camadas de filamentos.

A tensão residual e o empenamento/deformação das duas camadas de filamentos preenchidos são mostradas na Figura 19. Como o modelo de simulação foi usado para prever a

tensão residual induzida termicamente e o empenamento parcial causado pela cristalização do material durante o resfriamento, o resfriamento de duas camadas os resultados do modelo de simulação foram vinculados para realizar as análises estruturais no ANSYS Mechanical (Watanabe, et al., 2016).

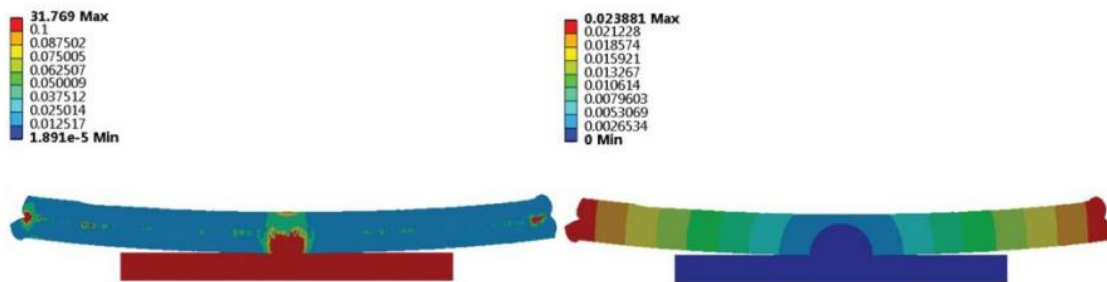


Figura 18: Tensão residual em estado estacionário (esquerda) e empenamento/deformação (direita) resulta da simulação em material.

COMPONENTES DA IMPRESSÃO 3D

Extrusoras ON-Head e OFF-Head

O sistema de alimentação do material consiste em um filamento preso entre duas engrenagens que são giradas por um motor de passo para avançar e retraindo o material empurrando e puxando-o. Desse modo, uma força de cisalhamento é criada entre as faces da engrenagem e a superfície do filamento aumentando a precisão do processo de alimentação do filamento. Para ambas as direções, é necessário avaliarmos a quantidade de pressão necessárias que as engrenagens exercem sobre o filamento e o atrito da interface entre as engrenagens e o filamento. Várias estratégias são empregadas para minimizar o risco de deslizamento dessa interface engrenagem/filamento (Shaour, 2016). O processo pode ser visualizado na Figura 19 (a) e (b).

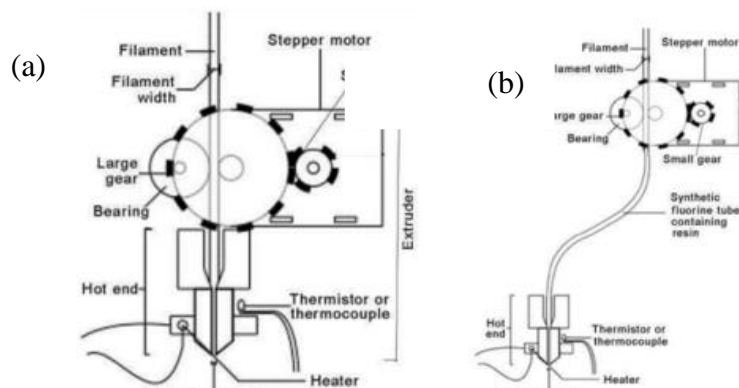


Figura 19: Sistema de Extrusora ON-Head (a) e OFF-Head (b).

Os primeiros modelos de uma Impressora 3D utilizavam o modelo de extrusora ON-Head, indicado na Figura 19-a, onde o sistema de alimentação de filamento era acoplado no mecanismo de aquecimento do bico de deposição de material. Porém, à medida em que as impressoras e as plataformas de construção se tornaram maiores, grandes desafios como precisão dimensional e maior controle da taxa de deposição do material se tornaram uma restrição- de projeto.

Dessa maneira, outras configurações de extrusora surgiram para enfrentar esses novos desafios. Por exemplo, o projeto Bowden, Figura 19-b, coloca o mecanismo de alimentação de filamentos não mais acoplado no mecanismo de aquecimento do bico de deposição, assim aliviando o peso encontrado no mecanismo de orientação x e y conferindo-lhe maior precisão dimensional e a possibilidade de alimentação de maiores quantias e filamentos e maiores quantias de materiais trabalhados como indicado na Figura 20.

Ventiladores de resfriamento

Um parâmetro que deve ser analisado em cada polímero utilizado como matéria prima

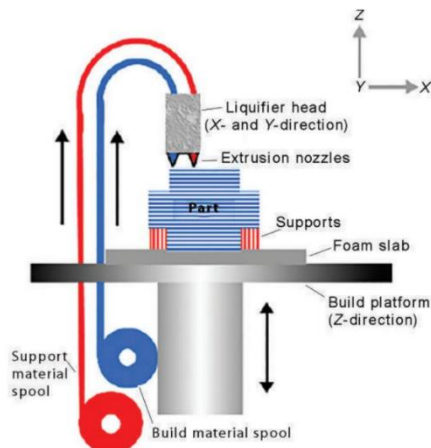


Figura 20: Esquema de uma extrusora de material duplo.

do filamento é a condutividade térmica, a condutividade térmica do material dita o comportamento do polímero ao esfriar e aquecer. Para maior controle da taxa de resfriamento do polímero é comum utilizarem um pequeno ventilador acoplado no cabeçote de impressão para esfriar o material ao sair do bocal. Desse modo, o processo de resfriamento é mais rápido e permite que o material adquira a temperatura adequada para manter a forma desejada e a aderência necessária com as camadas anteriores.

Mecanismo de controle de movimento

Para a impressão da peça é necessário um mecanismo capaz de controlar os movimentos do cabeçote de acordo com o preenchimento e taxa de deposição do material. Existem muitas configurações para criar o movimento 3D, cada uma com suas vantagens e desvantagens. A configuração mais comum é conhecida como sistema cartesiano, o qual movimenta o cabeçote em duas dimensões sobre a plataforma de construção que se move no eixo Z a cada camada preenchida. Algumas impressoras 3D fornecem graus adicionais de liberdade na plataforma de construção, permitindo que ela incline, o que permite a criação de mais tipos de objetos e menos material de apoio.

Outras impressoras contêm um sistema de configuração diferente com três braços de movimento para posicionar e inclinar o cabeçote de impressão conforme desejado, conforme mostrado na Figura 21.



Figura 21: SeeMeCNC Rostock MAX v3.2 tridimensional.

2.9.1 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DO PROJETO

Qualidade superficial

A rugosidade da superfície de uma ferramenta é uma resultante determinada pela geometria da peça impressa, espessura da camada e orientação da construção. O acabamento e a rugosidade de uma superfície podem ser um requisito crucial de um projeto. A qualidade superficial está diretamente ligada altura da camada escolhida para o projeto, como indicado na Figura 22. Quanto menor a altura escolhida, maior será a qualidade superficial, porém maior o tempo de impressão final.

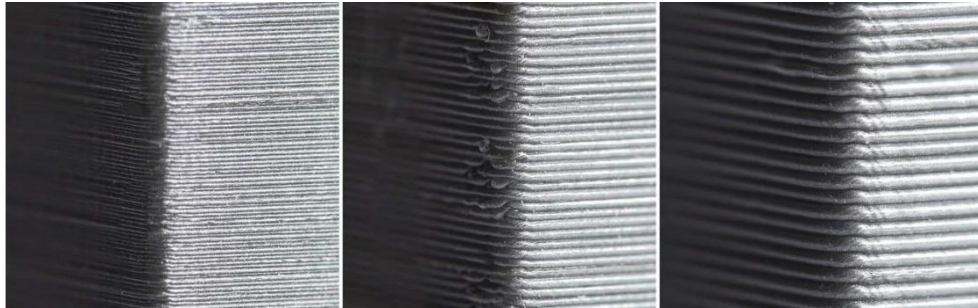


Figura 22: Rugosidade de amostras impressas com diferentes alturas de camadas.

Outro fator que afeta a rugosidade das peças impressas é a orientação da construção da peça na câmara, esse é um parâmetro que deve ser analisado durante o projeto pois afeta no tempo de construção, na quantidade de suporte e a qualidade superficial de cada área, bem como desempenho final e o custo.

A Figura 23 exemplifica a construção de um projeto indicado no manual da Stratasys na página 16. A Figura 23-a exemplifica uma construção para a produção com uma orientação plana, para este meio de produção é necessário o uso de material suporte, o que encarece o projeto e como resultado do processo a superfície apresenta maiores degraus, apresentando uma rugosidade alta. A Figura 23-b exemplifica a construção para a produção em uma orientação vertical A. Essa orientação minimizará efetivamente os passos de escada, porém, necessitará em grandes quantias de materiais para a projeção do suporte da peça, encarecendo e aumentando o tempo de produção da peça. A Figura 23-c exemplifica a construção em uma orientação de construção vertical B, nesta orientação não é necessário o uso de material suporte para a projeção, barateando o projeto e diminuindo o tempo de construção além de minimizar efetivamente o efeito de passos de escada.

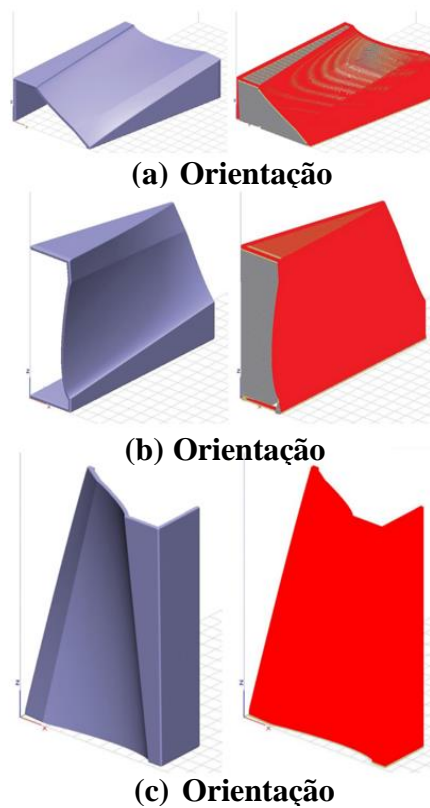


Figura 23: diferentes orientações para o processamento de um mesmo material.

Na Figura 24, retirada do manual da Stratasys para Projetos, ilustra os impactos das orientações no tempo de construção, na quantidade de uso de material para o projeto e para o suporte, e a qualidade superficial. Aos projetos com o uso de suportes foi necessário o dobro de tempo para execução da projeção e houve uma grande diferença entre a relação de material necessária para o suporte, barateando o projeto significativamente.

Relative comparison of build orientations				
ORIENTATION	RELATIVE BUILD TIME	RELATIVE MODEL MATERIAL USE	RELATIVE SUPPORT MATERIAL USE	RELATIVE STAIR-STEPPING
Flat	2.0	1.0	550	High
Vertical A	2.0	1.04	420	Low
Vertical B	1.0	1.0	1.0	Low

Figura 24: Relação entre o tempo para produção, entre a quantidade de material necessário para o modelo 3D e a relação de uso de materiais para o suporte

Percentual de preenchimento das amostras

Em todas as respostas verifica-se aumento das propriedades mecânicas com a aumento do percentual de preenchimento. Este fato é plausível, pois ao se ter mais material é de esperar que, em geral, as propriedades mecânicas melhorem. Sabe-se que quando maior for a percentual

de preenchimento, maior é a dissipação de calor, pois há um aumento de quantidade de material para influenciar na dissipação de calor do sistema (Hornberger, et al., 1997).

A Figura 25 indica diferentes valores de percentual de preenchimento para as amostras de policarbonato, é notório que para as amostras com menor percentual de preenchimento apresentam maior porosidade no enchimento, maior superfície irregular e menor resistência mecânica.

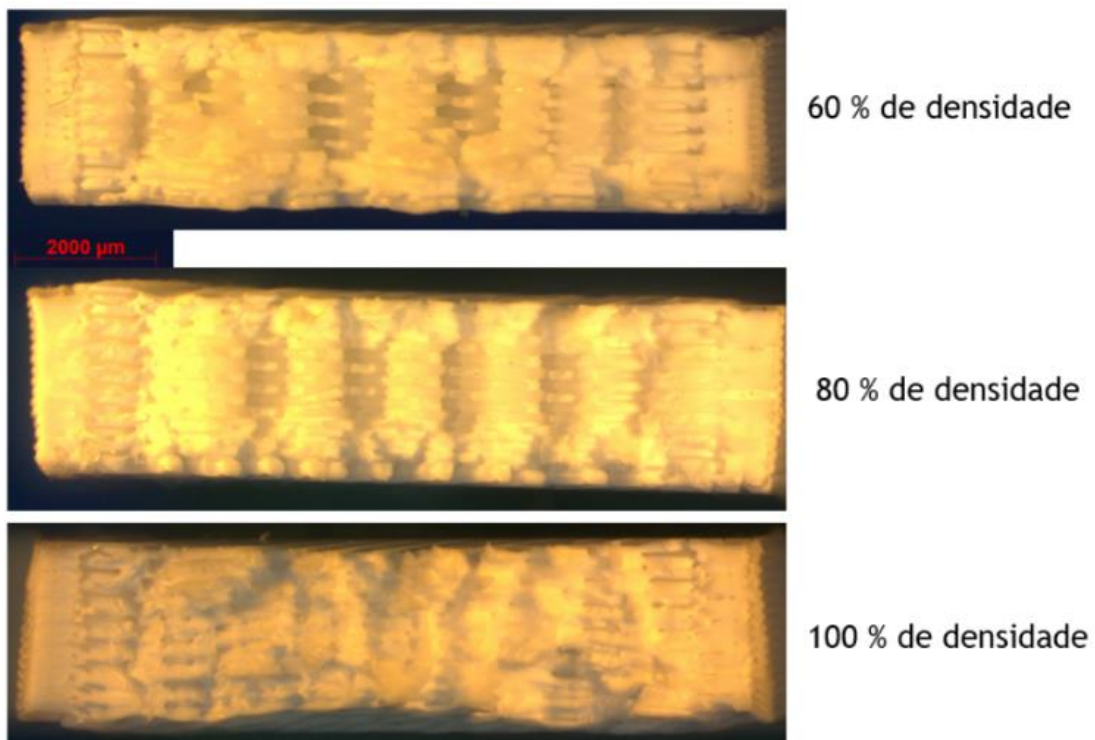


Figura 25: micrografia de diferentes valores de percentual de preenchimento para a amostra de policarbonato

Além de ser um fator que influencia diretamente na adesão entre as camadas de filamentos, é um fator que influencia a orientação de enchimento, quanto menor for a quantidade de material presente na estrutura mais importante é o estudo da distribuição dos filamentos na estrutura para resistir cargas, cada filamento que se rompe implica em um maior impacto na integridade da estrutura.

Temperatura de extrusão

As amostras construídas a partir das impressoras GTMax GT4 tiveram suas temperaturas de mesa alternados para avaliação do comportamento mecânico nestas duas variáveis. Sabe-se que as ligações entre as camadas são proporcionadas pela energia térmica do

material extrudado e consiste nas ligações das cadeias moleculares de cada par de camada. Quando uma camada é depositada sobre outra, a camada inferior irá, localmente, voltar a fundir devido ao calor emitido pela camada superior. Este fenómeno promove uma difusão molecular, local, entre as duas camadas, criando uma ligação física entre elas (Sood, et al., 2012). Quando maior for a temperatura contida no sistema, maior será a conexão entre as cadeias poliméricas, na Figura 26 apresenta-se esquematicamente o efeito da Temperatura de Extrusão na ligação entre camadas, sendo o lado direito exemplificando uma temperatura maior para o processo.

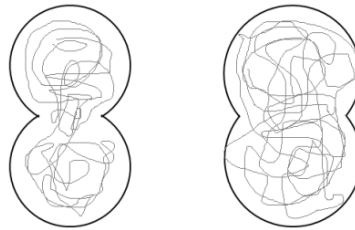


Figura 26: Efeito da Temperatura de Extrusão na Ligação Entre Camadas

Com o aumento da temperatura a viscosidade diminui, permitindo uma adesão com maior área de contacto entre as camadas (Vasudevarao, et al., 2000). Conclui-se que com o aumento da temperatura a adesão entre as camadas melhoram. O fato de as ligações entre as camadas serem mais fortes ao elevarmos os valores de temperatura no processo explica o fato da tensão de escoamento e do Módulo de Elasticidade para as amostras impressas em um processo com uma temperatura maior. Se as ligações são mais fortes, então é de esperar que o material consiga suportar cargas mais elevadas, e que a sua rigidez seja maior (Fernandes, 2016)

ToolPath

Padrões de preenchimento podem ter um grande efeito sobre a qualidade e precisão de um projeto impresso. Ao projetarmos caminhos de impressão mais próximas ou mais distantes é resultado em valores diferenciais de quantidade de material utilizado. Os caminhos de projeção podem ser mapeados a partir dos softwares. Como exemplo de como o planejamento do caminho de varredura pode ter um efeito profundo na qualidade da peça, considere a Figura 27.

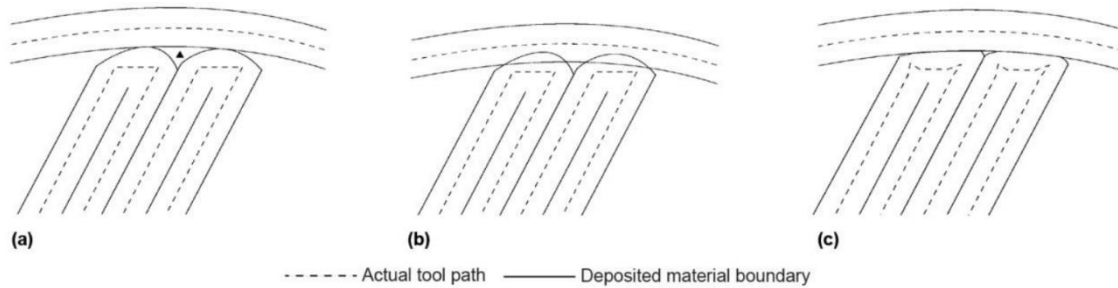


Figura 27: diferentes Toolpath

Na Figura 27 é considerado três caminhos de varredura distintos, onde cada um produz um efeito diferente na qualidade do objeto impresso. Na Figura 27-a, o caminho de varredura resulta no preenchimento cruzando com a parede externa. Na Figura 27-b, o caminho de varredura corre paralelo à parede externa, nesse exemplo é colocado uma estrada acima de outra estrada, proporcionando uma maior ligação entre o preenchimento e a parede. Entretanto, pode haver sobreposição entre o preenchimento e a parede externa, resultando em um acúmulo de material depositado criando uma superfície irregular. Na Figura 27-c, o caminho de varredura se encontra tangencialmente com a parede externa, resultando em uma boa aderência e nenhuma sobreposição de materiais.

Dilatação da matriz

No processo de fabricação de peças por FDM, o material utilizado é extrudado através da extremidade quente do bocal, desse modo, o material é comprimido. Quando o material sai do bocal, ele se expande, conforme mostrado na Figura 28. Este fenômeno é conhecido como dilatação da matriz, o que pode afetar em variabilidade da largura nos filamentos impressos. O inchamento da matriz é um aspecto que deve ser considerado na projeção de dimensionais, pois, pode desempenhar uma perda de previsibilidade do tamanho da peça em comparação com a geometria CAD esperada.

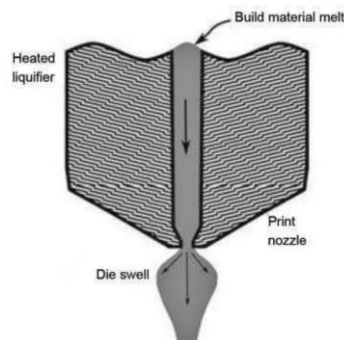


Figura 28: Dilatação do material devido a matriz.

Este fenômeno afeta diretamente o processo de fabricação em todas as direções do projeto. Na Figura 29 é exemplificado a variação da altura da camada à medida que o material se expande e encolhe depois de sair do bocal (Turner, et al., 2014).

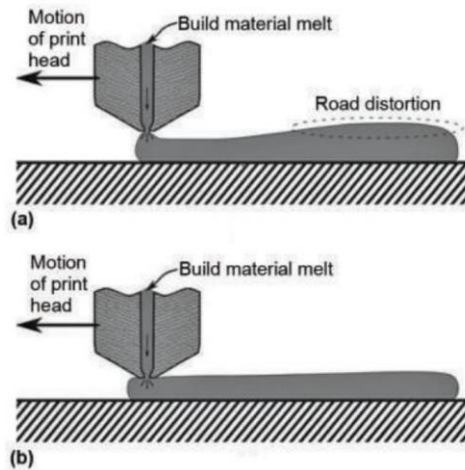


Figura 29: distorção causada pela dilatação do material na matriz.

Empenamento

Quando a temperatura de um corpo aumenta uniformemente, o corpo se expande, e a Tensão Normal deste é dada pela Equação 1:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \alpha (\Delta T) \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo $\left\{ \begin{array}{l} \alpha \text{ é o coeficiente de expansão térmica} \\ T \text{ é a mudança de temperatura, em graus.} \end{array} \right.$

Nesta ação o corpo experimenta um aumento de volume uniforme com todas as componentes no eixo x, y e z resultando em uma tensão de cisalhamento nula. A tensão pode ser medida pelas Equações 2 e 3.

$$\sigma = - \epsilon E = - \alpha (\Delta T) E \quad \text{Equação (2)}$$

$$\sigma = - \frac{\alpha (\Delta T) E}{(1-\nu)} \quad \text{Equação (3)}$$

As tensões expressas pelas Equações 2 e 3 são chamadas de Tensões Térmicas. Essas surgem devido a uma mudança de temperatura em um material e como exemplificado na Figura

31 um cenário de variação de temperatura pode ocasionar diferentes fenômenos na microestrutura do filamento (Shigley, et al., 2000).

O ciclo que o filamento é submetido no processo de impressão 3D de uma impressora esquematizado na Figura 31, neste quadro podemos observar que o Filamento pode ser submetido a 5 diferentes valores de temperaturas durante o processo de fabricação das amostras.

Figura 31: Tensão residual em uma matéria sobre aquecimento.
Fonte: (Shigley, et al., 2000).

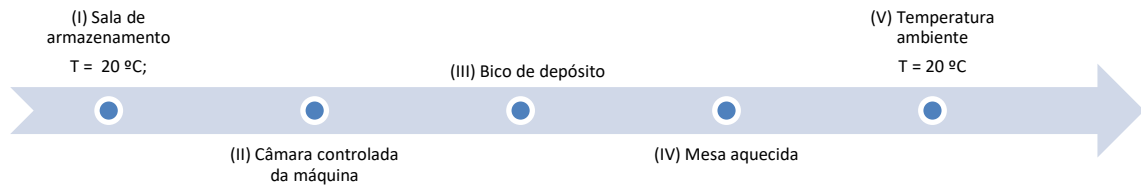
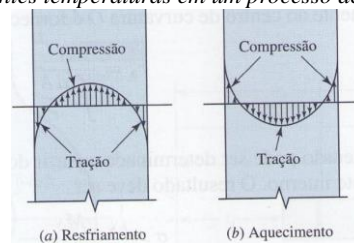


Figura 30: diferentes temperaturas em um processo de fabricação 3D.



Quando o filamento é submetido a um aquecimento o material comporta-se como indicado na Figura 31-b e quando um material é submetido a uma situação de resfriamento o material comporta-se como indicado na Figura 31-a.

Dessa forma, com esse ciclo de exposição do filamento a peça pode resultar em sua estrutura um certo valor de tensão residual, como indicado na Figura 32. A Figura 32 mostra o perfil de tensões residuais nas amostras de Polieterimida (PEI) com base dos parâmetros de processo da impressora Stratasys, nesta amostra valor máximo encontrado foi 2,065 Mpa.

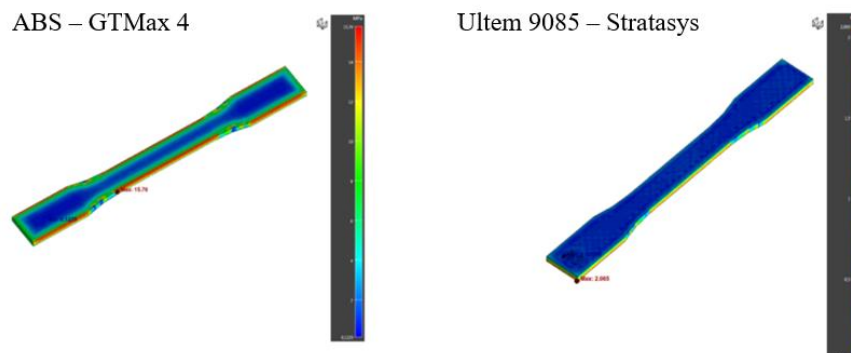


Figura 32: Amostra de Polieterimida (PEI) à esquerda e ABS GTMax Core GT4 empenada.

No critério de falhas de Von Mises, é considerado que a falha plástica ocorrerá se o estresse mecânico ocorrente, que é o estresse de Von Mises, for superior ao estresse crítico que o material suporta (Ribeiro, 2018). Na simulação realizada com os parâmetros de um material de ABS GT4 é indicado um valor de até 15.76 MPa, sendo um valor alto para a tensão residual, visto que, a tensão de escoamento permitida a essas amostras são de 30 MPa.

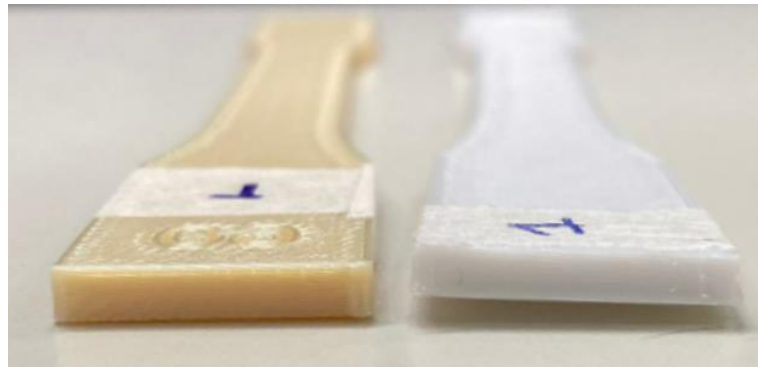


Figura 33: Amostra de Polieterimida (PEI) à esquerda e ABS GTMax Core GT4 empunada.

2.9.2 IMPRESSORAS FDM

GTMax Core GT4/GT5

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois modelos diferentes de impressora da marca brasileira GTMax3D, o modelo PRO CORE GT4 e o modelo PRO CORE GT5. A diferença entre as duas impressoras mencionadas é o dimensionamento da área de impressão onde a impressora PRO CORE GT4 possui um dimensionamento de 400 mm x 400 mm (64 Litros) e a impressora PRO CORE GT5 possui um dimensionamento de 500 mm x 500 mm (125 Litros), como indicado na Figura 34.

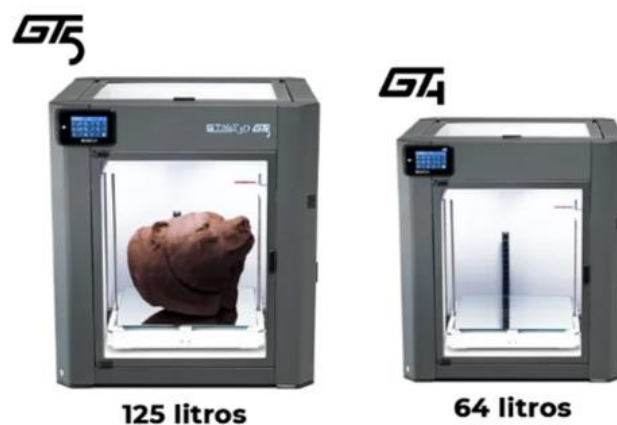


Figura 34: modelo de impressora 3D GTMax Core GT4 / GT5

Ambas as impressoras possuem um gabinete fechado em aço carbono, portas de policarbonato para melhor controle de temperatura, uma mesa aquecida de alumínio com tampo de espelho e sistema de aquecimento e uma câmara interna revestida de lã de vidro.

Na Figura 35, pode-se observar os detalhes da parte da frente (a) e da parte posterior (b) das impressoras. Em (a): 1 – Tampa Superior; 2 – Entrada para Cartão SD; 3 – Display LCD; 4 – Trilhos e Patins; 5 – Fluxo do Eixo Z; 6 – Botão Liga/Desliga; 7 – Limpador do bico; 8 – Saída de ar; 9 – Porta de acesso; 10 – Mesa aquecida; Em (b): 1 – Extrusoras; 2 – Entradas USB; 3 – Entrada cabo de energia; 4 – Eletrônica.

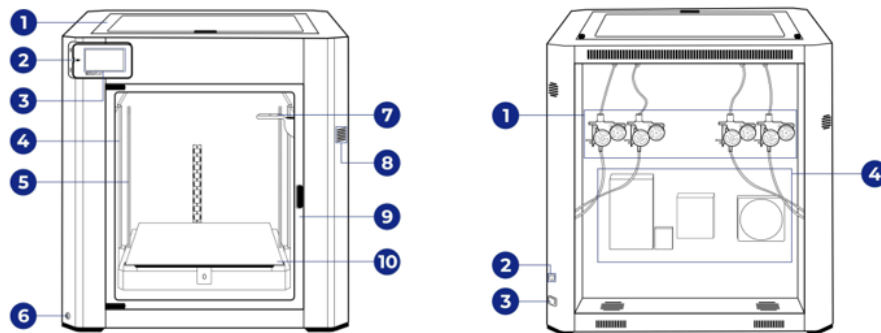


Figura 35: Esquemática da impressora GTMax Core GT4/GT5

Para a utilização das impressoras GTMax3D é necessário seguir um processo de fabricação e assim ajustar os parâmetros de impressão para cada projeto. Desse modo, é necessário avaliar cada tipo de material utilizado e a aplicação deste projeto para melhor combinação das variáveis do processo. Para melhor visualizar as atividades necessárias para a impressão de uma peça 3D, na Figura 36 têm-se o fluxograma do processo.

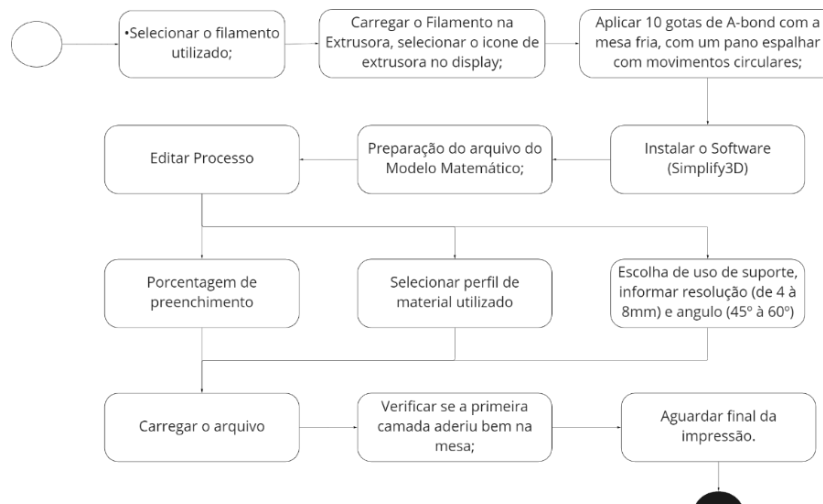


Figura 36: Processo de fabricação de uma peça na impressora 3D GTMax

Na Figura 37 é evidenciado as funções do painel no display LCD das impressoras. Nestes modelos podem ser carregados até quatro tipos de materiais em filamentos de até 500g. Existem duas temperaturas que podem ser controlados no processo, a temperatura da mesa, a qual pode atingir um valor de até 150 °C e a temperatura do bico do filamento que pode atingir até 295 °C, essas temperaturas devem ser selecionadas a partir das propriedades térmicas dos materiais escolhidos para o projeto.



Figura 37: Funções nos display LCD das impressoras GTMax

Nestes modelos são aceitos filamentos de ABS, PLA, PETG, Tritan, Fibra de Carbono, ASA, Nylon e entre outros. Para cada filamento pode ser configurado um valor em percentual de preenchimento de matéria-prima, o qual pode variar de 10% a 100%, uma velocidade de impressão, a qual pode atingir um valor de 180mm/s e um Z-Off (que mede a distância do bico e da mesa). Estas impressoras apresentam camadas de 0,05mm à 0,40mm e tem como tolerância dimensional +/- 0.02mm (Controlado Eletronicamente). Na Figura 38 é exemplificado uma peça impressa pela GTMax 3D Core GT4.

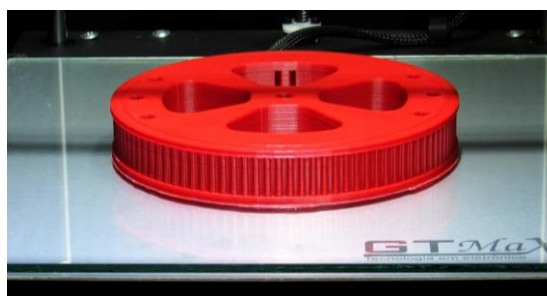


Figura 38: Peça impressa pela GTMax Core GT4

Stratasys Fortus 450mc

Além das impressoras utilizadas da marca brasileira GTMax, foi produzido amostras com uma impressora 3D da marca Stratasys do modelo Fortus 450, indicada na Figura 40. Essa máquina é indicada para qualquer tipo de aplicação desde protótipos precisos (como indicado na Figura 40), ferramentais de manufatura ou peças de uso final sob demanda.



Figura 39: modelo de impressora 3D Stratasys Fortus 450mc.

Em frente ao desafio de encontrar soluções alternativas aos métodos convencionais, a Stratasys vem substituindo grandes métodos de produção e tem mostrado sucesso em suas instalações. A Fortus 450mc apresenta resultados confiáveis para os fabricantes além de otimizar suas linhas de produção aumentando a competitividade da empresa diante as demandas dos clientes. A impressora auxilia a empresa em: evitar o alto custo e lead time da prototipagem tradicional, acelerando o desenvolvimento de produtos com protótipos funcionais; redução de tempo de preparação de máquinas de CNC, além de proporcionar liberdade de projeto e benefícios de leveza e ergonomia em relação a ferramentas de metal usinadas e é a solução ideal para a produção econômica e otimizada de peças e produtos de em baixos volumes.



Figura 40: Exemplo de Prótipo desenvolvido pela impressora 3D Stratasys Fortus 450mc

— Componentes da Impressora 3D Stratasys

Os componentes da Stratasys Fortus 450mc é representada na Figura 42, ao lado esquerdo é evidenciado parâmetros gerais de sua estrutura, ao lado direito é evidenciado os detalhes encontrados no forno da impressora 3D. O dimensionamento da bandeja e formato da placa de impressão é de 406 x 355 x 406 mm.

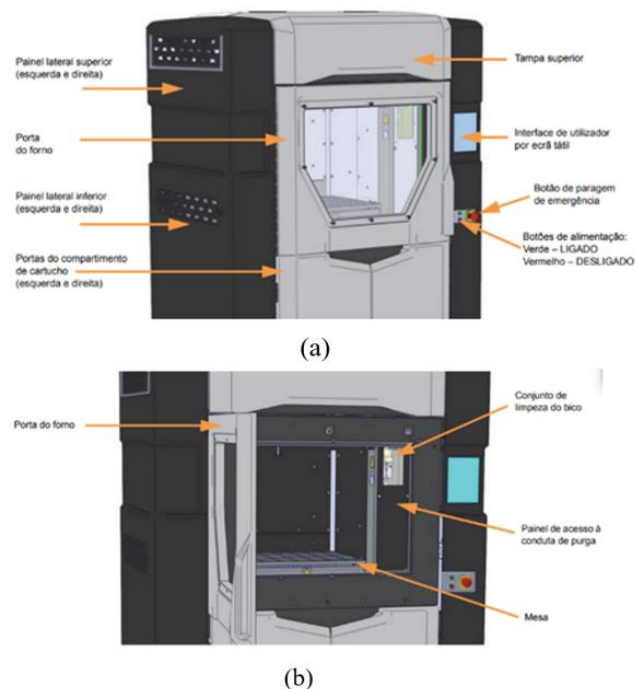


Figura 41: Esquematização dos componentes da impressora 3D Stratasys Fortus 450mc

É na câmara de impressão (Figura 43) que as peças são construídas e um dos componentes mais importantes para o processo de fabricação é a plataforma de construção (mesa). A mesa do modelo da impressora 3D Stratasys Fortus 450mc proporciona uma superfície nivelada e fixada de forma segura através de fontes de vácuo, as quais proporcionam uma distribuição de vácuo uniforme por toda a superfície. A mesa está montada com três parafusos de gato nivelador, isso permite que a mesa seja nivelada por um representante autorizado.

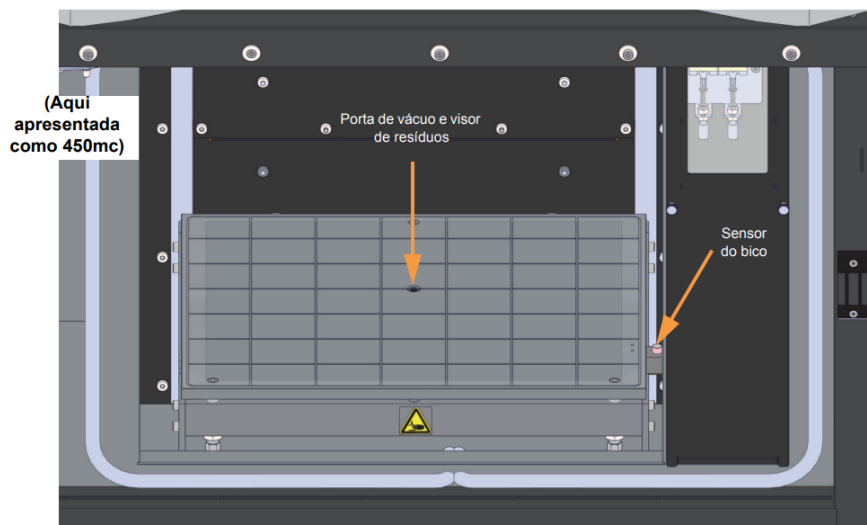


Figura 42: Esquemática da câmara de impressão da Stratasys Fortus 450mc.

— Materiais Disponíveis

Para além dos pacotes de material listados na Figura 44, uma licença independente pode ser adquirida para qualquer um destes materiais. Isto se deve ao modelo de negócio utilizado pela fabricante, que rentabiliza a certificação e maturidade do processo de fabricação por licenças não-recorrentes (materiais) e recorrentes (cânisters selados próprios).

Opção	Detalhes de opção
Padrão	O material de modelo ABS-M30 (todas as cores), ABS-M30i, ABS-ESD7 e ASA (todas as cores) com material de suporte SR-30 ou SR-35.
Engenharia	O material de modelo PC, PC-ABS, PC-ISO e Nylon12 com materiais de suporte PC_S, SR-100 e SR-110 associados.
Alto desempenho	Material de modelo ULTEM 9085 e ULTEM Black com material de suporte Ultem associado (ULT_S), material de modelo ULTEM 1010 com material de suporte ULTEM 1010 (U1010S1) associado, material de modelo ST130 com material do suporte ST130-S associado e material de modelo Nylon12 CF com material de suporte SR-110 associado.

Figura 43: Lista de materiais compatíveis com a Impressora Stratasys Fortus 450mc.

Algumas características dos materiais poliméricos têm grande impacto no processo de extrusão com calor. Cada material estudado tem particularidades que impactam diretamente com o os materiais se comportarão, os materiais amorfos apresentam uma Tg (na qual começam

a amolecer) e uma T_m (na qual o polímero se liquefaz), desse modo, é importante o conhecimento das propriedades gerais de cada material para um controle preciso do aquecimento ao imprimir uma peça. Os polímeros listam uma faixa de valores de T_g devido a variações na cristalinidade e misturas patenteadas com cargas.

Outra propriedade muito importante do material é a condutividade térmica. Para um material que ao ser aquecido esfria lentamente, tem baixa condutividade térmica e retém mais calor, desse modo, é difícil imprimir com esse tipo de material pois o material ao ser extrusado não toma forma rapidamente. Geralmente, é necessário um ventilador no bico na saída para resfriá-lo mais rapidamente. Por outro lado, os materiais poliméricos que ao aquecer esfriam rapidamente e assim permite cobrir espaços relativamente maiores entre os suportes.

O coeficiente de atrito também desempenha um papel importante na extrusão de um material. Por exemplo, o material que contém o menor coeficiente de atrito tem maior facilidade para a extrusão. ABS tem um coeficiente de atrito menor que o PLA, por isso é mais fácil de imprimir.

Entre outras propriedades importantes está o coeficiente de expansão térmica, que se relaciona com o quanto um material se expandirá quando aquecido. Isso tem implicações diretas no erro de empilhamento dos filamentos depositados como discutiremos mais adiante.

Os fornecedores comerciais caracterizam seus materiais e fornecem essas especificações para melhor controle de parâmetros para a impressão 3D.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foram utilizados 4 diferentes filamentos para a construção das amostras, foram utilizados os filamentos de ABS M30, filamentos de ABS Premium, filamentos de Polietirimida e filamentos de Copoliéster.

Cada equipamento utilizado para a impressão possui uma compatibilidade necessária com os filamentos utilizados, desse modo filamentos da marca Stratasys foram utilizados na impressora da Stratasys Fortus 450mc e os filamentos da marca GTMax foram utilizados na impressora GTMax Core GT4/GT5.

Os filamentos comerciais são acompanhados de um *Data Sheet*, um documento que resume o desempenho e outras características técnicas de amostras com 100% de percentual de preenchimento dos filamentos impressos com os respectivos equipamentos de mesma marca. A Stratasys forneceu realizou ensaios de tração nas amostras com base na norma da ASTM D638 e a empresa GTMax fornece valores para referência com base na norma ISO 527.

— Filamentos ABS M30

Foram utilizados diferentes filamentos de ABS. O ABS M30 é um material com um nome químico de Acrilonitrila-butadieno-estireno, é um filamento termoplástico fornecido pela Stratasys e foi utilizado no processo de fabricação de seus corpos de prova. Este material é versátil e tem grandes aplicações para o processo de impressão 3D por FDM, é ideal para verificações de forma e ajuste e prototipagem funcional (Stratasys). O ABS-M30 é caracterizado por sua resistência e dureza, ao mesmo tempo em que é leve e resistente, é indicado para o uso de:

- Prototipagem: Modelo conceituais, prototipagem inicial e protótipos funcionais.
- Usinagem: Gabaritos, acessórios e ferramentas de manufatura.
- Peças de produção: Produção de baixo volume e peças altamente customizadas.



Figura 44: Exemplos de peças impressas com Filamento de ABS

Na Figura 44, tem-se alguns exemplos de aplicações típicas do filamento de ABS-M30. Observa-se em (a) um acessório de inspeção (parte branca); (b) indica um protótipo de alça de grampeador; (c) um modelo conceitual de uma porta traseira automotiva e (d) um protótipo de cabo de serra.

As peças de origem de fabricação do processo de FDM são de caráter anisotrópicos. Dessa forma, para a caracterização dos ensaios realizados foram utilizadas diferentes referências de orientação para a caracterização do material, como indicado na Figura 45 (Stratasys).

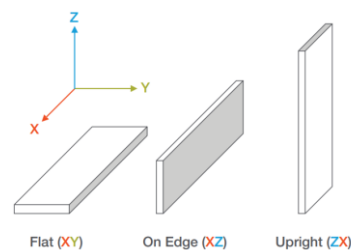


Figura 45: orientações utilizadas para impressão

Na Tabela 4 evidencia-se as propriedades intrínsecas obtidas dos corpos de prova de construídos com ABS-M30.

Tabela 4: ABS M30 – Propriedades intrínsecas.

	Método de Teste	Unidade	XY
Tensão de Escoamento	ASTM D638	MPa	30
Alongamento (Escoamento)	ASTM D638	%	1,78
Tensão de Ruptura	ASTM D638	MPa	28
Alongamento	ASTM D638	%	8
Modulo Elástico	ASTM D638	GPa	2,4
Transição Vítre	ASTM D7426 Inflection Point	° C	105 °C
Densidade	ASTM D257 @23 °C		1,05

— Filamento de ABS Premium

O ABS Premium é o nome comercial do filamento termoplástico de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) fornecido pela GTMax3D e foi utilizado no processo de fabricação dos corpos de prova de ABS impressos pela GT4. Este filamento apresenta excelente fluidez, possibilitando uma impressão mais rápida, garante boa aderência entre as camadas, conferindo maior resistência e tem facilidade no acabamento posterior da peça. Tem uma aplicação muito versátil, sendo usado tanto para fins profissionais em protótipos, quanto em peças decorativas que necessitam de alta qualidade e refinamento de detalhes. Na Tabela 5 é evidenciado algumas informações sobre os parâmetros recomendados para o ABS PREMIUM.

Tabela 5: ABS Premium – Propriedades e propriedades de processo.

Parâmetro/Propriedade	Método de Teste	Unidade	XY
Temperatura de impressão			210 – 230 °C
Velocidade de Impressão			80 – 150 mm/s
Temperatura de Mesa			100 – 130
Ventilação da Peça			Baixa necessidade
Transição Vitrea			100
Tensão de Escoamento	ISO 527	MPa	30
Alongamento (Escoamento)	ISO 527	%	1,78
Módulo de flexão	ISO 527	kg/m ²	23453
Dureza (R-Scale)	ISO 2039-1	-	100
Resistência ao impacto IZOD (23°C)	ISO 180/A	kg-cm/cm	22.4

— Filamento de Policarbonato

Para a impressão das peças na impressora GTMax foi utilizado um filamento de Policarbonato. O filamento de Policarbonato é um material indicado para a impressão de peças de engenharia e protótipos funcionais que demandam alta resistência térmica e mecânica. Devido as suas características óticas também pode ser aproveitada em projetos de iluminação ou telas de eletrônicos. A Tabela 6 indica as informações necessárias para impressão de peças com o uso de filamentos de policarbonato (GTMax3D, 2022).

Tabela 6: Policarbonato – Propriedades intrínsecas

Parâmetro/Propriedade	Unidade	XY
Temperatura de impressão	°C	270 – 310
Velocidade de Impressão	mm/s	40 – 120
Temperatura de Mesa	°C	90 – 110
Ventilação da Peça	-	Baixa necessidade
Transição Vítrea	°C	110
Densidade	g/cm ³	1,21
Tensão de Escoamento	MPa	49 – 117
Alongamento (Escoamento)	%	1,78

— Copoliéster

Com auxílio da impressora 3D GTMax Core GT4 foram impressas 20 diferentes amostras com o filamento de copoliéster de alta resistência térmica e mecânica, comercialmente nomeado de *Tritan*. Este filamento também se destaca no comércio devido às suas características como: resistência ao calor aprimorada, a qual resulta em ciclos de termoformagem mais rápidos, clareza, resistência, facilidade de fabricação, resistência às intempéries e flexibilidade de design. (EASTMAN, 2022)

A química exclusiva desse copoliéster oferece menor tensão residual presente no material oferecendo aos designers um novo nível de liberdade para produtos personalizados sem sacrificar a alta qualidade. Este polímero foi desenvolvido para atender uma demanda de aplicação que requer um material resistente, seguro, livre de bisfenol-A e reciclado. Este polímero é ativado por meio de um processo exclusivo que decompõe os resíduos de plásticos em seus blocos de construção químicos básicos, permitindo que os materiais plásticos sejam reciclados repetidamente (EASTMAN, 2022).

Na Tabela 7 podemos observar os valores indicados pelo valor teórico de referência do material mencionado para a fabricação de projetos impressos.

Tabela 7: Copoliéster – Propriedades intrínsecas

Parâmetro/Propriedade	Método de Teste	Unidade	XY
Temperatura de impressão		°C	260 – 280
Velocidade de Impressão		mm/s	150
Temperatura de Mesa		°C	100 – 120
Ventilação da Peça			Baixa necessidade
Transição Vítre		°C	120
Tensão de Escoamento	ASTM D 638	MPa	43
Alongamento (Escoamento)	ASTM D 638	%	21%
Módulo de flexão	ASTM D 790	MPa	1550
Dureza (R-Scale)	ASTM D 785	-	112
Resistência ao impacto IZOD (23°C)	ASTM D 256	J/m	980

— Polieterimida

A Tabela 8 contém as propriedades dos filamentos de Polieterimida (PEI), este material foi fornecido pela Stratasys, e comercialmente denominado ULTEM 9085. Este filamento foi utilizado para a fabricação de 15 amostras na impressora Stratasys Fortus 450mc. Possui alto módulo de elasticidade o que define alta rigidez para as peças fabricadas a partir dele. Sabe-se que uma das maiores vantagens da Polieterimida é que em altas temperaturas as propriedades mecânicas quase não variam, devido a sua grande estabilidade dimensional a sua forma estrutural é mantida mesmo elevando a temperatura (Stratasys, 2022).

Tabela 8: Polieterimida [PEI] – Propriedades intrínsecas

	Método de Teste	Unidade	XY
Tensão de Escoamento	ASTM D638	Mpa	47
Alongamento (Escoamento)	ASTM D638	%	2,2
Tensão de Ruptura	ASTM D638	Mpa	69
Alongamento	ASTM D638	%	5,8
Modulo Elástico	ASTM D638	GPa	2,1
Transição Vítre	ASTM D7426 Inflection Point	° C	105 °C

Dentre as aplicações típicas desse filamento destaca-se a prototipagem funcional para aplicações exigentes, gabaritos, acessórios e ferramentas compostas de alta resistência e a produção de peças de baixo volume e altamente customizadas. Na Figura 53 têm-se alguns exemplos de peças impressas com Filamento de Polieterimida pela impressora 3D Stratasys Fortus 450mc.



Figura 46: Peças impressas com filamento de Polieterimida

3.2 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS EM DIFERENTES MÁQUINAS E DIFERENTES POLÍMEROS

Antes de algumas amostras serem destinadas aos ensaios de caracterização mecânica foi realizado uma série de medidas com um paquímetro digital das dimensões da área de seção reduzida das amostras impressas de ABS M30 e Polieterimida (PEI) utilizando a máquina da Stratasys Fortus 450.

Este estudo dimensional tem o propósito analisar a variância dimensional das amostras e analisar os requisitos dimensionais indicado na norma ASTM D638. O modelo CAD foi projetado com base nas dimensões indicadas pela norma para uma amostra do tipo I, além das dimensões indicadas na Figura 47 é indicado um valor dimensional para a espessura do corpo de prova de $3,2 \pm 0,4$ mm.

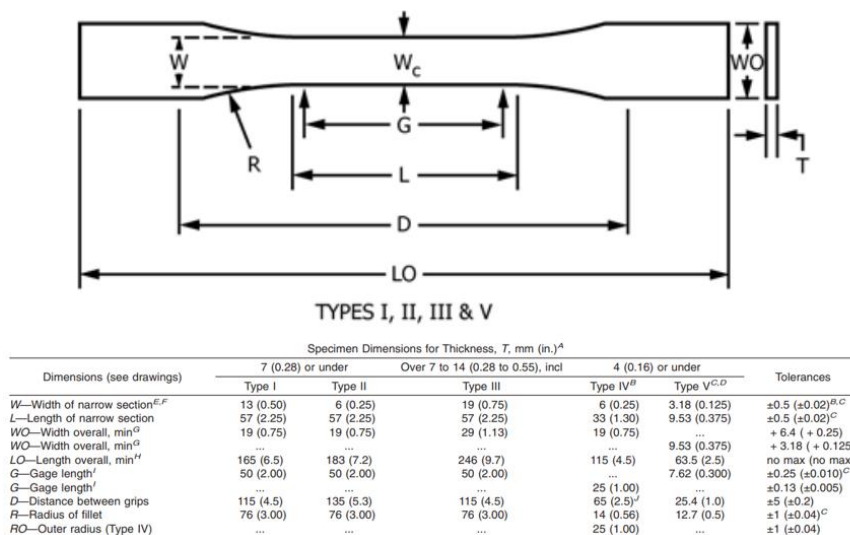


Figura 47: Dimensões das amostras conforme a norma (ASTM D638).

A área observada denominada de Gage Length, indicada como G na Figura 47 refere-se a área da amostra que é usada como referência ao longo da deformação do teste de tração para definição de alguns parâmetros e implica diretamente no cálculo de Tensão (N/mm^2) dos gráficos apresentados. Na Figura 48 é ressaltado as atividades realizadas para a caracterização dimensional das amostras.

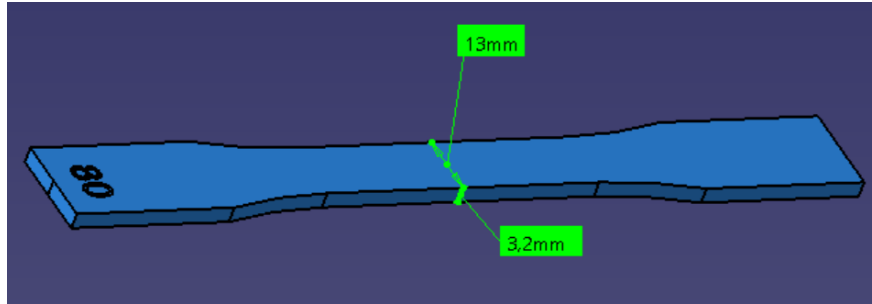


Figura 48: Modelo CAD

Foram analisadas as amostras impressas pela Stratasys Fortus 450mc construídas a partir de filamentos de ABS-M30 e Polieterimida (PEI). Para estas amostras foram parametrizados três diferentes tipos de percentual de preenchimentos disponíveis para o processo fabricação de 60%, 80% e 100%.

Em primeiro momento foi evidenciado em cada amostra pontos a serem medidos, vide Figura 49. Dessa forma foram executadas medidas na largura das amostras da área de seção reduzida (G), indicado em A, e da espessura da amostra, indicado em B. Cada medida foi realizada 3 vezes para assim encontrar uma média nos 6 diferentes pontos da área selecionada.

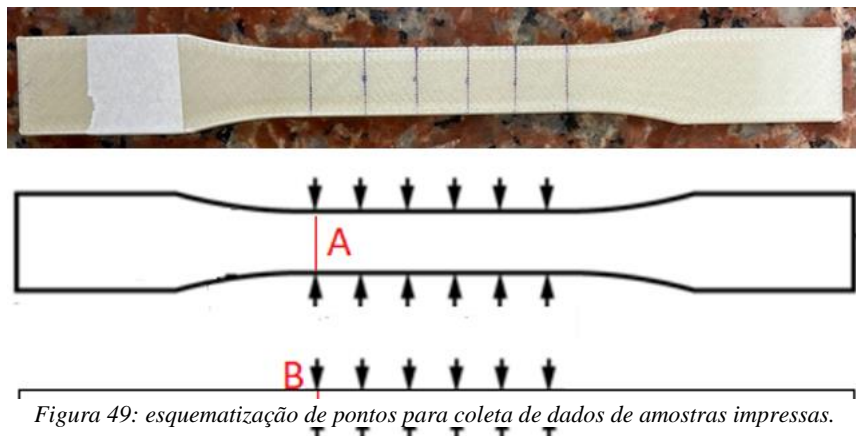


Figura 49: esquematização de pontos para coleta de dados de amostras impressas.

Para a obtenção da média das medidas é necessário atentar-se aos cálculos de incertezas associadas nas medidas obtidas. Sabe-se que o resultado de uma medição só estará completo se além do valor médio mensurada incluir também uma estimativa de incerteza desse valor. O paquímetro digital apresenta uma incerteza associada no valor de $\pm 0,01$ mm e para calcularmos o valor da incerteza da média do ponto foi utilizado a Equação 6:

$$\sigma_r = \sqrt{\left(\frac{dx_m}{dx_1} \cdot \sigma_{pd}\right)^2 + \left(\frac{dx_m}{dx_2} \cdot \sigma_{pd}\right)^2 + \left(\frac{dx_m}{dx_3} \cdot \sigma_{pd}\right)^2} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\text{Sendo: } \begin{cases} \sigma_{pd} = \text{incerteza do paquímetro digital;} \\ x_m = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \\ x_1 = \text{medida 1} \end{cases}$$

3.2.1 Análise de medidas das amostras de ABS M30 e de Polieterimida (PEI)

A partir das médias obtidas para cada ponto da amostra foram agrupadas as medidas realizadas no material de ABS M30 e Polieterimida (PEI). Para avaliar as amostras foi utilizado o método estatístico de análise para distribuição contínua sendo a Distribuição Normal ou Gaussiana. Os parâmetros caracterizadores desta distribuição são μ (média) e σ (desvio padrão). Para elaboração das curvas de distribuição as amostras impressas com o filamento de Polieterimida e ABS M30 foram considerada duas populações com $n = 90$ para cada. Posteriormente, foram levantados os parâmetros caracterizadores de cada população para a caracterização das amostras. Posteriormente, foi calculado o desvio padrão das amostras de cada filamento para análise do comportamento de cada material. Para o cálculo do desvio padrão foi utilizado a Equação 7. Após com os parâmetros estatísticos necessários foi construído as curvas de distribuição gaussiana.

$$\text{Desvio Padrão} = \sqrt{\frac{\sum(x_1 - x_m)^2}{n}} \quad \text{Equação (7)}$$

3.2.2 Análise da influência do grau de preenchimento

Após a análise por tipo de material, foram agrupadas as amostras de acordo com seu percentual de preenchimento. Desse modo foram avaliadas em um conjunto amostral as amostras com 60%, 80% e 100% de percentual de preenchimento das amostras de ABS M30 e Polieterimida (PEI). Para avaliar as amostras foi utilizado o método estatístico de análise para distribuição contínua sendo a Distribuição Normal ou Gaussiana. Os parâmetros caracterizadores desta distribuição são μ (média) e σ (desvio padrão). Para elaboração das curvas de distribuição as amostras impressas com 60%, 80% e 100% de percentual de preenchimento foram considerada populações com $n = 30$ para cada. Posteriormente, foram levantados os parâmetros caracterizadores de cada população para a caracterização das amostras. Desse modo, foi calculado o desvio padrão das amostras de cada filamento para análise do comportamento de cada percentual de preenchimento. Para o cálculo do desvio padrão foi utilizado a Equação 8. Após com os parâmetros estatísticos necessários calculados foi construído as curvas de distribuição gaussiana.

$$dp = \sqrt[2]{(x_1 - x_m)^2 + (x_2 - x_m)^2 + (x_3 - x_m)^2 + (x_4 - x_m)^2 + (x_5 - x_m)^2}$$

Equação (8)

Sendo: $\begin{cases} dp = \text{desvio padrão;} \\ x_1 = \text{m\u00e9dia de medida da amostra 1;} \\ x_m = \text{m\u00e9dia de medidas das amostras de mesmo par\u00e2metro de produ\u00e7\u00e3o} \end{cases}$

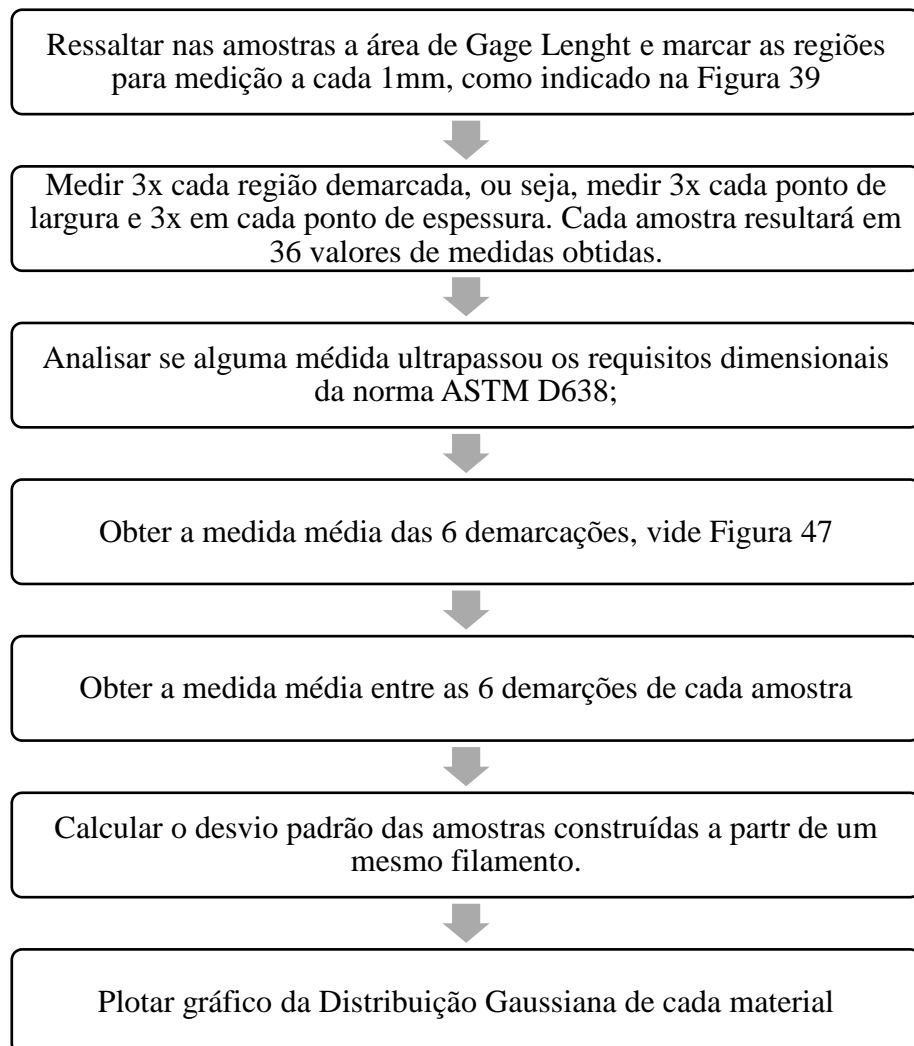


Figura 50: Fluxograma de atividades desenvolvidas para obten\u00e7\u00e3o de medidas.

3.3 AVALIA\u00c7\u00c3O DE PROPRIEDADES MEC\u00c2NICAS EM DIFERENTES M\u00c1QUINAS E DIFERENTES POLIMEROS

Para a caracterização mecânica dos corpos de prova, foi executado em cada amostra um teste de tração conforme a norma ASTM D638 -14. Esta norma tem como objetivo a caracterização mecânica dos polímeros reforçados ou não reforçados na forma de corpos de prova padronizados e tem suma importância para a caracterização dos materiais, pesquisas e desenvolvimento tecnológico. Para a construção das amostras foram utilizados três tipos de impressoras, a Stratasys Fortus 450mc, a GTMax Core GT4 e GTMax Core GT5.

A norma nos indica para a realização de teste pelo menos 5 amostras para cada caso em materiais isotrópicos. Para o caso de materiais anisotrópicos é indicado 5 amostras para cada eixo de anisotropia. Na Figura 51, é exemplificado a disposição e orientação recomendada para as amostras impressas. Porém, neste trabalho será discutido apenas as propriedades mecânicas de amostras produzidas no eixo XY.

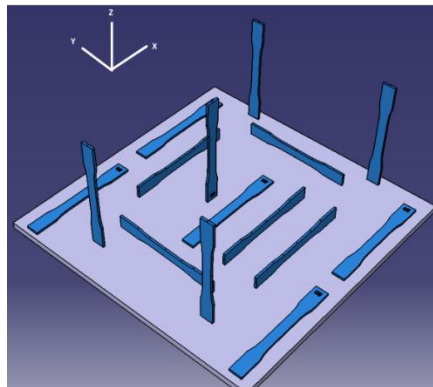


Figura 51: disposição das amostras na câmara de impressão

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada a máquina de modelo EMIC DL10000, indicada na Figura 52. Esta máquina tem capacidade máxima de 10.000kgf e realiza ensaios de Tração, Compressão e Flexão e é um equipamento considerado universal de ensaios.



Figura 52: a máquina de modelo EMIC DL10000 para a realização dos Ensaios de Tração

Desse modo, para cada corpo de prova impresso foi realizado um ensaio de tração.

A velocidade de teste indica a taxa relativa de movimento dos dispositivos que acoplam o corpo de prova no equipamento utilizado. para amostras do Tipo I a norma ASTM D638 indica um valor de $5 \pm 25\%$ mm/min.

É indicado um controle de temperatura em até 20°C e umidade de no máximo 60% para armazenar e realizar os testes e não influenciar nas propriedades intrínsecas dos polímeros.

Para o estudo das propriedades mecânicas foi realizado um levantamento de características a partir dos dados obtidos como a limite e resistência, percentuais de alongamento e modulo de elasticidade de cada amostra impressa afim de mapear o efeito de cada variável do processo.

— **Deformação e percentual de alongamento**

A razão entre o alongamento e o comprimento inicial do corpo de prova, ou seja, a mudança no comprimento por unidade de comprimento original. É expresso como uma razão adimensional e calculado a partir da Equação X, onde L = Comprimento Instantâneo [mm] e L_0 = Comprimento Inicial [mm]. E o alongamento percentual (%AL) é a porcentagem de deformação plástica na fratura.

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad \text{Equação (9)}$$

$$A\% = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad \text{Equação (10)}$$

— **Módulo de Elasticidade**

O módulo de elasticidade pode ser determinado a partir de uma relação linear da tensão e deformação, sendo a inclinação desse segmento linear o modulo de elasticidade. Porém, existem alguns materiais para os quais essa porção elástica não é linear, como nos resultados obtidos das amostras construídas por FDM. Desse modo, para maior assertividade nas comparações entre as propriedades mecânicas das amostras foi definido um valor fixo de deformação em 0,04mm. Com base neste ponto, foi realizada uma linearização a partir do conjunto de pontos anteriores, indicado pelo intervalo I na Figura 53. A partir do coeficiente angular desta linearização foi definido o valor do Módulo de Elasticidade em MPa, indicado em (b).

— **Limite de Resistência**

O Limite de resistência de um corpo de prova é definido a partir da divisão entre carga máxima sustentada pelo corpo de prova [N] pela área inicial da seção transversal no segmento de comprimento [m²].

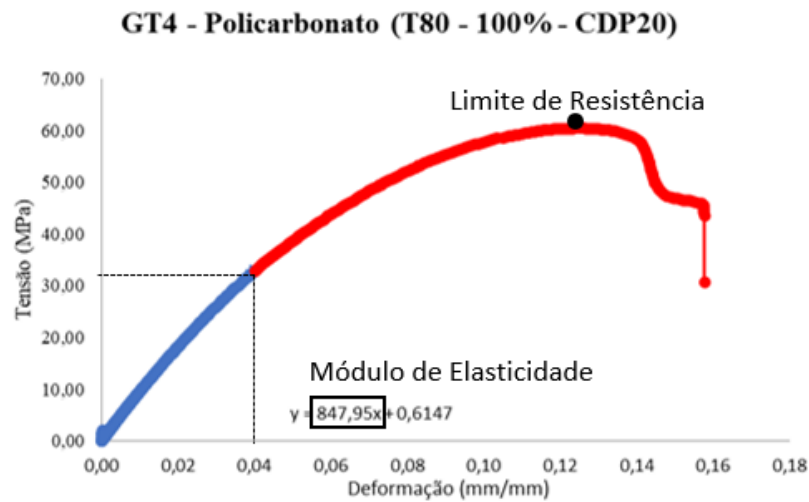


Figura 53: Gráfico para obtenção de dados

3.3.1 Comparação entre as amostras de filamentos de ABS M30 e Polieterimida (PEI) na impressora Stratasys Fortus 450mc

Utilizando a impressora da Stratasys Fortus 450mc foram utilizados 3 parâmetros de impressões diferentes para avaliar o comportamento mecânico de cada amostra em cada valor de preenchimento estabelecido. Desse modo foram impressas 5 amostras com 60% de preenchimento, 5 amostras com 80% de preenchimento e 5 amostras com 100% de preenchimento. O único parâmetro alternado nesta impressora foram os valores de preenchimento e para nível comparativo foram utilizados para a construção das amostras filamentos de ABS-M30 e Polieterimida (PEI) .

Com os dados obtidos é possível analisar o comportamento mecânico das amostras com as diferentes influências dos valores selecionados de preenchimento, como indicado na Figura 54.

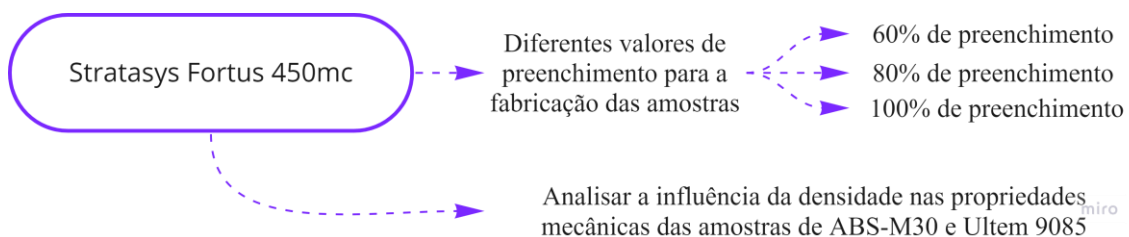


Figura 54: Esquematização de parâmetros selecionado para a obtenção de amostras construídas com a Stratasys

3.3.2 Comparação entre as amostras de filamento de ABS Premium, Policarbonato e Copoliéster impressas pela GTMax Core GT4

Com a impressora GTMax Core GT4 foram alternados duas variáveis processuais para a fabricação das amostras, sendo o valor de temperatura de mesa e o percentual de preenchimento na construção das amostras. Para o valor de temperatura de mesa foram utilizados valores em 40 °C e 80°C e os valores utilizados para preenchimento alternaram em 80% e 100%. Desse modo foram construídas:

- 5 amostras com uma temperatura de mesa em 40 °C e com 80% de preenchimento;
- 5 amostras com uma temperatura de mesa em 40 °C e com 100% de preenchimento;
- 5 amostras com uma temperatura de mesa em 80 °C e com 80% de preenchimento;
- 5 amostras com uma temperatura de mesa em 80 °C e com 100% de preenchimento.

Ao alternar esses dois parâmetros é constatado quatro modos processuais para a produção das amostras distintos e para nível comparativo foram utilizados na construção filamentos de ABS Premium, Policarbonato e Copoliéster.

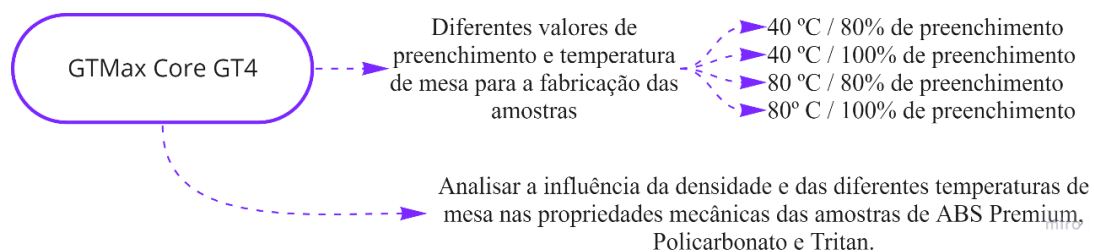


Figura 55: Esquematização de parâmetros selecionado para a obtenção de amostras construídas com a GTMax3D.

3.3.3 Comparação entre as amostras de filamento de Policarbonato pela GTMax Core GT5

Com a impressora GTMax Core GT5 foi alternado apenas o valor do preenchimento na construção das amostras, foi utilizado valores de 80% de preenchimento e 100% de preenchimento com uma temperatura de mesa em 110°C como indicado no Valor teórico de referência. Desse modo, foram fabricadas 5 amostras com 80% de preenchimento e 5 amostras com 100% de preenchimento com filamento de Policarbonato.

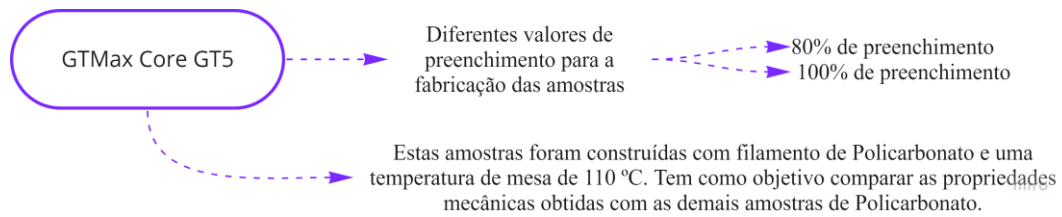


Figura 56: Esquematização de parâmetros selecionado para a obtenção de amostras construídas com a GT5.

4 RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DAS AMOSTRAS IMPRESSAS PELA STRATASYS FORTUS 450MC

4.1.1 Análise de medidas das amostras de ABS M30 e de Polietirimida (PEI)

A partir da obtenção das medidas dos comprimentos da área de sessão reduzida foi elaborado a Tabela 9 com as respectivas médias e desvios padrão. Todos os valores obtidos nas amostras se encontram nos apêndices desse trabalho.

Tabela 9: Média e desvio padrão de cada material

	Polieterimida (PEI) (± 0,02mm)	Desvio Padrão	ABS M30 (± 0,02mm)	Desvio Padrão
Média (A)	13,01	0,022	12,97	0,053
Média (B)	3,46	0,028	3,46	0,013

A Figura 58 revela que as médias do comprimento de área da seção reduzida das medidas do tipo A nas amostras impressas com o filamento de Polietirimida (PEI) apresentaram a média de menor diferença percentual, com um valor de 0,076% de diferença entre a média e o modelo matemático projetado e apresentaram o menor desvio padrão. Já as amostras impressas com ABS M30 apresentaram maior variância entre a média obtida e o modelo matemático, com um valor de 0,230% de variação. Percebe-se que para o eixo x, as amostras variaram pouco em relação ao modelo matemático. Com base no Apêndice A observa-se que as amostras construídas com o filamento de Polietirimida (PEI) apresentaram um desvio padrão de 0,022 e o maior valor de média obtida é $13,07 \pm 0,02$ mm e o menor valor obtido é $12,96 \pm 0,02$ mm. As amostras construídas a partir do filamento de ABS M30 apresentaram um desvio padrão de 0,053 e o maior valor de média obtida é $13,02 \pm 0,02$ mm e o menor valor obtido é

$12,94 \pm 0,02\text{mm}$. Desse modo, observa-se que a o maior valor percentual de variação entre os resultados obtidos e modelo matemático é 0,538% para o eixo x.

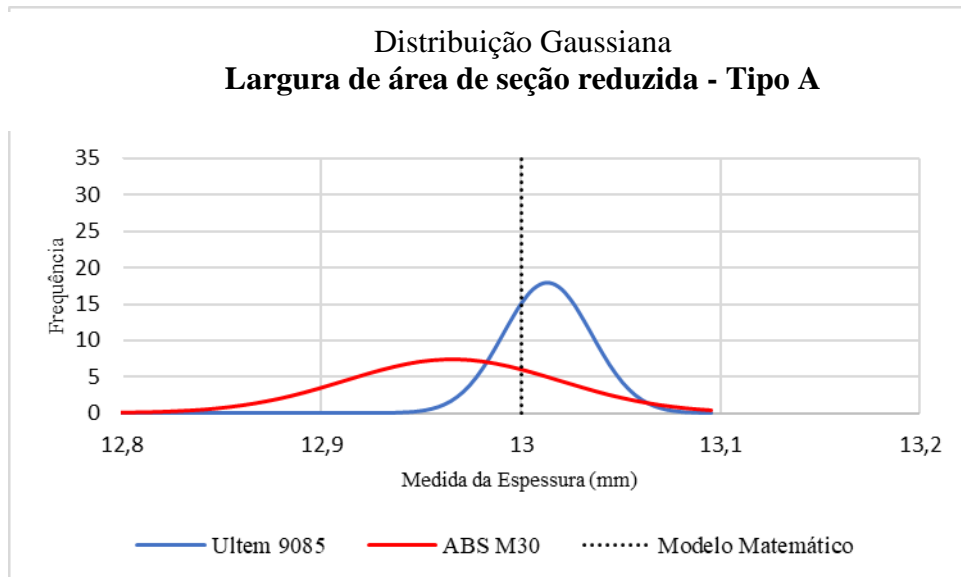


Figura 58: Distribuição Gaussiana – medidas do tipo A das amostras construídas com filamento de ABS M30 e Polietirimida (PEI).

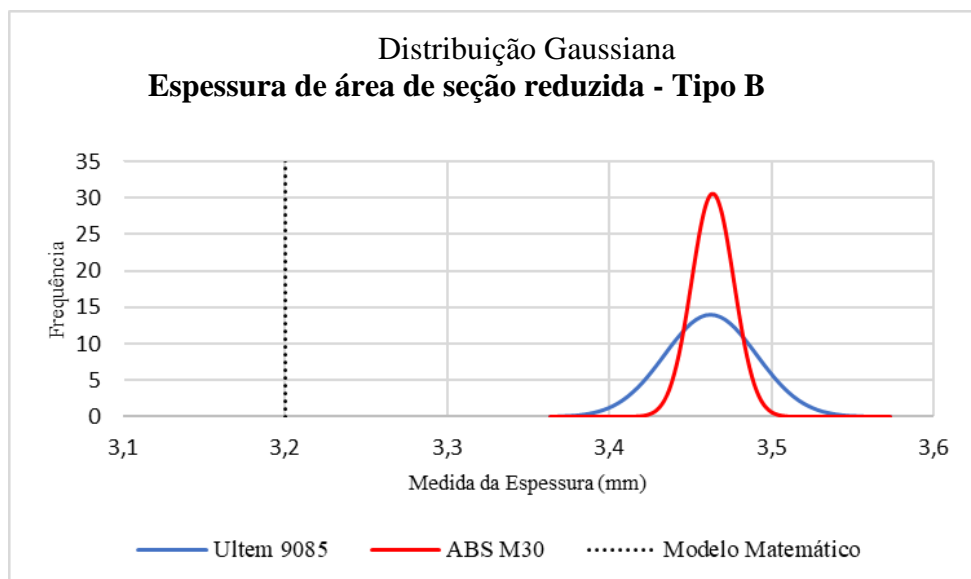


Figura 57: Distribuição Gaussiana – medidas do tipo B das amostras construídas com filamento de ABS M30 e Polietirimida (PEI)

Para as medidas do tipo B (Figura 57) revelaram que ambos os materiais apresentam a mesma média, com um valor de $3,45 \pm 0,02$ mm. Ambos os materiais apresentaram um valor de diferença percentual com o modelo matemático projetado de 8,13%. O Apêndice B demonstra que as amostras construídas com o filamento de ABS M30 apresentaram um desvio padrão de 0,013 e o maior valor de média obtida é $3,49 \pm 0,02$ mm e o menor valor obtido é

3,43 ± 0,02mm. As amostras construídas a partir do filamento de Polieterimida (PEI) apresentaram um desvio padrão de 0,028 e o maior valor de média obtida é 3,41 ± 0,02mm e o menor valor obtido é 3,52 ± 0,02mm. Desse modo, observa-se que a o maior valor percentual de variação entre os resultados obtidos e modelo matemático é 10% para o eixo z.

Observa-se que as medidas obtidas da espessura das amostras dos dois materiais estudados apresentam uma variação maior do modelo projetado do que ao comparar com os resultados obtidos das medidas da largura do material. Sabe-se que ao ser realizado a medida da espessura da amostra, é utilizado como apoio a superfície de maior rugosidade superficial como apoio, como indicado no capítulo 2.9.1.

4.1.2 Análise da influência do percentual de preenchimento

A Tabelas 10 e Tabela 11 revelam as médias dos comprimentos da área de seção reduzida obtidas nas amostras de ABS M30 e Polieterimida (PEI). Foi realizado um agrupamento por percentual de preenchimento para cada material. A Tabela 10 evidencia as médias obtidas do comprimento da área de seção reduzida do tipo A. Com auxílio dos gráficos indicados na Figura 59 observa-se que as amostras construídas a partir de filamentos de Polieterimida (PEI) apresentaram menor desvio padrão em relação as amostras construídas com ABS M30 para os comprimentos da área de seção reduzida do tipo A. As amostras que apresentaram menor desvio padrão foram as amostras construídas com 100% de percentual de preenchimento para ambos os materiais. Nota-se uma semelhança de comportamento nas amostras construídas com 60% e 100% de percentual de preenchimento fabricadas com filamento de ABS M30.

Tabela 10: média e desvio padrão das medidas do tipo A obtidas pelas amostras de ABS m30 e POLIETERIMIDA (PEI)

Percentual de preenchimento	ABS-M30		Polieterimida (PEI)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
60%	12,96	0,015	13,01	0,025
80%	12,97	0,043	13,01	0,029
100%	12,96	0,014	13,02	0,012

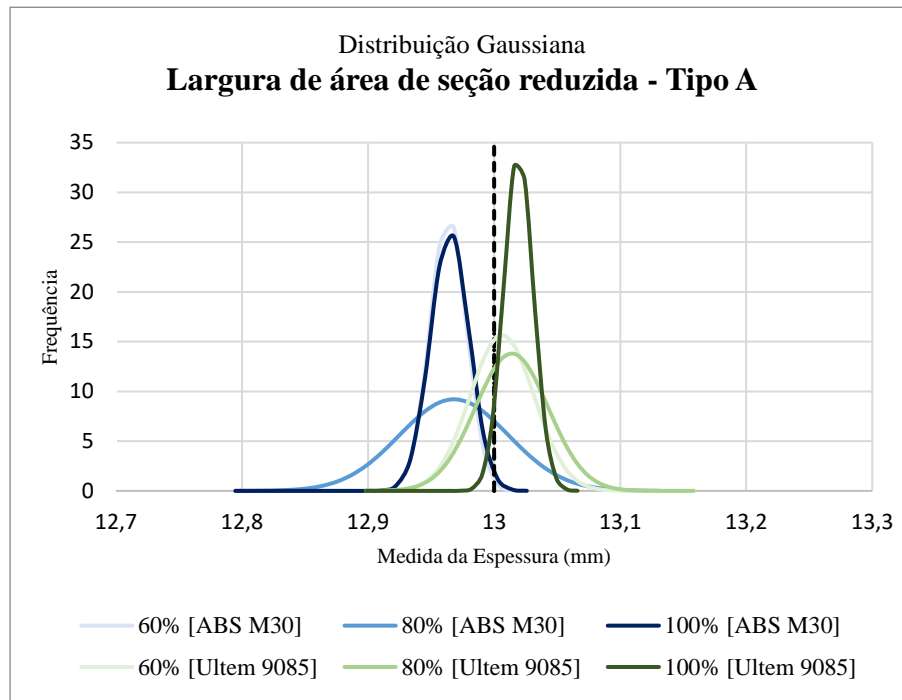
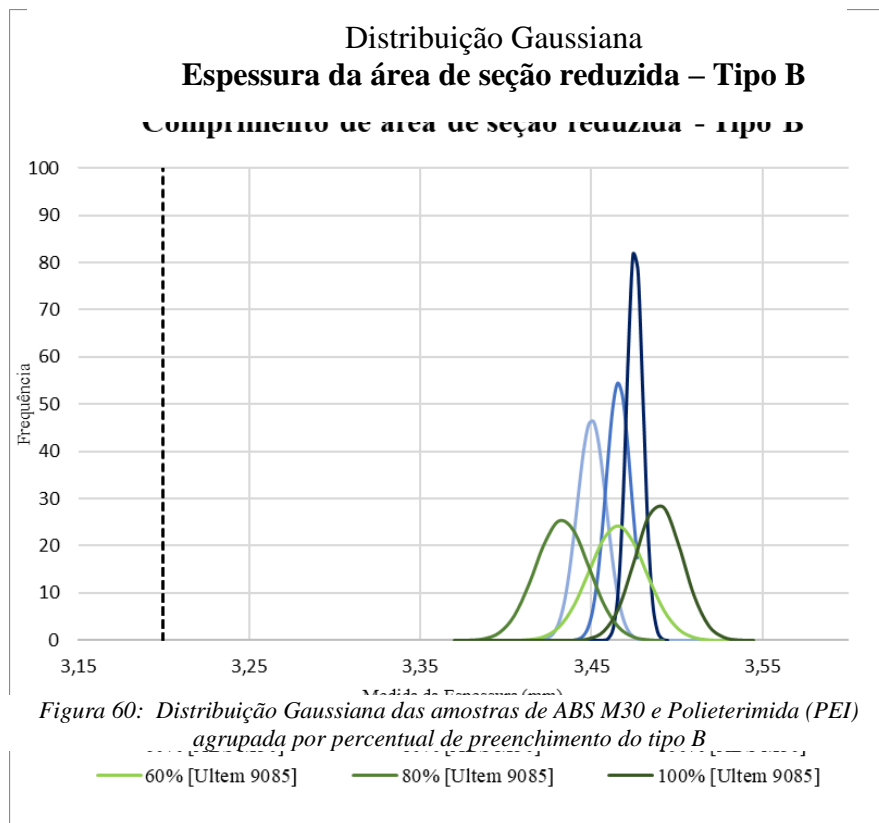


Figura 59: Distribuição Gaussiana das amostras de ABS M30 e Polietereimida (PEI) agrupada por percentual de preenchimento

A Tabela 11 evidencia as médias obtidas do comprimento da área de seção reduzida do tipo B. Com auxílio das curvas de distribuição indicadas na Figura 60 é notório que as amostras construídas a partir de filamentos de ABS M30 apresentaram menor desvio padrão em relação as amostras construídas com Polietereimida (PEI) para os comprimentos da área de seção reduzida do tipo B. As amostras que apresentaram menor desvio padrão foram as amostras construídas com 100% de percentual de preenchimento para ambos os materiais.

Tabela 11: média e desvio padrão das medidas do tipo B obtidas pelas amostras de ABS M30 e POLIETERIMIDA (PEI)

Percentual de preenchimento	ABS-M30		Polietereimida (PEI)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
60%	3,45	0,009	3,47	0,009
80%	3,47	0,008	3,43	0,007
100%	3,48	0,005	3,49	0,005



4.2 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECANICAS EM DIFERENTES MÁQUINAS E DIFERENTES POLIMEROS

4.2.1 Comparação entre as amostras de filamentos de ABS M30 e Polietirimida (PEI) na impressora Stratasys Fortus 450mc

Para mais detalhamento sobre as propriedades intrínsecas das peças impressas pela impressora 3D Stratasys Fortus 450mc foram desenvolvidos corpos de prova com filamentos de ABS M-30 e Polietirimida (PEI) com diferentes percentuais de preenchimento. Para comparação do comportamento mecânico entre as amostras, foram analisados dados como a Tensão de Escoamento, Modulo de Elasticidade e Alongamento de cada corpo de prova obtido através dos gráficos de tensão x deformação.

Amostras de filamento de ABS M-30

Para o desenvolvimento da Tabela 12 foi calculado o valor médio dos resultados obtidos e desvio padrão das amostras com 60%, 80% e 100% de percentual de preenchimento. Como discutido no capítulo 2.9.2, é esperado que as amostras de maior percentual de

preenchimento apresentem maior Módulo de Elasticidade e maior Limite de Resistência. Com base na Tabela 10 e na Figura 61 é notório que o Limite de Resistência e o Módulo de Elasticidade dos corpos de provas aumentaram com o aumento do percentual de preenchimento.

Tabela 12: Média e desvio padrão das amostras com filamento de ABS M-30

Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)	
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão
60%	20,44	0,26	0,485	0,010	4,2	0,1
80%	23,90	0,28	0,555	0,007	4,1	0,2
100%	27,94	0,48	0,665	0,016	4,3	0,2

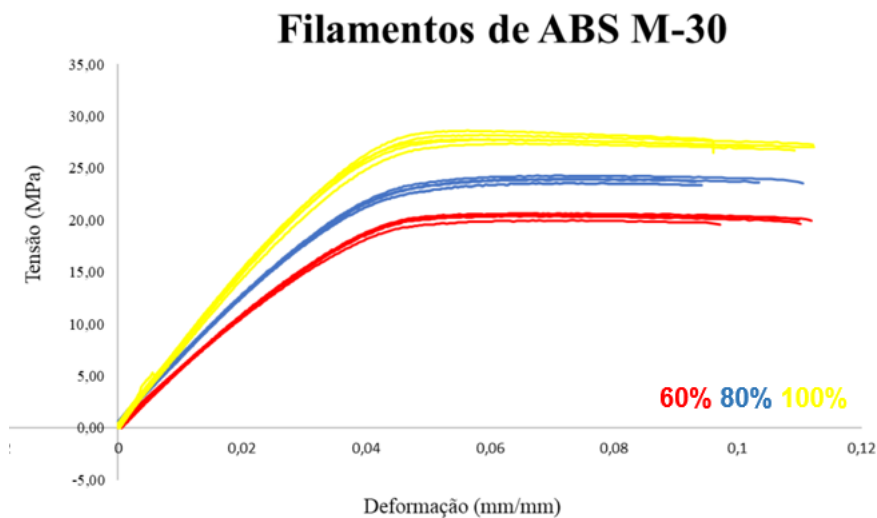


Figura 61: Gráfico de Tensão x Deformação de corpos de prova de filamento ABS M-30

Como pode ser observado os resultados obtidos variaram conforme o parâmetro de percentual de preenchimento do processo de fabricação das amostras de filamentos de ABS M30. Ao comparar as médias das amostras com 60% e 80% de preenchimento com a média dos resultados obtidos das amostras com 100% observa-se que o valor em média do limite de resistência para as amostras com 60% variou 26,9% e as amostras de 80% variaram 14,5%, o valor em média do módulo de elasticidade para as amostras com 60% variaram 27,1% e as amostras de 80% variaram 16,5% e o valor em média do alongamento para as amostras com 60% variaram 2,9% e as amostras de 80% variaram 5,1%. Diante a essas comparações entre os comportamentos obtidos percebe-se que os resultados não são necessariamente atrelados ao percentual de percentual de preenchimento.

A Tabela 13 apresenta os dados obtidos das amostras com 100% de preenchimento e os valores indicados pelo valor teórico de referência. Percebe-se que o limite de resistência

obteve uma variação de 6,90%, próximo do esperado. Porém, para o módulo de elasticidade e o alongamento das amostras indicaram percentuais com grande variação devido ao método de obtenção da medida e a falta de extensômetros no ensaio.

Tabela 13: Comparativo entre os resultados obtidos das amostras com 100% de percentual de preenchimento e Datasheet

	Valor teórico de referência	Média	Diferença Percentual
Limite de Resistência (MPa)	30,00	27,94	6,90%
Modulo de Elasticidade (GPa)	2,4	0,665	78,80%
Alongamento (%)	8,1	4,3	47,00%

Amostras de filamento de POLIETERIMIDA (PEI)

Para o desenvolvimento da Tabela 14 foi calculado o valor médio dos resultados obtidos e desvio padrão das amostras com 60%, 80% e 100% de percentual de preenchimento de filamento de Polieterimida (PEI). Como discutido, é esperado que as amostras de maior percentual de preenchimento apresentem maior módulo de elasticidade e maior limite de resistência.

Tabela 14: Propriedade Mecânica dos filamentos de POLIETERIMIDA (PEI)

Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)		Modulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)	
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão
60%	24,97	10,55	0,493	0,024	4,1	0,1
80%	23,76	0,20	0,558	0,002	4,0	0,0
100%	32,60	12,20	0,654	0,014	4,0	0,0

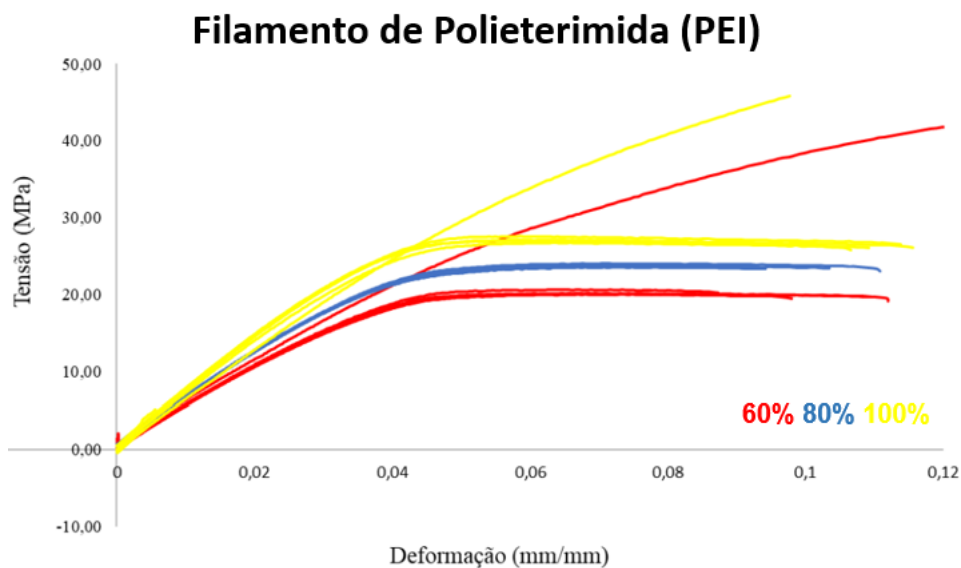


Figura 62: Gráfico de Tensão x Deformação de corpos de prova de filamento POLIETERIMIDA (PEI)

As amostras que mostraram menor desvio padrão em seu alongamento, sua tensão de escoamento e módulo de elasticidade foram as amostras com 80% de percentual de preenchimento, pois, o CDP01 com 60% de preenchimento, e o CDP15 com 100% de preenchimento, mostraram um comportamento diferenciado das demais amostras, como indicado no gráfico e no modo de falha como indicado na Figura 63. Esses são considerados pontos fora da curva, nesses dois casos pode ter ocorrido alguma mudança durante o processo, como por exemplo, a mudança na taxa de deposição do material, a temperatura do bico de extrusão, a temperatura da câmara de impressão ou do vácuo a mesa, são inúmeras variáveis do processo que podem ter interferido naquele instante que resultaram nessas diferenças comportamentais para as amostras de Polieterimida (PEI).



Figura 63: Modo de fraturas das demais fraturas, CDP01 e CDP15

Baseado nos resultados obtidos nas Tabela 14, desconsiderando as duas amostras que mostraram um comportamento atípico das demais amostras (CDP01 e CDP15), observa-se que os valores da diferença percentual da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade variaram de 25-27% para as amostras construídas com 60% de preenchimento e para em relação à tensão de escoamento e módulo de elasticidade das amostras com 80% de preenchimento houve uma variação de 12-15%.

A Tabela 15 apresenta os dados obtidos das amostras com 100% de preenchimento e os valores indicados pelo *datasheet*. Percebe-se que o limite de resistência obteve uma variação de 52,8%, um valor abaixo do esperado. Para este caso é necessário mapear o processo de impressão e analisar qual a diferença entre o indicado pela empresa, para este caso pode haver uma oportunidade de otimização processual. Porém para o módulo de elasticidade e o alongamento das amostras indicaram percentuais com grande variação devido ao método de obtenção da medida e a falta de extensômetros no ensaio.

Tabela 15: Comparativo entre os resultados obtidos das amostras com 100% de percentual de preenchimento e Datasheet

	Valor teórico de referência	Média	Diferença Percentual
Limite de Resistência (MPa)	69,00	32,60	52,8%
Modulo de Elasticidade (GPa)	2,1	0,654	68,9%
Alongamento (%)	5,8	4,0	31,0%

4.2.2 Comparação entre as amostras de filamento de ABS Premium, Policarbonato e Copoliéster impressas pela GTMax Core GT4

Para mais detalhamento sobre as propriedades intrínsecas das peças impressas pela impressora 3D GTMax Core GT4 foram construídos corpos de prova com filamentos de ABS Premium, Policarbonato e Copoliéster com diferentes percentuais de preenchimento e diferentes valores definidos em temperatura de mesa. As amostras foram impressas com 80% e 100% de preenchimento com uma temperatura de mesa em 40 °C ou 80 °C. Para conferência do comportamento mecânico entre as amostras, foram analisados dados como a Tensão de Escoamento, Módulo de Elasticidade e Alongamento de cada corpo de prova obtido através dos gráficos de tensão x deformação.

Amostras de filamento de ABS Premium

A Tabela 16 e 17 apresentam as médias das propriedades mecânicas obtidas a partir dos corpos de prova construído com o filamento de ABS Premium com 80% ou 100% de percentual de preenchimento e com uma temperatura de mesa em 40 °C ou 80 °C. Com os resultados obtidos nas Figura 64 e Figura 65, observa-se a Tensão de Escoamento, o Módulo de Elasticidade e o Alongamento dos corpos de provas variam conforme seu processamento. Os resultados de cada corpo de prova estão no apêndice ao final deste trabalho.

A Tabela 16 nos revela que as amostras impressas com 80% de percentual de preenchimento e processadas em uma temperatura de mesa em 80 °C apresentaram um valor de propriedades mecânicas superiores e menor desvio padrão em relação aos valores das amostras impressas com uma temperatura de mesa de 40 °C. Para o limite de resistência e o modulo de elasticidade houve uma variação entre as amostras de 15% e 5% para o alongamento.

Tabela 16: Médias obtidos das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 80% de percentual de preenchimento

Temperatura de mesa	Limite de Resistência (MPa)		Modulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)		
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Valor teórico de referência
40 °C	39,18	1,79	0,626	0,030	10,2	0,5	12,0
80 °C	46,58	1,30	0,745	0,025	11,4	0,6	12,0

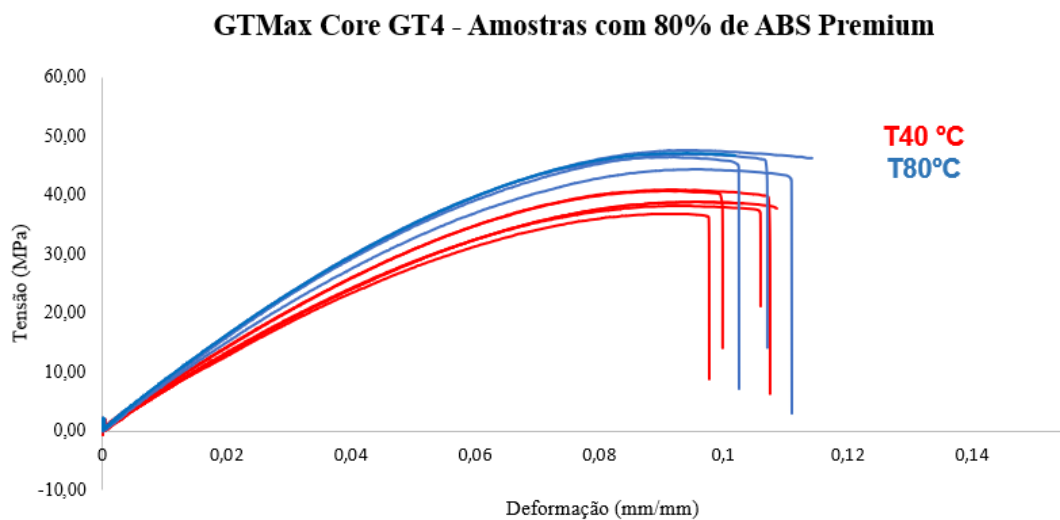


Figura 64: gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 80% de percentual de preenchimento

A Tabela 17 nos mostra que as amostras impressas com 100% de percentual de preenchimento e processadas em uma temperatura de mesa em 80 °C apresentaram valores de propriedades mecânicas superiores aos valores das amostras impressas com uma temperatura de mesa de 40 °C. Para o limite de resistência houve uma variação de 25%, para o módulo de elasticidade houve uma variação de 18% e para o alongamento houve uma variação de 11% entre as amostras processadas com 40°C e 80°C.

Tabela 17: Médias obtidos das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 100% de percentual de preenchimento

Temperatura de mesa	Limite de Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)		
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Valor teórico de referência
40 °C	41,63	7,21	0,695	0,016	10,2	3,0	12,0
80 °C	55,17	1,22	0,850	0,02	11,4	0,8	12,0

GTMax Core GT4 - Amostras com 100% de ABS Premium

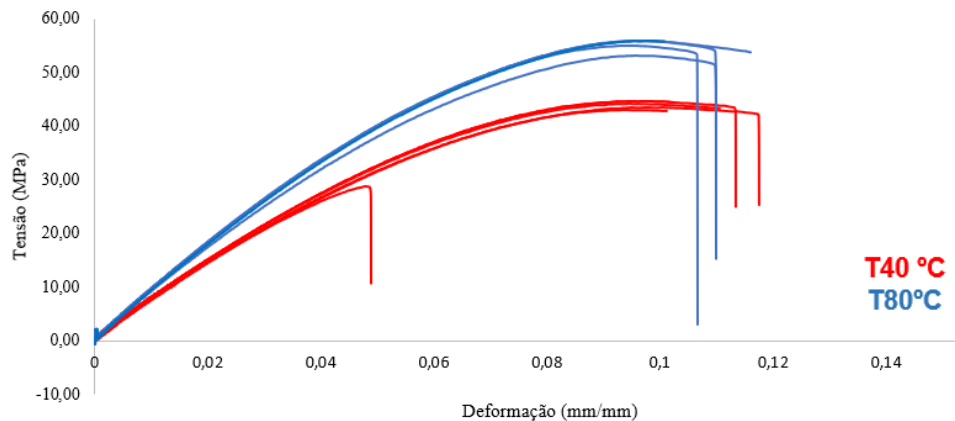


Figura 65: Gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de ABS Premium com 100% de percentual de preenchimento

Amostras de filamento de Policarbonato

A Tabela 18 e 19 apresentam as propriedades mecânicas obtidas a partir de cada corpo de prova construído com o filamento de Policarbonato com 80% ou 100% de percentual de preenchimento e com uma temperatura de mesa em 40 °C ou 80 °C. Com os resultados obtidos nas Figura 66 e Figura 67, observa-se a Tensão de Escoamento, o Módulo de Elasticidade e o Alongamento dos corpos de provas variam conforme seu processamento. Os resultados de cada corpo de prova estão no apêndice ao final deste trabalho.

A Tabela 18 nos revela que as amostras impressas com 80% de percentual de preenchimento e processadas em uma temperatura de mesa em 80 °C apresentaram um valor de limite de resistência e módulo de elasticidade superiores aos valores das amostras impressas com uma temperatura de mesa de 40 °C. O alongamento das amostras para este caso mostrou-se maior para as amostras obtidas com 40 °C. Para o limite de resistência houve uma variação de 4%, para o módulo de elasticidade houve uma variação de 1% e para o alongamento houve uma variação de 17% entre as amostras processadas com 40°C e 80°C.

Tabela 18: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 80% de percentual de preenchimento

Temperatura de mesa	Limite de Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)		
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Valor teórico de referência
40 °C	50,61	1,682	0,726	0,029	13,2	2,2	14,5
80 °C	52,24	1,569	0,728	0,034	11,0	0,6	14,5

GTMax Core GT4 - Amostras com 80% de Policarbonato

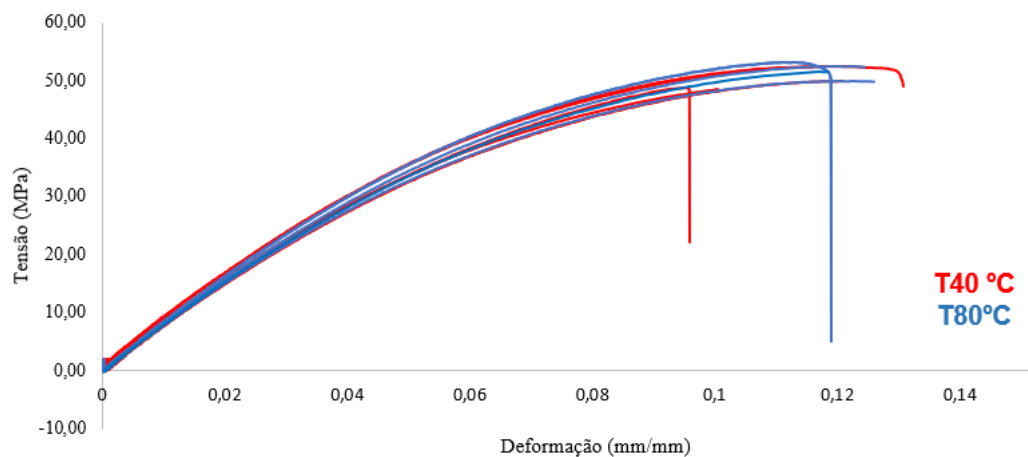


Figura 66: gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 80% de percentual de preenchimento

A Tabela 19 nos mostra que as amostras impressas com 100% de percentual de preenchimento e processadas em uma temperatura de mesa em 80 °C apresentaram médias de limite de resistência e alongamento superiores aos valores das amostras impressas com uma temperatura de mesa de 40 °C. Para o limite de resistência houve apenas uma variação de 0,5%, para o módulo de elasticidade houve uma variação de 0,3% e para o alongamento houve uma variação de 6,0% entre as amostras processadas com 40°C e 80°C.

Tabela 19: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 100% de percentual de preenchimento

Temperatura de mesa	Limite de Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)		
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Valor teórico de referência
40 °C	58,57	2,90	0,808	0,047	13,7	0,9	14,5
80 °C	56,89	6,19	0,810	0,022	11,4	0,6	14,5

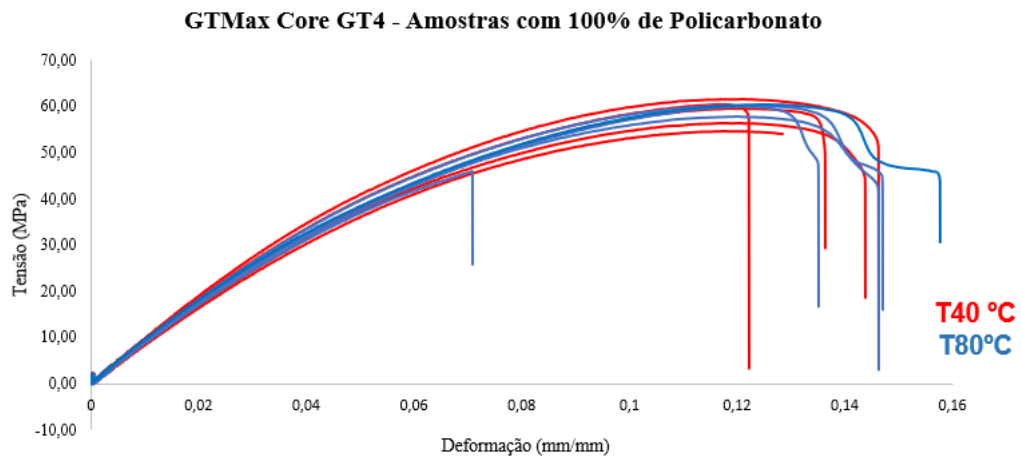


Figura 67: Gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Policarbonato com 100% de percentual de preenchimento

Baseado nos dados obtidos das amostras impressas com filamentos de Policarbonato observa-se baixos valores de variações percentuais em relação à temperatura de mesa de seu processamento apresentando valores de variação abaixo de 1% acompanhado de um desvio padrão maior que as demais, mostrando que não há uma certa uniformidade ao variar as temperaturas de mesa em 40°C e 80°C, diferentemente dos resultados obtidos com o filamento de ABS Premium, que nitidamente nos gráficos mostram as diferenças comportamentais entre os processos. Observa-se que as amostras impressas com filamentos de Policarbonato e apresentaram maior influência para o limite de resistência e módulo de elasticidade a seleção de percentual de preenchimento encontrado na amostra do material. Ao variar a temperatura de mesa entre 40°C e 80°C o material permanece com o mesmo comportamento devido a alta estabilidade térmica encontrada, para os filamentos de policarbonato, têm-se como valor teórico de referencial a Tg uma temperatura de 110°C.

Amostras de filamento de Copoliéster

A Tabela 20 e 21 apresentam as propriedades mecânicas obtidas a partir de cada corpo de prova construído com o filamento de Copoliéster com 80% ou 100% de percentual de preenchimento e com uma temperatura de mesa em 40 °C ou 80 °C. Com os resultados obtidos nas Figura 68 e Figura 69 é exposto que a Tensão de Escoamento, o Módulo de Elasticidade e o Alongamento dos corpos de provas variam conforme seu processamento. Os resultados de cada corpo de prova estão no apêndice ao final deste trabalho.

A Tabela 20 nos revela que as amostras impressas com 80% de percentual de preenchimento e processadas em uma temperatura de mesa em 80 °C apresentaram um valor de limite de resistência e módulo de elasticidade superiores aos valores das amostras impressas com uma temperatura de mesa de 40 °C. O alongamento das amostras para este caso mostrou-se maior para as amostras obtidas com 40 °C. Para o limite de resistência houve uma variação de 7,5%, para o módulo de elasticidade houve uma variação de 2,0% e para o alongamento houve uma variação de 5,0% entre as amostras processadas com 40°C e 80°C.

Tabela 20: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 80% de percentual de preenchimento

Temperatura de mesa	Limite de Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)		
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Valor teórico de referência
40 °C	30,76	0,88	0,450	0,013	18,2	2,3	21,0%
80 °C	33,25	0,73	0,459	0,010	17,3	1,4	21,0%

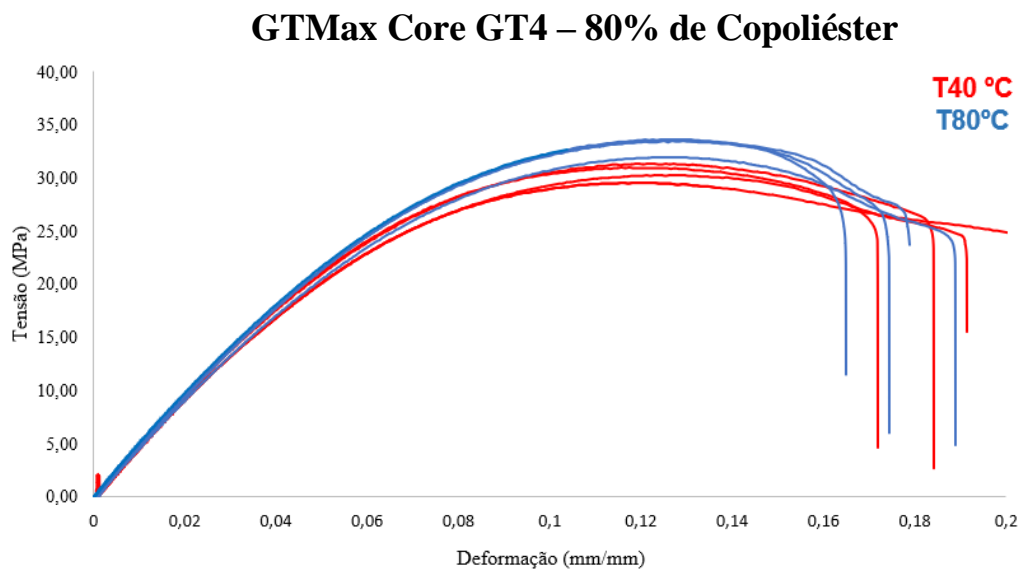


Figura 68: gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 80% de percentual de preenchimento

A Tabela 21 nos mostra que as amostras impressas com 100% de percentual de preenchimento e processadas em uma temperatura de mesa em 80 °C apresentaram médias de

limite de resistência e alongamento superiores aos valores das amostras impressas com uma temperatura de mesa de 40 °C, diferentemente do caso encontrado para o ABS Premium nestas condições. Para o limite de resistência houve uma variação de 1,9%, para o módulo de elasticidade houve uma variação de 1,8% e para o alongamento houve uma variação de 7,5% entre as amostras processadas com 40°C e 80°C.

Tabela 21: Médias obtidas das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 100% de percentual de preenchimento

Temperatura de mesa	Limite de Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)		
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Valor teórico de referência
40 °C	34,74	0,72	0,498	0,010	17,4	1,4	21,0
80 °C	35,43	0,79	0,489	0,020	16,1	1,0	21,0

GTMax Core GT4 – 100% de Copoliéster

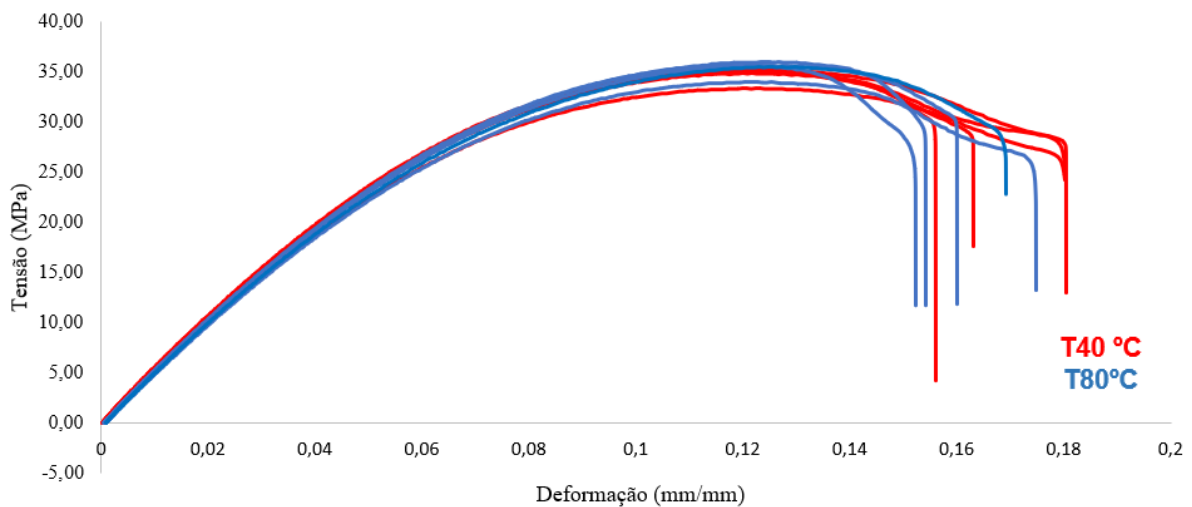


Figura 69: Gráfico Tensão x Deformação das amostras impressas com filamento de Copoliéster com 100% de percentual de preenchimento

Desse modo, observa-se que assim como as amostras impressas com filamento de Policarbonato as amostras impressas com filamentos de Copoliéster na impressora GTMax Core GT4 apresentam maior influência sobre o limite de resistência e módulo de elasticidade o parâmetro selecionado de percentual de preenchimento no processamento das amostras. Ao variar a temperatura de mesa entre 40°C e 80°C o material permanece com o mesmo comportamento devido à alta estabilidade térmica encontrada, para os filamentos de copoliéster,

têm-se como valor teórico de referencial a Tg uma temperatura de 120°C, revelando um material com uma grande estabilidade térmica.

Cada material apresentou uma particularidade em relação ao processo de fabricação selecionado e diferentes valores de desvio padrão. Se um conjunto de amostras expressar um desvio padrão alto, significa que os parâmetros definidos podem resultar em amostras com maior variabilidade comportamental mecânica, aumentando a dificuldade para encontrar valores mais assertivos para aqueles parâmetros.

4.2.3 Comparação entre as amostras de filamento de Policarbonato impressas pela GTMax Core GT5

Com o mesmo material utilizado para as amostras construídas a partir do Policarbonato na GTMax Core GT4 foram fabricadas amostras na impressora GTMax Core GT5, onde o volume da câmara de impressão é maior, porém, as variáveis de processos permanecem iguais. Nestas amostras, foram impressas 5 amostras com 80% de percentual de preenchimento e com 100% de percentual de preenchimento, nestas a temperatura de mesa foi mantida fixa em um valor de 110°C.

A Tabela 22 indica o valor médio dos resultados obtidos e desvio padrão das amostras com 80% e 100% de percentual de preenchimento de corpo de prova construído com o filamento de Policarbonato na impressora 3D GTMax Core GT5.

Tabela 22: Resultados obtidos das médias das amostras impressas com filamento de Policarbonato com a Temperatura de Mesa igual a 110 °C

Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)		Modulo de Elasticidade (GPa)		Alongamento (%)	
	Média das amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão	Amostras	Desvio padrão
80%	42,56	2,53	0,614	0,017	11,0	3,09
100%	50,79	3,85	0,684	0,065	12,4	1,77

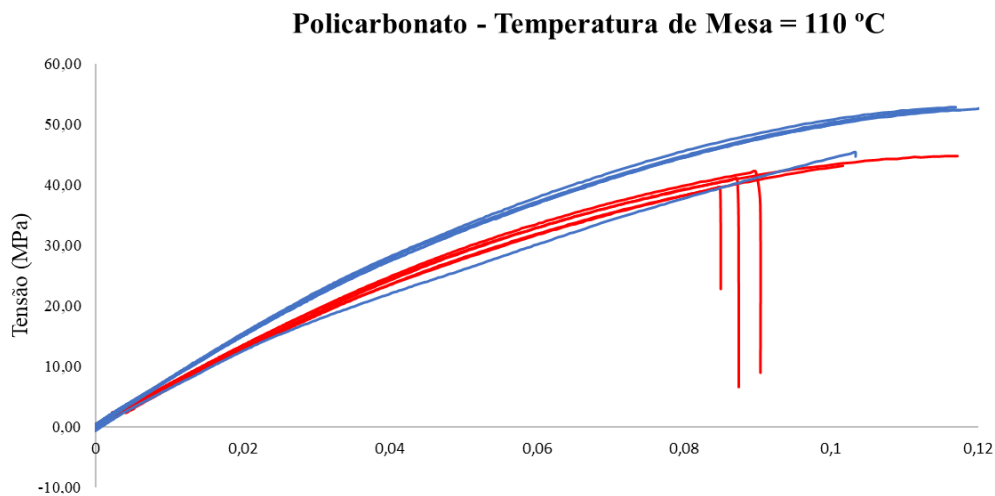


Figura 70: Gráfico de tensão e deformação das amostras de Policarbonato construídas na GTMax Core GT5

As amostras que mostraram maior desvio padrão no valor de tensão de escoamento e módulo de elasticidade foram as amostras impressas com 100% de percentual de preenchimento, assim como as outras amostras. Ao analisar o gráfico é notório uma curva de percentual de preenchimento de 100% com um comportamento diferencial das demais amostras de mesmo modo de processamento.

Ao analisar os resultados obtidos observa-se que as amostras fabricadas com 100% de preenchimento apresentaram em média um valor superior aos valores das propriedades mecânicas das amostras com 80% de preenchimento. Para o limite de escoamento, o percentual da diferença entre as amostras é de 16,2%. Em relação ao alongamento apresentado, o percentual da diferença comportamental é de 11,4%. Em relação ao módulo de elasticidade o material apresentou uma variação comportamental de 10,3%.

Ao compararmos os resultados das médias obtidas com o filamento de policarbonato impressos na GTMax Core GT4 e impressos na GTMax Core GT5 percebe-se que houve uma variação, onde todos os dados obtidos pela impressora GTMax Core GT5 se apresentaram inferiores. Sabe-se que o volume (m²) de câmara de impressão da impressora GTMax Core GT5 é maior que a câmara de impressão da impressora GTMax Core GT4, desse modo, todas as variáveis de processos variam e influenciam de modo diferente do encontrado nos estudos realizado da GTMax Core GT5. Cada parâmetro, cada característica influenciam diretamente nos resultados, esses são produtos de uma série de combinação de fatores na impressão 3D.

5 CONCLUSÃO

Analisando os dados obtidos verifica-se uma diferença entre os resultados ao variar de impressora, de parâmetros de impressão e de materiais de filamentos. Para cada variável alternada foi observado uma influência nas dimensões e no comportamento mecânico das amostras impressas a partir do método de FDM. Para os próximos parágrafos é importante salientar que ao mencionar que ao aumentar ou diminuir certo fator se obtém um determinado resultado, está se apenas a referir aos níveis estudados e não a uma generalização, cada impressão apresenta uma grande particularidade de processo e por isso há uma variância entre os resultados, até mesmo para aqueles com os mesmos parâmetros definidos.

Em relação as propriedades dimensionais das amostras, baseado nos resultados obtidos das médias das medidas realizadas na área de seção reduzida foi observado uma particularidade para cada material. Para as medidas do Tipo A, as amostras impressas com o filamento de Polieterimida (PEI) além de apresentar a menor diferença percentual com o projetado, as amostras de filamento de Polieterimida apresentaram menor desvio padrão, tendo resultados mais uniforme dentre cada parâmetro. Já as amostras de ABS M30 apresentaram uma média maior de diferença percentual com o projeto CAD e um desvio padrão maior em relação ao Polieterimida (PEI).

Em relação aos resultados das medidas do tipo B foi revelado que para ambos os materiais as amostras apresentaram o mesmo valor para a média amostral. Sobre a diferença percentual entre as medidas obtidas e o projetado no modelo CAD, sabe-se que ao ser realizado a medida da espessura da amostra, é utilizado como apoio a superfície de maior rugosidade superficial como apoio.

Ao analisar as médias obtidas para cada percentual de preenchimento é observa-se que as amostras que apresentaram menor desvio padrão foram as amostras construídas com 100% de percentual de preenchimento para ambos os materiais.

Em relação as propriedades mecânicas, com a impressora Stratasys Fortus 450mc foram impressas amostras de ABS-M30 e Polieterimida (PEI), para essas amostras foi alternado os valores de percentual de preenchimento e foi observado que ao aumentar a percentual de preenchimento, fatores como a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade aumentam.

Com a impressora GTMax Core GT4 foram impressas amostras de ABS Premium, de Policarbonato e Copoliéster. Nesta impressora os parâmetros alternados foram a temperatura de mesa e a percentual de preenchimento no processo de fabricação das amostras.

Observa-se que as amostras impressas com filamentos de Policarbonato e Copoliéster na impressora GTMax Core GT4 apresentaram maior influência para o limite de resistência e módulo de elasticidade a seleção de percentual de preenchimento encontrado na amostra do material. Ao variar a temperatura de mesa entre 40°C – 80°C o material permanece com o mesmo comportamento devido à alta estabilidade térmica encontrada nos materiais em questão.

Na impressora GTMax Core GT5 foram impressas amostras com 80% e 100% de percentual de preenchimento com uma temperatura de mesa fixa em 110 °C. Sabe-se que os valores obtidos pela Impressora GTMax Core GT5 são inferiores aos resultados das amostras impressas pela GTMax Core GT4. Observa-se que o volume (m²) de câmara de impressão da impressora GTMax Core GT5 é maior que a câmara de impressão da impressora GTMax Core GT4, devido a este fato o isolamento térmico da máquina da GT5 não é superior ao da GT4, podendo haver maior dissipação de calor devido ao maior volume, além, da potência de operação da GT5 será a mesma indicando que o aquecimento passivo do volume de impressão é mais deficiente comparado com o volume de impressão menor.

Visto, todas as variáveis de processos variam e influenciam de modo diferente do encontrado nos estudos realizado da GTMax Core GT4. Cada parâmetro, cada característica influenciam diretamente nos resultados, esses são produtos de uma série de combinação de fatores na impressão 3D, o que torna cada impressora um processo único.

REFERÊNCIAS

- Akcelrud, Leni. 2007. *Fundamentos da ciência dos polímeros*. Barueri : Manole, 2007.
- ALTIPARMAK, S. C. e XIAO, B. 2021. *A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry*. . 2021 : *Journal of Manufacturing Processes*, 2021. v. 68, p. 728–738.
- ASTM D638. *Standard Test Method for Tensile Properties of*. USA : s.n. 2003.
- BARTZAK, Z., GALESKI, A. 2010. *Plasticity of Semicrystalline Polymers*. s.l. : In: *Macromolecular Symposium*, 2010. pp. pp. 67–90.
- Brydson, J. A. 1999. *Plastics Materials* . Oxford : Butterwoth-Heinemann, 1999.
- Callister, William. 2018. *Ciência e engenharia de materiais : uma introdução / William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch ; tradução Sergio Murilo Stamile Soares*. Rio de Janeiro : LTC, 2018.
- Canevarolo, Sebastião V. 2002. *Ciência dos PolímerosÇ um texto basico para tecnólogos e engenheiros*. São Paulo : Artliber, 2002.
- CARROCCIO, Sabrina, PUGLISI, Concetto e MONTAUDO, Giorgio. 2011. *Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2011.
- CHANDA, M. e ROY, S. K. 1987. *Plastics Technology Handbook*. New York : Marcel Dekker Inc, 1987.
- Conti, P., Cianetti, F. e P. Pileri. 2018. **Parametric Finite Elements Model of SLM Additive Manufacturing process**. *Procedia Structural Integrity*. 2018, pp. 410-421.
- CUNICO, MARLON. 2015. *Impressoras 3D: o novo meio produtivo*. Curitiba : Concep3D Pesquisas Científicas Ltda, 2015.
- Decarli, Nicolás Oliveira. 2018. *SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE DERIVADOS ACILADOS DO POLÍMERO POLI(ÉTER IMIDA) (ULTEM 1000)*. Florianópolis : Programa de Pós-Graduação em Química na UFSC, 2018.
- EASTMAN. 2022. *The Glass Polymer. Eastman Tritan copolyester Heat Resistant and chemically compatible*. [Online] 29 de Junho de 2022.
https://www.eastman.com/Literature_Center/S/SPMBS1538.pdf.
- Fernandes, João Francisco Miranda. 2016. *Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA*. Lisboa : s.n., 2016.
- Gotro, Jeffrey. 2017. **Characterization of Thermosets Part 20: Tensile Testing Part One**. *Polymer Innovation Blog*. [Online] 02 de Outubro de 2017.
<https://polymerinnovationblog.com/characterization-thermosets-part-20-tensile-testing-part-one/>.
- G'SELL, C., DAHOUN, A. 1994. *Evolution of microstructure in semi-crystalline polymers under large plastic deformation*. s.l. : Materials Science and Engineering, 1994. pp. pp.183-199. Vol. v. 175.

- GT Max 3D. Filamento de Tritan. [Online] [Citado em: 24 de Maio de 2022.] <https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/tritan/175mm-gtmax3d-preto>.
- GTMax 3D. Filamento de Policarbonato. [Online] [Citado em: 24 de outubro de 2022.] <https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/policarbonato/175mm-gtmax3d-transparente>.
- . IMPRESSORA 3D PRO - GTMAX3D CORE GT4. [Online] [Citado em: 01 de Maio de 2022.] <https://www.gtmax3d.com.br/imprensa-3d-pro/gtmax3d-core-gt4-simplify3d>.
- GTMax3D. 2022. FILAMENTO POLICARBONATO (PC) 1.75MM GTMAX3D - TRANSPARENTE 1KG. *GTMax 3D*. [Online] 28 de Junho de 2022. <https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/policarbonato/175mm-gtmax3d-transparente>.
- Hornberger, L. E. e Devries, K. L. 1997. *The Effects of Residual Stress on the Mechanical Properties of Glassy Polymers*. s.l. : Polymer Engineering and Science, Volume 27, 1997.
- Jaarsma, Thijs. 2002. *Copoliéster - uma escolha versátil para aplicações médicas*. s.l. : Briefing de negócios: Fabricação e tecnologia de dispositivos médicos., 2002.
- Jefferson, J. M. e Chatterjee, Debduitta. 2021. *A review on polymeric materials in additive manufacturing*. s.l. : Materials Today Proceedings, 2021. pp. 1349-1365. Vols. volume 46, part 2.
- JIANG, Wei et al. 2014. *Polyetherimide nanocomposite foams as an ablative for*. s.l. : Composites Part B: Engineering,, 2014.
- Kutz, M. 2001. *Handbook of materials selection*. Nova York : Wiley, 2001.
- Leonhardt, Rodrigo Gheno. 2018. *PRODUÇÃO DE MEMBRANAS DE POLIETERIMIDA (PEI)/POLIANILINA (PANI) E ANÁLISE DO SEU DESEMPENHO NA PERMEAÇÃO DE GASES*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL : DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2018.
- LIU, G. et al. 2021. . *Additive manufacturing of structural materials*. s.l. : Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021. . v. 145, p. 100596, jul. .
- M.A. Yardimci, S. Gucer. 1996. *Conceptual Framework for the Thermal Process Modelling of Fused Deposition*. s.l. : Rapid Prototyp , 1996. pp. 26-31. Vol. Vol 2.
- Melo, N. S. 2004. *Comportamento mecânico do policarbonato exposto a radiação gama*. Rio de Janeiro : Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, 2004.
- NAJMON, J. C., RAEISI, S. e TOVAR, A. 2019. *Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry*. In: *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. . p. 7–31. : Elsevier, 2019. p. 7–31. , 2019.
- RELVAS, C. 2018. *O mundo da impressão 3D e do fabrico digital*. Produção de Comunicação, : Porto:, 2018.
- Ribeiro, Guilherme Portilho. 2018. *Caracterização Mecânica de Estruturas Manufaturadas por Adição de Material Termoplástico com diferentes níveis e formas de preenchimento*. Brasília, DF : s.n., 2018.

- Ronkay, F. 2013. *Effect os Recycling on the Rheological, Mechanical and Optical Properties of Polycarbonate*. s.l. : Acta Polytechnica Hungarica, 2013.
- Rouf, Saquib, et al. 2022. **Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications**,. 2022, Vol. volume 3.
- Sanchez, Miguel. 2021. *Construção de equipamento para obtenção de filamentos para impressão 3D: um estudo com copolimero ABS e microm*. São Paulo : s.n., 2021.
- Shaquour, B. 2016. *Developing an Additive Manufacturing Machine*. 2016.
- Shigley, Joseph e Mischke, Charles. 2000. *Joseph Shigley (Autor), Charles Mischke*. s.l. : McGraw Hill; 6ª edição, 2000.
- Sood, Anoop K., Ohdar, Raj K. e Mahapatra, Siba S. 2012. *“Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement*. s.l. : Journal of Advanced Research,, 2012.
- Stratasys. [Online] [Citado em: 01 de Maio de 2022.] <https://www.stratasys.com/br/materials/search/ultem9085>.
- . Ficha de dados - ABS-M30. [Online] Stratasys.[Citado em: 01 de Maio de 2022.] <https://www.stratasys.com/br/materials/search/abs-m30>.
- . 2022. materials: Ultem 1010 resin. *stratasys*. [Online] 29 de 06 de 2022. <https://www.stratasys.com/br/materials/search/ultem1010>.
- . Stratasys Fortus 450mc. [Online] Stratasys.[Citado em: 01 de Maio de 2022.] <https://www.stratasys.com/br/3d-printers/fortus-450mc>.
- Turner, B.N., Strong, R. e S.A Gold. 2014. *Review of Melt Extrusion Additive Part I: Process Design and Modeling*. s.l. : Rapid Prototyp, 2014.
- Vasudevarao, Bharath, Natarajan, Dharm Prakash e Henderson, Mark. 2000. *Sensitivity of RP Surface Finish to Process Parameter Variation*. Austin : Solid Freeform Fabrication Porceedings. Conferência: 11th Solid Freeform Fabrication Symposium, 2000.
- VAYRE, B., VIGNAT, F. e VILLENEUVE, F. 2012. *Designing for Additive Manufacturing*. v. 3, p. 632–637 : Procedia CIRP,, 2012.
- Volpato, Neri. 2017. *Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo : Blucher, 2017.
- Watanabe, N., et al. 2016. *A Model for Residual Stress and Part Warpage Prediction in Material Extrusion with Application to Polypropulene Composite Materials*. Austin : Solid Freeform Fabrication Symposium, 2016. pp. 8-10.
- YASA, E. e ERSOY, K. 2018. *Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites*. InTech : Aircraft Technology, 2018. 2018. .
- YOUNG, R.J. 1974. A dislocation model for yield in polyethylene'. [A. do livro] *Philosophical*. v. 30. 1974, pp. pp. 85-94.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Medida da largura da área de seção reduzida das amostras impressas pela Stratasys Fortus 450mc com filamento de ABS

Amostr a	Percentual de preenchiment o (%)	Ponto	Medida 1 ($\pm 0,01$ mm)	Medida 2 ($\pm 0,01$ mm)	Medida 3 ($\pm 0,01$ mm)	Média ($\pm 0,02$ mm)
1	60	1	13,00	12,98	12,99	12,99
1	60	2	12,98	12,96	12,95	12,96
1	60	3	12,97	12,96	12,95	12,96
1	60	4	12,98	12,96	12,95	12,96
1	60	5	12,97	12,96	12,95	12,96
1	60	6	12,97	12,98	12,97	12,97
2	60	1	12,97	12,99	12,99	12,98
2	60	2	12,98	12,96	12,98	12,97
2	60	3	12,97	12,96	12,98	12,97
2	60	4	12,97	12,95	12,98	12,97
2	60	5	12,98	12,95	12,98	12,97
2	60	6	12,98	12,98	12,98	12,98
3	60	1	12,99	12,98	12,99	12,99
3	60	2	12,97	12,96	12,98	12,97
3	60	3	12,97	12,96	12,98	12,97
3	60	4	12,97	12,98	12,98	12,98
3	60	5	12,97	12,98	12,98	12,98
3	60	6	12,99	12,99	12,98	12,99
4	60	1	12,95	12,96	12,96	12,96
4	60	2	12,93	12,95	12,94	12,94
4	60	3	12,93	12,95	12,94	12,94
4	60	4	12,93	12,95	12,94	12,94
4	60	5	12,93	12,95	12,94	12,94
4	60	6	12,93	12,95	12,94	12,94
5	60	1	12,94	12,97	12,97	12,96
5	60	2	12,95	12,95	12,96	12,95
5	60	3	12,95	12,95	12,96	12,95
5	60	4	12,95	12,95	12,95	12,95
5	60	5	12,95	12,95	12,96	12,95
5	60	6	12,96	12,96	12,97	12,96
1	80	1	13,02	13,02	13,02	13,02

1	80	2	13,01	13,01	13,02	13,01
1	80	3	13,02	13,01	13,01	13,01
1	80	4	13,02	13,00	13,01	13,01
1	80	5	13,02	13,01	13,01	13,01
1	80	6	13,03	13,02	13,01	13,02
2	80	1	13,01	13,00	13,00	13,00
2	80	2	12,97	12,97	12,97	12,97
2	80	3	12,98	12,99	12,99	12,99
2	80	4	12,96	12,97	12,97	12,97
2	80	5	12,98	12,98	12,99	12,98
2	80	6	12,99	12,99	12,13	12,70
3	80	1	12,99	13,00	13,00	13,00
3	80	2	12,98	12,99	12,98	12,98
3	80	3	12,99	12,99	12,97	12,98
3	80	4	12,98	12,99	12,97	12,98
3	80	5	13,00	12,98	12,98	12,99
3	80	6	13,00	12,13	12,99	12,71
4	80	1	13,03	13,02	13,02	13,02
4	80	2	13,02	13,01	13,02	13,02
4	80	3	13,01	13,02	13,02	13,02
4	80	4	13,00	13,00	13,02	13,01
4	80	5	13,01	13,00	13,02	13,01
4	80	6	13,02	13,02	13,03	13,02
5	80	1	13,00	12,99	12,13	12,71
5	80	2	12,98	12,98	12,98	12,98
5	80	3	12,98	12,98	12,98	12,98
5	80	4	12,98	12,98	12,98	12,98
5	80	5	12,98	12,98	12,98	12,98
5	80	6	12,98	12,98	12,98	12,98
1	100	1	12,98	12,97	12,98	12,98
1	100	2	12,96	12,96	12,95	12,96
1	100	3	12,97	12,95	12,95	12,96
1	100	4	12,95	12,95	12,95	12,95
1	100	5	12,95	12,95	12,95	12,95
1	100	6	12,95	12,95	12,95	12,95
2	100	1	12,95	12,97	12,97	12,96
2	100	2	12,95	12,95	12,95	12,95
2	100	3	12,95	12,95	12,95	12,95
2	100	4	12,93	12,95	12,95	12,94

2	100	5	12,94	12,95	12,95	12,95
2	100	6	12,94	12,95	12,95	12,95
3	100	1	12,98	12,98	12,97	12,98
3	100	2	12,96	12,97	12,96	12,96
3	100	3	12,96	12,97	12,97	12,97
3	100	4	12,98	12,98	12,98	12,98
3	100	5	12,98	12,99	12,98	12,98
3	100	6	12,99	13,00	12,99	12,99
4	100	1	12,98	12,97	12,97	12,97
4	100	2	12,95	12,95	12,96	12,95
4	100	3	12,96	12,95	12,95	12,95
4	100	4	12,96	12,95	12,95	12,95
4	100	5	12,95	12,94	12,95	12,95
4	100	6	12,96	12,95	12,95	12,95
5	100	1	13,02	13,00	13,00	13,01
5	100	2	13,00	13,00	12,99	13,00
5	100	3	12,99	13,00	12,99	12,99
5	100	4	12,99	12,99	12,98	12,99
5	100	5	12,95	12,96	12,96	12,96
5	100	6	12,97	12,97	12,97	12,97

**APÊNDICE B – Medida da largura da área de seção reduzida das amostras impressas
pela Stratasys Fortus 450mc com filamento de Polietirimida (PEI)**

Amostra	Percentual de preenchimento (%)	Ponto	Medida 1 (± 0,01 mm)	Medida 2 (± 0,01 mm)	Medida 3 (± 0,01 mm)	Média (± 0,02 mm)
1	60	1	13,03	13,03	13,03	13,03
1	60	2	13,04	13,03	13,02	13,03
1	60	3	13,03	13,03	13,03	13,03
1	60	4	13,03	13,03	13,03	13,03
1	60	5	13,03	13,03	13,03	13,03
1	60	6	13,03	13,03	13,03	13,03
2	60	1	13,01	13,01	13,02	13,01
2	60	2	13,01	13,02	13,02	13,02
2	60	3	13,01	13,02	13,02	13,02
2	60	4	13,02	13,02	13,02	13,02
2	60	5	13,02	13,02	13,02	13,02
2	60	6	13,02	13,02	13,02	13,02
3	60	1	13,00	13,00	13,01	13,00
3	60	2	13,00	13,00	13,01	13,00
3	60	3	13,00	13,01	13,01	13,01
3	60	4	13,00	13,01	13,01	13,01
3	60	5	13,00	13,02	13,01	13,01
3	60	6	13,01	13,02	13,01	13,01
4	60	1	12,96	12,96	12,96	12,96
4	60	2	12,97	12,96	12,96	12,96
4	60	3	12,97	12,97	12,96	12,97
4	60	4	12,96	12,96	12,97	12,96
4	60	5	12,96	12,96	12,97	12,96
4	60	6	12,96	12,99	12,96	12,97
5	60	1	13,00	13,00	13,00	13,00
5	60	2	13,02	13,02	13,01	13,02
5	60	3	13,02	13,02	13,02	13,02
5	60	4	13,02	13,02	13,02	13,02
5	60	5	13,02	13,02	13,02	13,02
5	60	6	13,00	13,00	13,00	13,00
1	80	1	12,99	13,00	13,00	13,00
1	80	2	13,00	13,00	13,00	13,00
1	80	3	13,00	13,00	13,00	13,00
1	80	4	13,00	13,00	13,01	13,00

1	80	5	13,00	13,00	13,00	13,00
1	80	6	13,00	13,00	12,99	13,00
2	80	1	13,00	13,00	13,01	13,00
2	80	2	13,01	13,01	13,01	13,01
2	80	3	13,01	13,02	13,00	13,01
2	80	4	13,01	13,01	13,01	13,01
2	80	5	13,01	13,00	13,01	13,01
2	80	6	13,01	13,00	13,01	13,01
3	80	1	13,05	13,05	13,06	13,05
3	80	2	13,07	13,07	13,07	13,07
3	80	3	13,07	13,07	13,07	13,07
3	80	4	13,06	13,07	13,08	13,07
3	80	5	13,06	13,07	13,08	13,07
3	80	6	13,06	13,07	13,06	13,06
4	80	1	13,00	12,99	12,98	12,99
4	80	2	13,00	13,00	13,00	13,00
4	80	3	13,00	13,00	13,00	13,00
4	80	4	13,00	13,00	13,00	13,00
4	80	5	13,00	13,00	12,98	12,99
4	80	6	13,00	12,99	12,98	12,99
5	80	1	13,00	13,00	13,02	13,01
5	80	2	13,00	13,00	13,00	13,00
5	80	3	13,00	13,00	13,00	13,00
5	80	4	13,00	13,00	13,00	13,00
5	80	5	13,00	13,00	13,00	13,00
5	80	6	13,00	13,00	13,00	13,00
1	100	1	13,03	13,01	13,01	13,02
1	100	2	13,03	13,02	13,02	13,02
1	100	3	13,03	13,01	13,03	13,02
1	100	4	13,03	13,02	13,03	13,03
1	100	5	13,03	13,00	13,01	13,01
1	100	6	13,03	13,03	13,02	13,03
2	100	1	13,04	13,04	13,04	13,04
2	100	2	13,03	13,03	13,03	13,03
2	100	3	13,04	13,04	13,04	13,04
2	100	4	13,04	13,04	13,04	13,04
2	100	5	13,04	13,04	13,04	13,04
2	100	6	13,04	13,04	13,04	13,04
3	100	1	13,01	13,01	13,00	13,01
3	100	2	13,00	13,02	13,01	13,01
3	100	3	13,01	13,01	13,00	13,01
3	100	4	13,01	13,01	13,01	13,01
3	100	5	13,01	13,01	13,01	13,01

3	100	6	13,02	13,00	13,01	13,01
4	100	1	13,02	13,01	13,01	13,01
4	100	2	13,02	13,01	13,02	13,02
4	100	3	13,02	13,01	13,02	13,02
4	100	4	13,02	13,01	13,02	13,02
4	100	5	13,01	13,01	13,01	13,01
4	100	6	13,03	13,02	13,01	13,02
5	100	1	13,00	13,01	13,01	13,01
5	100	2	13,01	13,01	13,01	13,01
5	100	3	13,01	13,01	13,01	13,01
5	100	4	13,01	13,01	13,02	13,01
5	100	5	13,01	13,01	13,02	13,01
5	100	6	13,01	13,01	13,01	13,01

**APÊNDICE C – Medida da espessura da área de seção reduzida das amostras impressas
pela Stratasys Fortus 450mc com filamento de ABS M30**

Filamento de ABS - Stratasys						
Amostra	Percentual de preenchimento (%)	Ponto	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Média (mm)
1	60	1	3,45	3,44	3,45	3,45
1	60	2	3,44	3,44	3,44	3,44
1	60	3	3,44	3,43	3,43	3,43
1	60	4	3,44	3,44	3,44	3,44
1	60	5	3,45	3,45	3,44	3,45
1	60	6	3,45	3,44	3,45	3,45
2	60	1	3,45	3,45	3,45	3,45
2	60	2	3,44	3,44	3,44	3,44
2	60	3	3,44	3,44	3,45	3,44
2	60	4	3,43	3,44	3,44	3,44
2	60	5	3,45	3,44	3,44	3,44
2	60	6	3,44	3,44	3,44	3,44
3	60	1	3,46	3,45	3,46	3,46
3	60	2	3,44	3,45	3,45	3,45
3	60	3	3,44	3,45	3,45	3,45
3	60	4	3,44	3,45	3,45	3,45
3	60	5	3,45	3,46	3,45	3,45
3	60	6	3,45	3,46	3,45	3,45
4	60	1	3,46	3,47	3,46	3,46
4	60	2	3,45	3,48	3,46	3,46
4	60	3	3,46	3,47	3,46	3,46
4	60	4	3,45	3,48	3,46	3,46
4	60	5	3,48	3,47	3,46	3,47
4	60	6	3,45	3,46	3,45	3,45
5	60	1	3,45	3,46	3,45	3,45
5	60	2	3,45	3,46	3,46	3,46
5	60	3	3,45	3,45	3,46	3,45
5	60	4	3,45	3,45	3,45	3,45
5	60	5	3,45	3,45	3,45	3,45
5	60	6	3,45	3,46	3,45	3,45
1	80	1	3,46	3,46	3,47	3,46
1	80	2	3,45	3,47	3,47	3,46

1	80	3	3,46	3,47	3,47	3,47
1	80	4	3,44	3,46	3,46	3,45
1	80	5	3,45	3,46	3,46	3,46
1	80	6	3,45	3,46	3,46	3,46
2	80	1	3,47	3,47	3,48	3,47
2	80	2	3,46	3,46	3,46	3,46
2	80	3	3,46	3,47	3,46	3,46
2	80	4	3,46	3,47	3,46	3,46
2	80	5	3,48	3,47	3,47	3,47
2	80	6	3,48	3,47	3,47	3,47
3	80	1	3,48	3,48	3,48	3,48
3	80	2	3,49	3,48	3,48	3,48
3	80	3	3,49	3,48	3,49	3,49
3	80	4	3,46	3,46	3,47	3,46
3	80	5	3,46	3,47	3,46	3,46
3	80	6	3,48	3,48	3,49	3,48
4	80	1	3,48	3,47	3,47	3,47
4	80	2	3,46	3,47	3,47	3,47
4	80	3	3,46	3,47	3,48	3,47
4	80	4	3,46	3,45	3,47	3,46
4	80	5	3,46	3,46	3,48	3,47
4	80	6	3,47	3,46	3,47	3,47
5	80	1	3,44	3,46	3,46	3,45
5	80	2	3,45	3,47	3,47	3,46
5	80	3	3,44	3,46	3,47	3,46
5	80	4	3,45	3,46	3,47	3,46
5	80	5	3,44	3,47	3,47	3,46
5	80	6	3,44	3,46	3,47	3,46
1	100	1	3,48	3,48	3,48	3,48
1	100	2	3,48	3,48	3,48	3,48
1	100	3	3,47	3,48	3,47	3,47
1	100	4	3,49	3,48	3,47	3,48
1	100	5	3,47	3,47	3,47	3,47
1	100	6	3,48	3,47	3,47	3,47
2	100	1	3,48	3,48	3,47	3,48
2	100	2	3,47	3,47	3,47	3,47
2	100	3	3,47	3,47	3,47	3,47
2	100	4	3,47	3,48	3,47	3,47
2	100	5	3,47	3,47	3,47	3,47

2	100	6	3,47	3,47	3,47	3,47
3	100	1	3,47	3,47	3,47	3,47
3	100	2	3,47	3,47	3,48	3,47
3	100	3	3,47	3,47	3,47	3,47
3	100	4	3,47	3,47	3,48	3,47
3	100	5	3,46	3,46	3,46	3,46
3	100	6	3,48	3,48	3,46	3,47
4	100	1	3,48	3,48	3,49	3,48
4	100	2	3,48	3,48	3,49	3,48
4	100	3	3,48	3,48	3,48	3,48
4	100	4	3,48	3,48	3,48	3,48
4	100	5	3,48	3,48	3,49	3,48
4	100	6	3,49	3,48	3,48	3,48
5	100	1	3,47	3,47	3,48	3,47
5	100	2	3,48	3,47	3,48	3,48
5	100	3	3,47	3,47	3,48	3,47
5	100	4	3,48	3,47	3,47	3,47
5	100	5	3,48	3,48	3,47	3,48
5	100	6	3,48	3,49	3,48	3,48

APÊNDICE D – Medida da espessura da área de seção reduzida das amostras impressas pela Stratasys Fortus 450mc com filamento de Polietirimida (PEI)

Filamento de Polietirimida (PEI) - Stratasys					
Amostra	Percentual de preenchimento (%)	Ponto	Medida 1 (± 0,01 mm)	Medida 2 (± 0,01 mm)	Média (± 0,02 mm)
1	60	1	3,46	3,45	3,46
1	60	2	3,47	3,46	3,47
1	60	3	3,46	3,46	3,46
1	60	4	3,46	3,46	3,46
1	60	5	3,46	3,46	3,46
1	60	6	3,46	3,46	3,46
2	60	1	3,47	3,46	3,47
2	60	2	3,46	3,46	3,46
2	60	3	3,48	3,46	3,47
2	60	4	3,49	3,48	3,49
2	60	5	3,46	3,46	3,46
2	60	6	3,47	3,46	3,47
3	60	1	3,47	3,48	3,48
3	60	2	3,48	3,48	3,48
3	60	3	3,48	3,48	3,48
3	60	4	3,48	3,48	3,48
3	60	5	3,48	3,48	3,48
3	60	6	3,51	3,50	3,51
4	60	1	3,44	3,44	3,44
4	60	2	3,44	3,44	3,44
4	60	3	3,44	3,43	3,44
4	60	4	3,44	3,44	3,44
4	60	5	3,44	3,44	3,44
4	60	6	3,45	3,44	3,45
5	60	1	3,47	3,46	3,47
5	60	2	3,50	3,52	3,51
5	60	3	3,46	3,51	3,49
5	60	4	3,46	3,46	3,46
5	60	5	3,46	3,46	3,46
5	60	6	3,47	3,47	3,47
1	80	1	3,44	3,44	3,44
1	80	2	3,45	3,43	3,44
1	80	3	3,45	3,44	3,45
1	80	4	3,44	3,45	3,45
1	80	5	3,45	3,44	3,45
1	80	6	3,44	3,45	3,45

2	80	1	3,42	3,41	3,42
2	80	2	3,44	3,44	3,44
2	80	3	3,43	3,44	3,44
2	80	4	3,43	3,44	3,44
2	80	5	3,43	3,44	3,44
2	80	6	3,44	3,45	3,45
3	80	1	3,41	3,41	3,41
3	80	2	3,41	3,40	3,41
3	80	3	3,41	3,40	3,41
3	80	4	3,41	3,40	3,41
3	80	5	3,41	3,40	3,41
3	80	6	3,41	3,41	3,41
4	80	1	3,44	3,43	3,44
4	80	2	3,43	3,44	3,44
4	80	3	3,44	3,43	3,44
4	80	4	3,43	3,42	3,43
4	80	5	3,43	3,43	3,43
4	80	6	3,45	3,44	3,45
5	80	1	3,44	3,45	3,45
5	80	2	3,44	3,45	3,45
5	80	3	3,44	3,45	3,45
5	80	4	3,45	3,45	3,45
5	80	5	3,45	3,45	3,45
5	80	6	3,44	3,45	3,45
1	100	1	3,49	3,49	3,49
1	100	2	3,48	3,48	3,48
1	100	3	3,46	3,47	3,47
1	100	4	3,48	3,48	3,48
1	100	5	3,48	3,49	3,49
1	100	6	3,49	3,49	3,49
2	100	1	3,49	3,47	3,48
2	100	2	3,47	3,47	3,47
2	100	3	3,47	3,47	3,47
2	100	4	3,47	3,47	3,47
2	100	5	3,48	3,47	3,48
2	100	6	3,49	3,48	3,49
3	100	1	3,51	3,52	3,52
3	100	2	3,51	3,52	3,52
3	100	3	3,51	3,52	3,52
3	100	4	3,50	3,51	3,51
3	100	5	3,51	3,52	3,52
3	100	6	3,50	3,51	3,51
4	100	1	3,45	3,45	3,45
4	100	2	3,52	3,48	3,50
4	100	3	3,52	3,52	3,52
4	100	4	3,50	3,49	3,50
4	100	5	3,49	3,48	3,49
4	100	6	3,48	3,48	3,48

5	100	1	3,49	3,48	3,49
5	100	2	3,49	3,49	3,49
5	100	3	3,49	3,49	3,49
5	100	4	3,49	3,49	3,49
5	100	5	3,49	3,49	3,49
5	100	6	3,49	3,49	3,49

**APÊNDICE E – Resultados das propriedades mecânicas das amostras impressas pela
Stratasys Fortus 450mc com filamento de ABS M30**

Stratasys - ABS M30							
	Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Modulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Alongamento (%)	Desvio Padrão
CDP01	60%	20,43	0,26	0,493	0,010	4,1	0,1
CDP02		20,50		0,49		4,2	
CDP03		20,64		0,494		4,0	
CDP04		20,01		0,473		4,3	
CDP05		20,64		0,476		4,4	
Média		20,44		0,485		4,2	
CDP06	80%	23,55	0,28	0,555	0,007	4,0	0,2
CDP07		23,97		0,555		4,2	
CDP08		23,76		0,559		4,1	
CDP09		24,32		0,563		4,0	
CDP10		23,90		0,545		4,5	
Média		23,90		0,555		4,1	
CDP11	100%	28,21	0,48	0,666	0,016	4,5	0,2
CDP12		27,72		0,642		4,5	
CDP13		27,79		0,672		4,1	
CDP14		27,37		0,659		4,2	
CDP15		28,63		0,686		4,2	
Média		27,94		0,665		4,3	

**APÊNDICE F – Resultados das propriedades mecânicas das amostras impressas pela
Stratasys Fortus 450mc com filamento de Polietereimida (PEI)**

Stratasys - Polietereimida (PEI)							
	Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Modulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Alongamento (%)	Desvio Padrão
CDP01	60%	43,85	10,55	0,534	0,024	4,09	0,1
CDP02		20,14		0,489		4,01	
CDP03		20,23		0,483		4,01	
CDP04		20,01		0,473		4,27	
CDP05		20,64		0,485		4,05	
Média		24,97		0,493		4,1	
CDP06	80%	23,55	0,20	0,556	0,002	3,97	0,0
CDP07		23,84		0,561		4,00	
CDP08		23,66		0,557		4,05	
CDP09		24,07		0,556		4,02	
CDP10		23,65		0,558		4,01	
Média		23,76		0,558		4,0	
CDP11	100%	27,63	12,20	0,675	0,014	3,98	0,0
CDP12		27,12		0,652		4,02	
CDP13		27,01		0,657		4,06	
CDP14		26,82		0,649		4,00	
CDP15		54,41		0,638		4,03	
Média		32,60		0,654		4,0	

**APÊNDICE G – Resultados das propriedades mecânicas das amostras impressas pela
GTMax Core GT4 com filamento de ABS Premium**

GTMax Core GT4 - ABS Premium							
	Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Modulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Alongamento (%)	Desvio Padrão
CDP01	T40 - 80%	36,83	1,79	0,587	0,030	9,8	0,5
CDP02		40,86		0,653		10,0	
CDP03		41,06		0,659		10,8	
CDP04		38,28		0,618		10,6	
CDP05		38,87		0,615		10,9	
Média		39,18		0,626		10,4	
CDP06	T40 - 100%	44,96	7,21	0,681	0,016	11,6	3,0
CDP07		43,49		0,681		11,7	
CDP08		28,9		0,712		4,9	
CDP09		44,19		0,690		11,9	
CDP10		46,6		0,713		11,3	
Média		41,63		0,695		10,3	
CDP11	T80 - 80%	44,35	1,30	0,702	0,025	11,1	0,6
CDP12		47,59		0,752		11,7	
CDP13		47,04		0,747		10,7	
CDP14		46,62		0,761		10,3	
CDP15		47,31		0,761		11,4	
Média		46,58		0,745		11,0	
CDP16	T80 - 100%	55,93	1,22	0,854	0,02	11,0	0,8
CDP17		53,13		0,811		11,0	
CDP18		55,86		0,87		11,9	
CDP19		54,95		0,861		10,7	
CDP20		56		0,854		12,6	
Média		55,17		0,850		11,4	

**APÊNDICE H – Resultados das propriedades mecânicas das amostras impressas pela
GTMax Core GT4 com filamento de Policarbonato**

GTMax Core GT4 - Policarbonato							
	Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Modulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Alongamento (%)	Desvio Padrão
CDP01	T40 - 80%	49,76	1,682	0,718	0,034	14,04	2,2
CDP02		52,38		0,761		14,04	
CDP03		52,4		0,761		13,02	
CDP04		48,7		0,702		9,53	
CDP05		49,83		0,688		15,14	
Média		50,614		0,726		13,2	
CDP06	T40 - 100%	54,71	2,897	0,765	0,047	13,97	0,9
CDP07		61,69		0,866		14,59	
CDP08		56,48		0,778		14,34	
CDP09		60,51		0,851		12,20	
CDP10		59,47		0,780		13,62	
Média		58,572		0,808		13,7	
CDP11	T80 - 80%	49,96	1,569	0,683	0,029	11,10	0,6
CDP12		52,52		0,736		11,67	
CDP13		53,08		0,747		10,70	
CDP14		54,08		0,757		10,25	
CDP15		51,55		0,717		11,44	
Média		52,238		0,728		11,0	
CDP16	T80 - 100%	60,03	6,188	0,805702	0,022	10,9948	0,805
CDP17		57,75		0,814764		10,9948	
CDP18		45,99		0,776263		11,896	
CDP19		60,23		0,838624		10,6654	
CDP20		60,44		0,814354		12,6184	
Média		56,89		0,810		11,4	

**APÊNDICE I – Resultados das propriedades mecânicas das amostras impressas pela
GTMax Core GT4 com filamento de Copoliéster**

GTMax Core GT4 - Copoliéster							
	Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Modulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Alongamento (%)	Desvio Padrão
CDP01	T40 - 80%	30,23	0,88	0,43483	0,013	19,10	2,3
CDP02		31,4		0,45545		18,34	
CDP03		31,05		0,46005		17,09	
CDP04		31,61		0,46297		15,22	
CDP05		29,5		0,43864		21,30	
Média		30,76		0,450		18,2	
CDP06	T40 - 100%	33,46	0,72	0,481	0,010	18,03	1,4
CDP07		35,22		0,507		19,08	
CDP08		35,01		0,503		17,98	
CDP09		34,94		0,497		16,23	
CDP10		35,08		0,503		15,57	
Média		34,74		0,498		17,4	
CDP11	T80 - 80%	31,94	0,73	0,441	0,010	18,84	1,2
CDP12		33,62		0,462		16,39	
CDP13		33,55		0,460		17,84	
CDP14		33,48		0,465		17,34	
CDP15		33,64		0,466		15,87	
Média		33,25		0,459		17,3	
CDP16	T80 - 100%	35,71	0,79	0,507	0,02	15,1	1,0
CDP17		34,05		0,481		17,4	
CDP18		36,05		0,500		15,4	
CDP19		35,75		0,499		15,9	
CDP20		35,57		0,456		16,8	
Média		35,43		0,489		16,1	

**APÊNDICE J – Resultados das propriedades mecânicas das amostras impressas pela
GTMax Core GT5 com filamento de Copoliéster**

GTMax Core GT5 - Policarbonato							
	Percentual de preenchimento	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Modulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Alongamento (%)	Desvio Padrão
CDP01	T40 - 80%	45,43	2,53	0,602	0,017	14,70	3,09
CDP02		44,81		0,606		14,00	
CDP03		40,97		0,634		8,70	
CDP04		39,46		0,597		8,50	
CDP05		42,12		0,629		9,00	
Média		42,56		0,614		10,98	
CDP06	T40 - 100%	52,63	3,85	0,693	0,065	12,14	1,77
CDP07		45,03		0,589		10,34	
CDP08		52,45		0,723		12,42	
CDP09		53,04		0,729		14,66	
Média		50,79		0,684		12,39	