

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

IGOR GIGLIO GONÇALVES DE SOUZA

**Análise das propriedades mecânicas de material PETG obtido por manufatura
aditiva pelo método de Deposição de Material Fundido (FDM) sob diferentes
parâmetros de fabricação**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Rio de Janeiro
2021**

IGOR GIGLIO GONÇALVES DE SOUZA

Análise das propriedades mecânicas de material PETG obtido por manufatura aditiva pelo método de Deposição de Material Fundido (FDM) sob diferentes parâmetros de fabricação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof^a. Tatiane de Campos Chuvás

**RIO DE JANEIRO
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S729 Souza, Igor Giglio Gonçalves de
Análise das propriedades mecânicas de material PETG obtido
por manufatura aditiva pelo método de Deposição de Material
Fundido (FDM) sob diferentes parâmetros de fabricação / Igor Giglio
Gonçalves de Souza – 2021.
80f. : il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.

Bibliografia : f. 79-80

Orientadora: Tatiane de Campos Chuvás

1. Engenharia mecânica. 2. Manufatura aditiva. 3. Fused
Deposition Modeling. 4. Politereftalato de etileno glicol
(PETG) – Propriedades mecânicas. I. Chuvás, Tatiane de Campos
(Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Dedico este trabalho a Deus, à minha
família, à minha namorada e aos meus
amigos.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todos que fizeram parte desta importante fase de minha vida. Assim, desde já peço desculpas àqueles que não estão presentes nestas palavras, mas podem estar certos que fazem parte do meu pensamento e da minha gratidão.

Agradeço à minha família pois sem o apoio deles seria muito mais difícil superar esse desafio. Não tenho como retribuir todos os momentos de suporte, compreensão e descontração que foram essenciais para minha trajetória.

À minha namorada Mariana Sousa por todo apoio em momentos de estresse e por todas as risadas que me acalmaram ao longo do caminho.

À minha orientadora Prof^a. Tatiane de Campos Chuvas, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos amigos, em especial à Vitória Morais por sempre me incentivar e ajudar ao longo deste percurso.

Aos meus colegas de sala: Lucas Aguiar, Thiago Bastos, Eduardo de Souza e Luísa Durão, por estarem sempre dispostos a ajudar.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A Manufatura Aditiva é uma tecnologia de fabricação em ascensão, não só em ambiente fabril como para uso doméstico. Com relação as práticas adotadas em ambiente fabril, cada vez mais se observa a utilização das diferentes técnicas de manufatura aditiva para confeccionar desde protótipos até peças para uso final. Na área de mecânica, o estudo sobre os impactos dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas dos materiais e/ou peças é amplamente difundido nos métodos convencionais de fabricação, como fundição e usinagem. Contudo, ainda há uma necessidade de definir como os parâmetros aplicados na Manufatura Aditiva podem influenciar no comportamento mecânicos das peças fabricadas. Assim, o presente trabalho teve por objetivo estudar as propriedades mecânicas do PETG (politereftalato de etileno glicol), por meio de ensaio de tração, conforme norma, de corpos de prova fabricados por Manufatura Aditiva pelo método FDM (*Fused Deposition Modeling*) para diferentes parâmetros de fabricação. Os resultados demonstraram a eficácia em reduzir a altura de camada e em aumentar o percentual e alterar o perfil de *infill* (enchimento) para otimizar as propriedades mecânicas do PETG. Aumento da resistência mecânica de até 29,6% ao alterar o perfil de *infill*, 6% ao aumentar a densidade de *infill* e 9,2% ao reduzir a altura de camada.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. FDM. PETG. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Additive Manufacturing is a rising manufacturing technology, not only in the manufacturing environment but also for domestic use. Regarding the practices adopted in the manufacturing environment, the use of different additive manufacturing techniques is increasingly observed to build from prototypes to parts for final use. In the area of mechanics, the study of the impacts of manufacturing parameters on the mechanical properties of materials and / or parts is widely used in conventional manufacturing methods, such as casting and machining. However, there is still a need to define how the parameters applied in Additive Manufacturing can influence the mechanical behavior of the manufactured parts. Thus, the present work aimed to study the mechanical properties of PETG, by using a standard tensile testing of specimens manufactured by Additive Manufacturing by the FDM (Fused Deposition Modeling) method for different manufacturing parameters. The results showed the effectiveness in reducing the layer height, in increasing the percentage of infill and in changing the infill pattern to optimize the mechanical properties of PETG. Increase mechanical strength up to 29.6% when changing the infill pattern, 6% when increasing the infill density and 9.2% when reducing the layer height.

Keywords: Additive Manufacturing. FDM. PETG. Mechanical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Normas para Manufatura Aditiva criadas pelos órgãos ISO e ASTM	17
Figura 2 - Etapas do processo de construção de um modelo ou peça final por manufatura aditiva	18
Figura 3 - Esquema do processo de Manufatura Aditiva utilizando a técnica FDM ..	21
Figura 4 - Dimensões Corpo de Prova ASTM D638 – 14.....	26
Figura 5 - Curvas tensão-deformação para polímeros frágeis (A), plásticos (B) e altamente elásticos (C).	28
Figura 6 - Representação do air gap positivo (a), nulo (b) e negativo (c)	30
Figura 7 - Limite de resistência vs. Percentual (densidade) de <i>infill</i>	31
Figura 8 - Representação da altura de camada (Hc)	32
Figura 9 - Processo de deposição das camadas para alturas de camada diferentes	33
Figura 10 - Módulo de elasticidade (a), limite de resistência (b) e deformação (c) para os perfis de <i>infill</i>	35
Figura 11 - Impressora montada realizando teste de impressão em PLA.....	37
Figura 12 - Carretel de 1kg de PETG sendo utilizado para impressão.	37
Figura 13 - Container para armazenamento do filamento	38
Figura 14 - Menu principal do software de fatiamento (Ultimaker Cura)	39
Figura 15 - Barcos impressos em PETG para testes iniciais	40
Figura 16 - Torre de resfriamento impressa em PETG	41
Figura 17 - Torres de retração impressas em PETG.....	43
Figura 18 - Diferença entre percentuais de preenchimento. Perfil de preenchimento "grid". (a)100% (b)70% (c)50% (d)30%.	45
Figura 19 - Diferentes perfis de preenchimento para 70% de <i>infill</i> . (a)Grid, (b)Tri-Hexagonal, (c)Concêntrico.	45
Figura 20 - Formato e dimensões dos corpos de prova a serem impressos.....	47
Figura 21 - Corpo de prova posicionado na máquina para realização do ensaio de tração.....	48
Figura 22 - Curvas de tensão vs. deformação para as condições de 1 a 6	51
Figura 23 - Zona de ruptura de um corpo de prova para cada condição CO1(a), CO2(b) CO3(c), CO4(d), CO5(e) e CO6(f) de variação de percentual de <i>infill</i>	52
Figura 24 - Limite de resistência para as condições de 1 a 6	53
Figura 25 - Deformação na tensão máxima para as condições de 1 a 6	54
Figura 26 - Módulo de elasticidade para as condições de 1 a 6	54
Figura 27 - Tempo de impressão para as condições de 1 a 6	54
Figura 28 - Peso para as condições de 1 a 6	55
Figura 29 - Limite de resistência vs. altura de camada de acordo com percentual de <i>infill</i>	55
Figura 30 - Deformação na tensão máxima vs. altura de camada de acordo com percentual de <i>infill</i>	57

Figura 31 - Modulo de elasticidade vs. altura de camada de acordo com percentual de infill.....	58
Figura 32 - Tempo de impressão vs. espessura de camada de acordo com percentual de infill.....	59
Figura 33 - Limite de resistência e tempo de impressão por percentual de infill.....	60
Figura 34 - Deformação na tensão máxima e tempo de impressão por percentual de infill.....	61
Figura 35 - Desenho esquemático de uma fibrilação (a) e a formação e propagação da trinca (b).....	62
Figura 36 - Módulo de elasticidade e tempo de impressão por percentual de infill...	62
Figura 37 - Curvas de tensão vs. deformação para as condições de 5 a 10	64
Figura 38 - Zona de ruptura de um corpo de prova para cada condição CO5(a), CO6(b) CO7(c), CO8(d), CO9(e) e CO10(f) de variação de perfil de infill	65
Figura 39 - Limite de resistência para as condições de 5 a 10	66
Figura 40 - Deformação na tensão máxima para as condições de 5 a 10	67
Figura 41 - Módulo de elasticidade para as condições de 5 a 10	67
Figura 42 - Tempo de impressão para as condições de 5 a 10	67
Figura 43 - Peso para as condições de 5 a 10	68
Figura 44 - Limite de resistência vs. altura de camada de acordo com perfil de infill	68
Figura 45 - Deformação na tensão máxima vs. espessura de camada de acordo com perfil de infill.....	69
Figura 46 - Módulo de elasticidade vs. espessura de camada de acordo com perfil de infill.....	70
Figura 47 - Tempo de impressão vs. espessura de camada de acordo com perfil de infill.....	71
Figura 48 - Limite de resistência e tempo de impressão por perfil de infill.....	72
Figura 49 - Ângulos de deposição dos cordões por perfil de infill estudado; grid (a), tri-hexagonal (b) e concêntrico (c)	72
Figura 50 – Deformação na tensão máxima e tempo de impressão por perfil de infill	74
Figura 51 - Módulo de elasticidade e tempo de impressão por perfil de infill.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das Tecnologias de Manufatura Aditiva	20
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do PETG	25
Tabela 3 - Dimensões do corpo de prova por espessura (mm)	26
Tabela 4 - Velocidade de Teste (mm/min).....	27
Tabela 5 - Parâmetros de impressão dos barcos para teste inicial.....	40
Tabela 6 - Parâmetros utilizados nas torres de retração.....	42
Tabela 7 - Valores dos parâmetros fixos de impressão	44
Tabela 8 - Condições de referência e parâmetros para a impressão dos corpos de prova de referência.....	46
Tabela 9 - Condições do estudo e parâmetros para a impressão dos corpos de prova	46
Tabela 10 - Resultados dos corpos de prova de referência	49
Tabela 11 - Média dos resultados dos ensaios das condições 1 a 6	53
Tabela 12 - Média dos resultados dos ensaios das condições 5 a 10	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVO.....	14
1.3 METODOLOGIA.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 ETAPAS DA MANUFATURA ADITIVA	17
2.2 PRINCIPAIS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA	19
2.2.1 Material Extrusion ou Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) 20	
2.3 CARACTERÍSTICAS DA MANUFATURA ADITIVA.....	22
2.3.1 Tempo de Produção.....	22
2.3.2 Características da Resolução	22
2.3.3 Qualidade Superficial	23
2.3.4 Material de Suporte	24
2.4 POLITEREFTALATO DE ETILENO GLICOL (PETG).....	24
2.5 ENSAIO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	25
2.6 CURVAS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM POLÍMEROS.....	28
2.7 PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO DO FDM QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	29
2.7.1 Influência do Air Gap e Percentual de Infill nas Propriedades Mecânicas.....	29
2.7.2 Altura de Camada (Hc)	31
2.7.3 Orientação dos cordões e Perfil do Infill	33
3 MATERIAIS E METODOS	36
3.1 MATERIAIS	36
3.1.1 Impressora Comercial	36
3.1.2 Filamento de PETG.....	37
3.1.3 Container de Armazenamento de Filamento	38
3.1.4 Software de Fatiamento	38
3.2 METODOS	39
3.2.1 Melhorias na Impressora Comercial	39
3.2.2 Definição dos Parâmetros Fixos de Impressa	40
3.2.3 Definição dos Parâmetros Variáveis de Impressão	44
3.2.4 Impressão dos Corpos de Prova.....	46
3.2.5 Medições e Ensaio de Tração.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 RESULTADOS DE REFERÊNCIA.....	49
4.2 PERCENTUAL DE INFILL	50
4.2.1 Propriedades vs. Altura de Camada	55
4.2.2 Produtividade vs. Percentual de Infill	59

4.3 PERFIL DO INFILL.....	63
4.3.1 Propriedades vs. Altura de Camada	68
4.3.2 Produtividade vs. Perfil de Infill	71
5 CONCLUSÃO	76
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O processo de prototipagem rápida consistia em uma técnica para a obtenção, relativamente rápida, de protótipos (peças com a forma final pretendida, porém sem as características mecânicas requeridas na peça final). Embora ainda seja usado para a elaboração de protótipos, a evolução desse processo permite o seu uso de maneira crescente para a obtenção de peças com características funcionais e de resistência cada vez mais próximas, se não mesmo idênticas, às pretendidas para as peças finais. Sendo assim, como já são obtidas peças com as características mecânicas e geométricas pretendidas, passou-se a adotar o termo “*Additive Manufacturing*” (manufatura aditiva) (MARTINS, 2017b).

Atualmente, já se podem obter pequenas e médias séries de peças com as características funcionais pretendidas. Em certos casos pode-se trabalhar até com fabricação de peças em escala real (MARTINS, 2017b; RELVAS, 2017; RELVAS, 2002).

Existem diversos métodos de fabricação de peças por manufatura aditiva, sendo o processo de Modelagem por Deposição de material Fundido (FDM), o principal processo de “*material extrusion*”, amplamente aplicado na fabricação de protótipos de materiais termoplásticos como ABS, poliéster e elastômeros ou em cera. Esse processo foi o grande impulsionador da fabricação das impressoras tridimensionais de engenharia com a característica de possuir um baixo custo, o que tornou a impressão tridimensional acessível. Dessa forma, o intuito deste trabalho é estudar as propriedades mecânicas do material PETG, ainda pouco estudado, quando impresso com a tecnologia FDM sob diferentes condições de processamentos (parâmetros que podem ser alterados na impressora) (GAO *et al.*, 2015; MARTINS, 2017b; RELVAS, 2017).

1.2 OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo estudar as propriedades mecânicas do PETG por meio de ensaio de tração de corpos de prova impressos em uma impressora 3D (não industrial) que utiliza a tecnologia FDM, comparando os resultados obtidos com os demais valores da literatura.

Os objetivos específicos do projeto consistem em:

- Realizar uma revisão bibliográfica a respeito do tema;
- Realizar a pré-estabilização da impressora para imprimir em PETG;
- Definir os parâmetros fixos de impressão que serão utilizados;
- Definir os parâmetros de impressão que serão estudados (variáveis);
- Fabricar corpos de prova conforme os parâmetros definidos;
- Realizar ensaios de tração conforme norma estabelecida;
- Analisar os resultados obtidos nos testes de tração de acordo com os parâmetros escolhidos.
- Fazer avaliação da relação de produtividade do processo de fabricação com as propriedades mecânicas do material impresso.

1.3 METODOLOGIA

Primeiro foi necessário realizar uma revisão bibliográfica do tema em questão. Em seguida, montou-se uma impressora comercial que foi adquirida pelo autor do projeto, realizando melhorias na mesma, para que a análise posterior fosse realizada. Depois que essas etapas foram concluídas, foram impressos corpos de prova, variando parâmetros de impressão definidos durante o trabalho (altura de camada e *infill*). Após a impressão dos corpos de prova ser concluída, foi realizado ensaio de tração nas amostras. Com os resultados obtidos de propriedades mecânicas (limite de resistência, deformação e módulo de elasticidade), realizou-se a comparação com valores da literatura e foi feita análise de produtividade, para definir valores ótimos dos parâmetros de impressão definidos em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O termo manufatura aditiva ou “*additive manufacturing*” (MA), também costumeiramente designado por prototipagem rápida (RP), é utilizado para descrever a fabricação de modelos físicos de um modelo CAD (*Computer Aided Design* - Projeto Assistido por Computador), tendo como base o uso de um conjunto de processos tecnológicos e de tecnologias digitais, podendo ser conhecida também por fabricação digital. Ao contrário dos processos de fabricação convencional, na manufatura aditiva, as peças partem do nada e são formadas camada sobre camada, com a deposição e consolidação de material, que dá a forma a peça pretendida. A espessura de cada camada é geralmente da ordem décimo de milímetro e a aproximação à geometria final do objeto tridimensional é considerada aceitável (RELVAS, 2017).

A manufatura aditiva está geralmente associada à utilização de tecnologias de fabricação aditivas e máquinas industriais complexas que recorrem a tecnologia laser, como estereolitografia e a sinterização seletiva a laser, ou, por outro lado, a equipamentos “domésticos” como as impressoras 3D de baixo custo (RELVAS, 2017).

O termo prototipagem rápida foi dado devido ao desenvolvimento dessa tecnologia para fabricar protótipos e, já excedeu esse propósito. Sendo assim, como já são obtidas peças com as características mecânicas e geométricas pretendidas, passou-se a adotar o termo “*Additive Manufacturing*” (manufatura aditiva) (MARTINS, 2017b).

Inicialmente usado para descrever máquinas específicas, o termo Impressão 3D (“*3D Printing*”), faz alusão aos princípios de impressão 2D transportados para uma terceira dimensão. Refere-se a um conjunto de tecnologias utilizadas para produzir/imprimir um objeto tridimensionalmente em vez de o produzir da forma tradicional. Recentemente, este termo, passou a ser considerado por muitos como aquele que será mais utilizado quando se fala de um processo de manufatura aditiva (MARTINS, 2017b).

Com relação aos materiais usados nos processos de fabricação por manufatura aditiva, podem ser utilizados materiais desde os poliméricos até os cerâmicos e metálicos. A forma como esses materiais se apresenta é variável, podendo ser sólida (na forma de pós ou filamentos) ou líquida. Quando o material é um sólido é necessária a adição localizada de energia para promover a sua fusão localizada, seguida da deposição e solidificação do material no local requerido. Assim,

a peça é formada por sobreposição de camadas, crescendo sobre si mesma. Quando o material é um líquido não é necessária a adição de energia para a sua fusão, mas é necessária a criação de condições para a sua solidificação no local requerido (RELVAS, 2017).

Os materiais usados são tão importantes quanto: os processos de adição localizada de energia para promoção da fusão localizada do material, a deposição do material fundido sobre o material já solidificado, o processo de adesão das sucessivas camadas e o processo da solidificação do material depositado. Assim, para que o processo tenha sucesso é necessária a correta escolha dos materiais usados, dos sistemas de fornecimento de energia e de aquecimento localizado, dos processos de adesão, e dos processos de arrefecimento e de consolidação. Portanto, a escolha de materiais, processos e equipamentos deve ser tomada em conjunto e em simultâneo (RELVAS, 2017).

Em 2010 foram criados grupos de trabalho pela ISO (*“International Organization for Standardization”*) e pela ASTM (*“American Society for Testing and Materials”*) para criar a Norma F42, que formula um conjunto de diretivas que classificam a gama de processos aditivos em sete categorias (Figura 1). Dessa forma, foram produzidos padrões relacionados à terminologia, processos individuais, cadeias de processos (*hardware* e *software*), procedimentos de teste, parâmetros de qualidade, contratos cliente-fornecedor e elementos fundamentais (THOMPSON *et al.*, 2016).

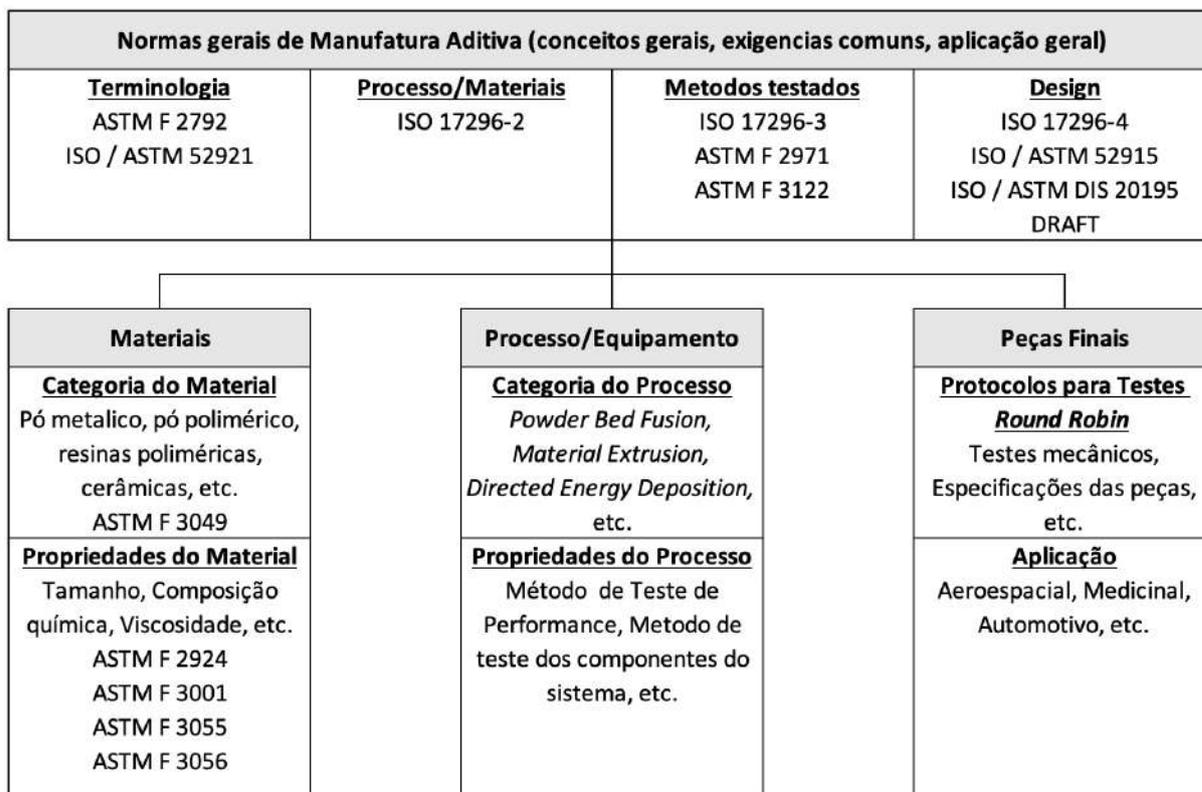


Figura 1 - Normas para Manufatura Aditiva criadas pelos órgãos ISO e ASTM
 Fonte: Adaptada (THOMPSON *et al.*, 2016)

2.1 ETAPAS DA MANUFATURA ADITIVA

A obtenção de modelos físicos por manufatura aditiva está sujeita a uma metodologia genérica que começa obrigatoriamente no modelo 3D digital, seja ele obtido por modelação direta no sistema CAD 3D, ou proveniente de um processo de engenharia inversa (*reverse engineering*). O processo inverso pode ser utilizado quando estamos perante um objeto físico e sem suporte digital. Neste caso, o objeto é previamente submetido a um processo de “aquisição de forma”, eventualmente através de um sistema de scanner 3D, que por meio da técnica de nuvem de pontos é processada através de software até se obter uma cópia digital 3D do objeto físico que se pretende fabricar (RELVAS, 2017). Um exemplo de utilização deste recurso é a criação de modelos CAD 3D de membros humanos para a impressão de próteses como, por exemplo, orelhas e narizes.

Após o modelo 3D digital ser obtido, ele é convertido para um formato poligonal, normalmente ficheiro “.STL” (em triângulos). Em seguida, o modelo STL é

posteriormente "fatiado" em secções 2D, com espessuras na ordem de décimo de milímetros e correspondentes a cada camada de material, dando origem ao ficheiro ".SLI" (em camadas). Dependendo da tecnologia utilizada ainda pode ser necessário definir as condições de varrimento ou preenchimento das zonas interiores de cada camada. Este ficheiro é gerado automaticamente pelo software de programação do equipamento (RELVAS, 2017).

A fase de construção do modelo e posterior retirada e limpeza varia ligeiramente com a tecnologia do equipamento utilizado - estereolitografia (SLA), a modelagem por fusão e deposição (FDM) ou a sinterização seletiva por laser (SLS) - isto considerando algumas particularidades relacionadas com a sua preparação e operação. Pode-se observar um esquema com as etapas do processo de manufatura aditiva na Figura 2, a seguir (RELVAS, 2017).

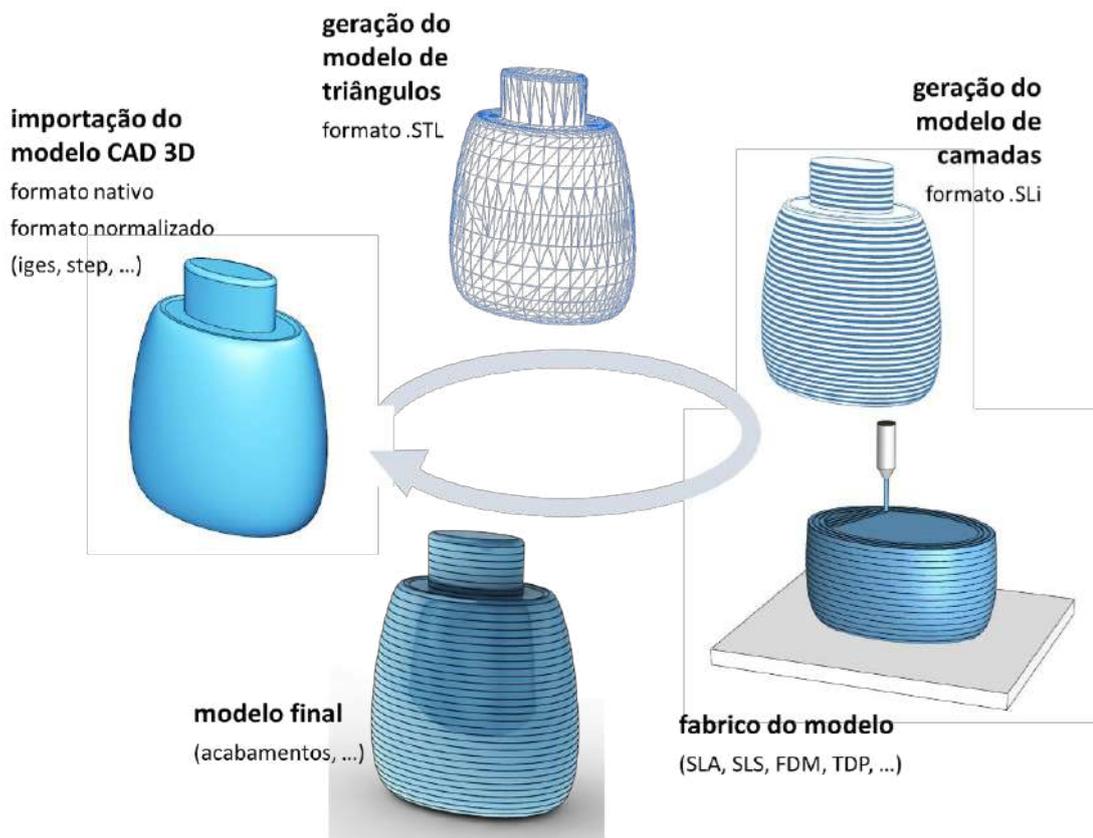


Figura 2 - Etapas do processo de construção de um modelo ou peça final por manufatura aditiva

Fonte: (RELVAS, 2017)

2.2 PRINCIPAIS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

Na Tabela 1, estão representados as principais tecnologias, processos e os materiais utilizados em manufatura aditiva. Essa classificação foi feita com base em normas ASTM e ISO já citadas no presente trabalho. As tecnologias de manufatura aditiva são divididas em:

- *material extrusion* (extrusão de material),
- *powder bed fusion* (fusão em cama de pó),
- *vat photopolymerization* (fotopolimerização de resina),
- *material jetting* (jato de material),
- *binder jetting* (jato de aglutinante),
- *sheet lamination* (construção por laminados)
- *directed energy deposition* (deposição direcionada de energia).

Como se pode observar, cada uma das tecnologias existentes possui processos de manufatura aditiva, sendo construídas por sobreposição de camadas. Além disso, cada um desses processos pode ser utilizado para um ou mais tipos de materiais. Cada uma dessas variáveis modificam o tempo de produção, o custo de fabricação e as características mecânicas e físicas da peça fabricada.

Tabela 1 - Resumo das Tecnologias de Manufatura Aditiva

TECNOLOGIA	PROCESSO	MATERIAIS
FOTOPOLIMERIZAÇÃO DE RESINA	Estereolitografia (SLA) Projeção digital de luz (DLP)	Resinas Poliméricas Resinas Poliméricas
EXTRUSÃO DE MATERIAL	Modelação por extrusão e deposição de material polimérico (FDM)	Resinas Poliméricas
	Fabricação por Fusão de Filamento Polimérico (FFF)	Resinas Poliméricas
JATO DE MATERIAL	Modelação por multijatos de material (MJM)	Resinas Poliméricas e Ceras
FUSÃO EM CAMA DE PÓ	Sinterização Seletiva por Laser (SLS) Sinterização direta de metais por laser (DMLS) Sinterização de metais por laser (SLM) Fusão por feixe de elétrons (EBM)	Pós Termoplásticos Pós Metálicos Pós Metálicos Pós Metálicos
JATO DE AGLUTINANTE	Impressão por jato de tinta (CJP) Impressão por jato de aglomerante (Prometal)	Resinas e Ceras Metálicos
CONSTRUÇÃO POR LAMINADOS	Fabricação de objetos por laminados (LOM) <i>Selective Deposition Lamination</i> (SDL)	Papel e Ceras Metálicos
DEPOSIÇÃO DIRECIONADA DE ENERGIA	Deposição de metal por laser (LENS) Electron Beam directed energy deposition (EBAM)	Metálicos

Fonte: Adaptada (RELVAS, 2017)

Nesta seção será apresentado apenas o processo que será utilizado no presente trabalho, o FDM.

2.2.1 *Material Extrusion ou Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)*

O método de modelagem por extrusão de material fundido (FDM), principal processo de *material extrusion*, é o processo utilizado neste trabalho, e consiste na fabricação de peças em materiais termoplásticos como o ABS, poliéster e elastómeros ou em cera. A adição de materiais faz-se por camadas, formadas pela extrusão desses através de uma microfieira. O material, em forma de fio, passa através do bico de uma cabeça extrusora que o funde e deposita em camadas muito finas na plataforma elevatória, solidificando-o sobre a camada anterior. Durante o processo de deposição de material, a cabeça percorre uma trajetória para definir o contorno da camada e depois passa ao preenchimento do seu núcleo. Quando a camada se encontra completamente preenchida, a plataforma que suporta a peça é ajustada em altura e é realizado um novo ciclo de extrusão e deposição para uma nova camada. O movimento horizontal em 2D para a deposição da camada pode ocorrer tanto pelo

bico de extrusão, quanto pela plataforma, dependendo do modelo de impressora (GOZZO, 2017; RELVAS, 2017; RELVAS, 2002).

O termo FDM foi desenvolvido pela empresa chamada Stratasys, que se refere a tecnologia de modelagem por fusão e deposição de material. Esta empresa é a única que pode utilizar os termos “FDM” e “Modelagem por fusão e deposição” em suas impressoras 3D. Um nome comumente utilizado pelas fabricantes é “fabricação de filamentos fundidos” (FFF), que se refere ao mesmo processo. Ainda assim, o termo FDM se tornou amplamente usado para nomear o processo de extrusão de termoplásticos (GOZZO, 2017).

A Figura 3 apresenta um esquema simples relativo ao processo FDM.

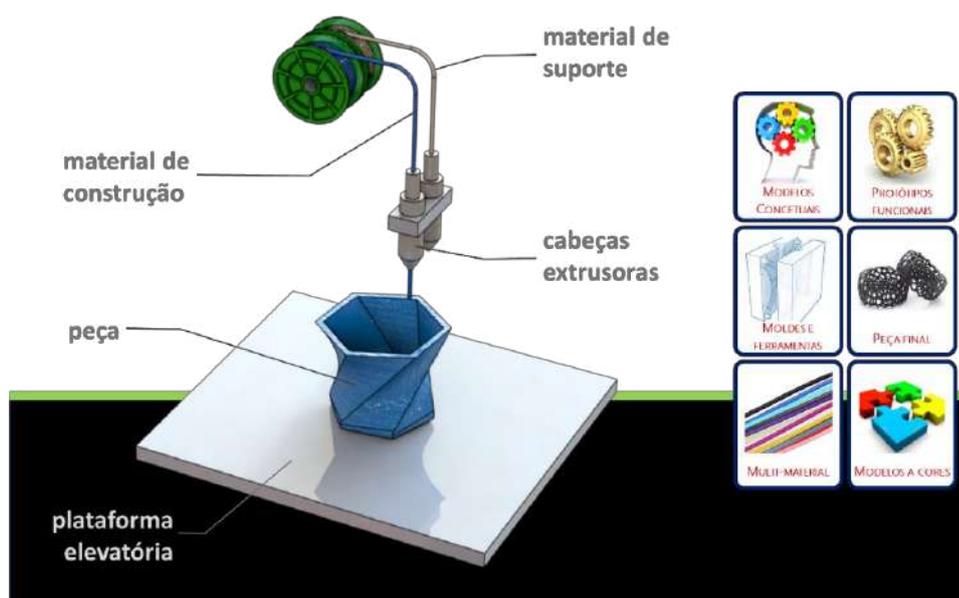


Figura 3 - Esquema do processo de Manufatura Aditiva utilizando a técnica FDM
Fonte: (RELVAS, 2017)

O processo de FDM foi o que impulsionou a fabricação de impressoras tridimensionais de baixo custo, e tornou, assim, a impressão tridimensional mais acessível. Impressoras de nível industrial, que fabricam peças com propriedades mecânicas superiores e com aplicações fabris, tem preço elevado e podem ser denominadas “sistemas de produção 3D” (GOZZO, 2017).

Muitos materiais podem ser utilizados em impressoras com tecnologia FDM, sendo o mais utilizado o acrilonitrilo butadieno estireno, mais conhecido como ‘ABS’. Outros termoplásticos comumente utilizados são: nylon, acrilonitrilo acrilato de estireno (ASA), policarbonatos (PC), poli (tereftalato de etileno) glicol modificado

(PETG) e poliestireno de alto impacto (HIPS). Além desses, outro filamento bastante utilizado é o ácido poliláctico (PLA) – bioplástico obtido do amido de milho ou cana-de-açúcar (GOZZO, 2017).

Uma das grandes vantagens desta tecnologia é a possibilidade de utilizar mais de um material simultaneamente, desde que sejam compatíveis entre si. Isso é feito com a utilização simultânea de dois filamentos diferentes e consequentemente dois bicos de extrusão. Já uma das grandes desvantagens é o tempo relativo ao processo, que é lento quando comparado aos processos de manufatura aditiva mais utilizados. Vale ressaltar que o valor de investimento para sistemas de produção 3D para usos fabris é bem elevado.

2.3 CARACTERÍSTICAS DA MANUFATURA ADITIVA

Esta seção tem como objetivo descrever resumidamente algumas características importantes relativas ao processo de manufatura aditiva. O conhecimento desses conceitos é importante para o melhor entendimento do processo.

2.3.1 *Tempo de Produção*

O tempo de construção (ou tempo de produção) de uma peça, geralmente, depende da velocidade de impressão, tamanho da peça, espessura da camada e orientação de construção da impressora. Independentemente dos processos de impressão, normalmente, quanto maior a altura do objeto na direção de *lay-up*, mais tempo leva para imprimir. Portanto, dada a velocidade de impressão e o tamanho do objeto, a fim de reduzir o tempo de construção, é necessário reduzir a altura total da construção (GAO *et al.*, 2015).

2.3.2 *Características da Resolução*

A resolução em sistemas de manufatura aditiva depende, principalmente, do princípio de padronização de energia / material (GAO *et al.*, 2015).

A resolução do processo FDM requer uma cabeça de deposição relativamente grande x) para processar eficazmente o polímero fundido. Isso, juntamente com a incapacidade de efetivamente iniciar/parar a extrusão termoplástica, limita o tamanho possível do recurso. Alternativamente, os processos de fotolimerização e de *powder bed fusion* são capazes de processar características muito mais finas devido à capacidade de focalizar com precisão um feixe de energia (GAO *et al.*, 2015).

A resolução dos processos de *binder jetting* e de *material jetting* é ditada pelas cabeças de jateamento. Embora os sistemas de manufatura aditiva de *binder jetting* tenham cabeças de jateamento de alta resolução, sua resolução é limitada pelas partículas de pó grosso no processo. A resolução alcançável é limitada pelo fato de que esses sistemas (e outros baseados em pó) requerem partículas relativamente grandes (maiores que 20 μ m) para que o pó possa ser devidamente fabricado (GAO *et al.*, 2015).

2.3.3 Qualidade Superficial

Em geral, a qualidade da superfície de uma peça impressa é determinada principalmente pela espessura de cada camada de impressão. Uma maior espessura de camada resulta em uma “curvatura mal aproximada” da peça. Esse erro de construção, também chamado de efeito "escada", depende da tecnologia de deposição de material utilizada. A qualidade da superfície também depende da forma da matéria-prima (GAO *et al.*, 2015).

Os sistemas de *material extrusion* geralmente têm a maior espessura de camada ($\pm 0,2$ mm) devido ao grande diâmetro do bico de deposição. Já os sistemas de tecnologias *powder bed fusion* e *vat photopolymerization* possuem espessuras de camada muito menores ($\pm 0,01$ mm) e, portanto, superfícies mais lisas, devido à capacidade de focar com precisão o raio do feixe de energia. Os sistemas com tecnologia *material jetting* também oferecem uma espessura de camada fina ($\pm 0,02$ mm) devido às pequenas gotículas de jato. Os processos de *powder bed fusion* têm, por sua vez, uma qualidade de superfície inferior à dos outros devido a partículas de pó grandes e parcialmente derretidas que permanecem na superfície da peça (GAO *et al.*, 2015).

2.3.4 Material de Suporte

Para criar geometrias complexas, contendo saliências, por exemplo, todos os sistemas de manufatura aditiva devem fornecer alguns meios de suporte para as camadas subsequentes. Em algumas tecnologias, isso é feito imprimindo estruturas finas, semelhantes a andaimes, para sustentar partes das peças. Essas estruturas podem ter o mesmo material da peça, como em processos FDM que utilizam somente um bico, ou um material secundário de sacrifício, como em processos FDM com mais de um bico de deposição (GAO *et al.*, 2015).

Já algumas tecnologias, como *binder jetting* e *powder bed fusion* não necessitam da construção de suportes, uma vez que o pó não sinterizado serve como suporte para as camadas subsequentes. Vale ressaltar a exceção da impressão de metais para o processo de *powder bed fusion*, uma vez que neste processo são necessários suportes para evitar o empeno das peças devido a tensões residuais originadas pelo resfriamento rápido.

2.4 POLITEREFTALATO DE ETILENO GLICOL (PETG)

O material “politereftalato de etileno glicol”, conhecido como PETG, vem conquistando espaço na comunidade de impressão 3D. A capacidade de gerar peças com boa flexibilidade e durabilidade é o que tem dado destaque a este material. Ele une boa resistência e ductilidade com a facilidade de impressão, características do ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Poli (ácido láctico)), respectivamente (SANTANA *et al.*, 2018).

A letra “G” do polímero PETG significa “glicol modificado”, que é acrescentado ao PET a fim de tornar o material apto a ser impresso, quando comparado com o PET convencional. O filamento de PETG mantém o estado semissólido quando aquecido, dessa forma, torna-se adequado para a impressão 3D, sendo aplicado para produzir embalagens alimentícias, garrafas e copos de água, entre outros tipos de peças (SANTANA *et al.*, 2018).

Por conta de sua recente inclusão nos materiais de impressão 3D, poucos estudos foram realizados para encontrar as propriedades mecânicas (valores de

resistências à tração, alongamento até a ruptura e módulo de elasticidade) do PETG. Santana *et al.* (2018) encontraram resultados para as propriedades do PETG em amostras injetadas e para amostras impressas em tecnologia de manufatura aditiva, a segunda usando ângulo de varredura de 45°/ -45°. Esses valores são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do PETG

Propriedades PETG	Injetado	Impresso (45°/ -45°)
Tensão máxima (MPa)	49,78 ± 0,33	32,15 ± 0,67
Deformação na tensão máxima (mm/mm)	0,05 ± 2,0E-4	0,03 ± 1,1E-3
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,50 ± 0,02	1,55 ± 0,05

FONTE: Adaptada (SANTANA *et al.*, 2018)

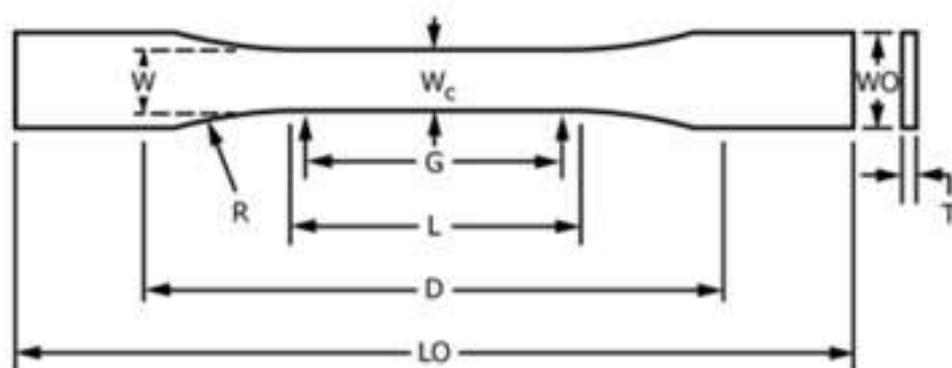
2.5 ENSAIO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

A norma ASTM D638 – 14 foi criada com o intuito de desenvolver um método padrão para a obtenção de propriedades mecânicas de tensão de materiais poliméricos. Estão englobados nesta norma materiais poliméricos de qualquer espessura até 14 milímetros, sendo recomendada a norma ASTM D882 para espessuras menores que 1 milímetro. Materiais com espessura superior a 14 milímetros devem, portanto, ser reduzidos por usinagem (ASTM, 2014).

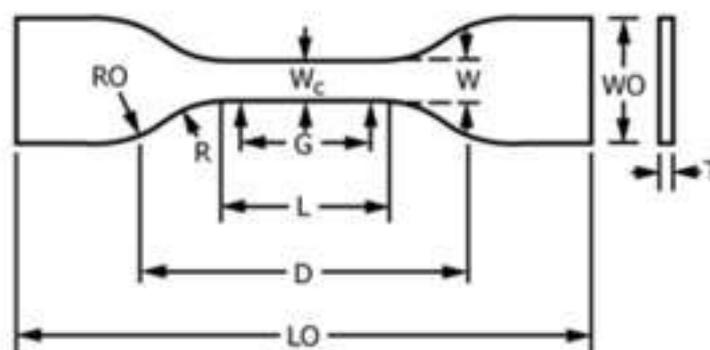
Além das propriedades mecânicas, os dados obtidos através desse teste são úteis para caracterizar qualitativamente o material e para pesquisa e desenvolvimento (ASTM, 2014).

No teste são usados uma máquina de teste e um extensômetro. O extensômetro deve ser colocado no comprimento completo do corpo de prova, para determinar a distância entre dois pontos, conforme o mesmo é tensionado (ASTM, 2014).

Para polímeros rígidos e semirrígidos, o corpo de prova deve seguir as dimensões e as tolerâncias conforme a Figura 4 e a Tabela 3 (ASTM, 2014).



TIPOS I, II, III e V



TIPOS IV

Figura 4 - Dimensões Corpo de Prova ASTM D638 – 14
 FONTE: (ASTM, 2014)

Tabela 3 - Dimensões do corpo de prova por espessura (mm)

Espessura (mm)	$T \leq 7$		$7 < T \leq 14$	$T \leq 4$		Tolerâncias
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	
W – Largura da flecha	13	6	19	6	3,18	$\pm 0,5$
L – Comprimento da flecha	57	57	57	33	9,53	$\pm 0,5$
WO – Largura total	19	19	29	19	-	$\pm 6,4$
	-	-	-	-	9,53	$\pm 3,18$
LO – Comprimento total	165	183	246	115	63,5	No máximo
G – Comprimento de calibração	50	50	50	-	7,62	$\pm 0,25$
	-	-	-	25	-	$\pm 0,13$
D – Distância entre garras	115	135	115	65	25,4	± 5
R – Raio do filete	76	76	76	14	12,7	± 1
RO – Outros raios	-	-	-	25	-	± 1

FONTE : Adaptada (ASTM, 2014)

O corpo de prova deve ser preferivelmente do Tipo I e esse deve ser usado quando houver material capaz de fabricar espessuras de até 7 milímetros. O Tipo II é recomendado quando corpo de prova do Tipo I não rompe na seção da flecha. O Tipo V deve ser utilizado quando uma quantidade limitada de material tendo espessura de 4 milímetros ou menor está disponível para utilização, ou quando muitos corpos de prova têm que ser expostos a um espaço limitado de atmosfera controlada. O tipo IV é utilizado para comparar materiais com diferentes tipos de rigidez (materiais não-rígidos e semirrígidos). Já o Tipo III tem que ser usado, obrigatoriamente, para todos os materiais que possuam espessura maior que 7 milímetros e menor que 14 milímetros (ASTM, 2014).

A velocidade durante o teste dos corpos de prova pode ser considerada a taxa de movimento relativo entre as garras ou entre os acessórios. A velocidade resultante do teste deve estar dentro dos limites estabelecidos de acordo com a Tabela 4. A velocidade de teste deve ser escolhida na Tabela 4 de acordo com o tipo de corpo de prova (ASTM, 2014).

Tabela 4 - Velocidade de Teste (mm/min)

Classificação	Tipo de Corpo de Prova	Velocidade de Teste (mm/min)	Taxa de Deformação nominal no início do teste (mm/mm*min)
Rígido e Semirrígido	I, II, III varas e tubos	5 ± 25%	0,1
		50 ± 10%	1
		500 ± 10%	10
	IV	5 ± 25%	0,15
		50 ± 10%	1,5
		500 ± 10%	15
	V	1 ± 25%	0,1
		10 ± 25%	1
		100 ± 25%	10
Não-rígido	III	50 ± 10%	1
		500 ± 10%	10
	IV	50 ± 10%	1,5
		500 ± 10%	15

FONTE : Adaptada (ASTM, 2014)

Para calcular a resistência à tração, divide-se a carga máxima que o corpo de prova suportou, em Newtons, pela área da seção transversal no comprimento de

calibração (dimensão “G” da Figura 4), em metros quadrados. O resultado de tensão encontrado estará em Pascal. Dessa forma, se a força máxima for utilizada, encontra-se a tensão máxima ou tensão limite de resistência do material (ASTM, 2014).

Os valores de alongamento são válidos nos casos em que há deformação uniforme no comprimento de calibração do corpo de prova (dimensão “G” da Figura 4). Estes valores de alongamento serão relevantes quantitativamente para projetos de engenharia. Porém, quando ocorre a deformação não uniforme no comprimento de calibração do corpo de prova (como por exemplo o empescoçamento), valores de tensão nominal são obtidos, e estes são de uso qualitativo apenas (ASTM, 2014).

O alongamento percentual é a mudança que ocorre no comprimento de calibração do corpo de prova (dimensão “G” da Figura 4) relativo ao comprimento de calibração original do mesmo (ASTM, 2014).

2.6 CURVAS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM POLÍMEROS

Três principais comportamentos são encontrados para as curvas de tensão-deformação em materiais poliméricos. Essas curvas típicas são mostradas na Figura 5.

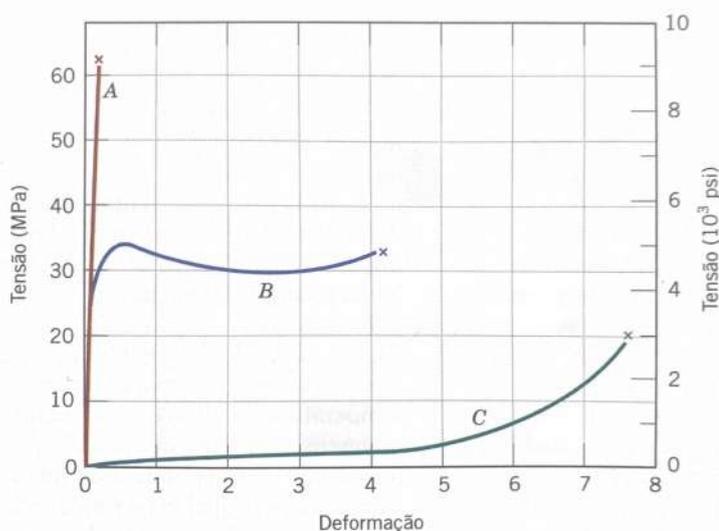


Figura 5 - Curvas tensão-deformação para polímeros frágeis (A), plásticos (B) e altamente elásticos (C).

FONTE: (CALLISTER; RETHWISCH, 2010)

A curva A representa o comportamento típico de um polímero frágil. Este comportamento se caracteriza por uma fratura ainda em deformação elástica. A curva B representa o comportamento típico de um material plástico, caracterizada por iniciar com um regime de deformação elástica, seguido pelo escoamento e posteriormente por um regime de deformação plástica. A curva C mostra o comportamento de um material altamente elástico (comportamento semelhante ao da borracha, por exemplo) (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

Callister e Rethwisch (2010) afirmam que para os polímeros plásticos, o limite de escoamento é dado pela tensão máxima da curva, que ocorre imediatamente após o término da região elástica. Porém, no presente trabalho, a tensão máxima é nomeada como limite de resistência.

2.7 PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO DO FDM QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Conceitos como *air gap*, orientação de fabricação, altura de camada, orientação do *infill* e número de contornos da parede (*shell*) são alguns dos principais parâmetros influenciadores das propriedades mecânicas de materiais poliméricos fabricados por FDM.

Nesta seção, a influência de alguns destes parâmetros é apresentada.

2.7.1 Influência do Air Gap e Percentual de Infill nas Propriedades Mecânicas

O *air gap*, como o próprio nome diz, é o espaçamento entre os cordões, o qual é preenchido por ar, de uma peça fabricada pela tecnologia FDM. O *air gap* pode ser positivo, negativo ou nulo. No positivo, os cordões estão espaçados e há entre eles uma camada de ar, no nulo, os cordões estão com suas superfícies se tocando, sem se sobrepor, e no negativo, os cordões estão sobrepostos. Sendo assim, quanto maior o *air gap*, maior é a quantidade de ar que existe entre os cordões de impressão e, conseqüentemente, menor é a densidade da peça a ser impressa (MARTINS, 2017a). Uma representação dos três tipos de *air gap* é mostrada na Figura 6.

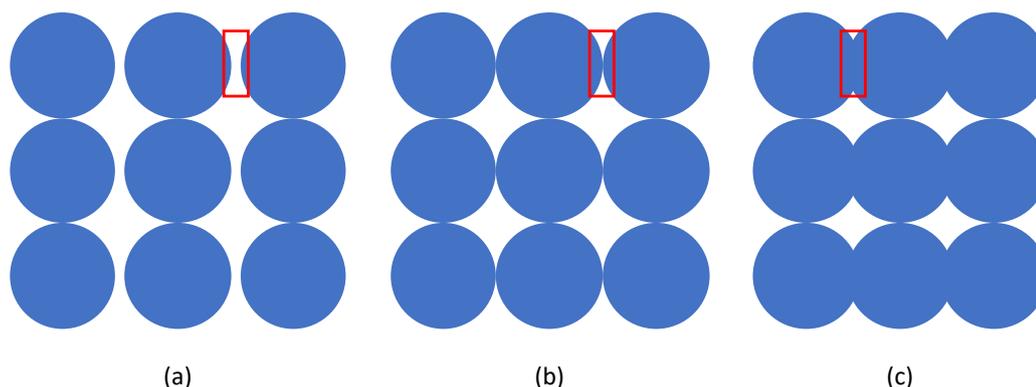


Figura 6 - Representação do air gap positivo (a), nulo (b) e negativo (c)
 FONTE: Imagem própria

Uma forma de se alterar o *air gap* nos softwares de fatiamento mais atuais é através do parâmetro de *infill density*, que foi escolhido para ser estudado neste trabalho. O *infill density* de 100% corresponde a condição *b* da Figura 6.

O *air gap* deve ser o menor possível, pois, quanto menor o *air gap*, maior a densidade da peça e, conseqüentemente, há elevação tanto da resistência mecânica quanto do módulo de elasticidade (rigidez) da peça. Porém, se o espaçamento entre os cordões é elevado, menor é a quantidade de material presente na peça para suportar cargas. Sendo assim, *air gaps* positivos reduzem as propriedades mecânicas (AHN *et al.*, 2002; MARTINS, 2017a; SOOD *et al.*, 2011; SOOD *et al.*, 2010).

Em contrapartida, a utilização de *air gaps* negativos excessivos favorece a distorção dimensional da peça, e pode comprometer a ligação entre os cordões (se houver imperfeições e irregularidades) e tem o risco de gerar um aumento de concentradores de tensão na mesma, o que prejudicaria a resistência mecânica e a rigidez (MARTINS, 2017a).

Oliveira (2017) verificou que o aumento em 10% do percentual de *infill* refletiu em um aumento de aproximadamente 11,66% da resistência à tração da peça. O autor justificou esse aumento com o fato de que o software traduz o aumento de preenchimento em aumento do número de linhas de extrusão no interior da peça. Dessa forma, a carga de ensaios é dividida no interior da peça entre um número maior de linhas, que individualmente possuem a sua espessura constante, independente da porcentagem de *infill*. Sendo a carga dividida em um maior número de linhas, cada linha suporta uma carga cada vez menor. Além disso, o autor encontrou que o aumento do percentual de *infill* gera um aumento da rigidez (módulo de elasticidade) da peça.

Srinivasan *et al.* (2020) relatou que o limite de resistência do material aumenta com o aumento do percentual de *infill*, para o PETG. Os valores por ele encontrados são mostrados na Figura 7. Esses valores foram encontrados para uma altura de camada de 0,10mm e para perfil de *infill grid* (rede). Os autores explicam também que fabricantes podem se utilizar destes dados para poder adequar o projeto à carga aplicada, ao custo do material e ao tempo de fabricação.

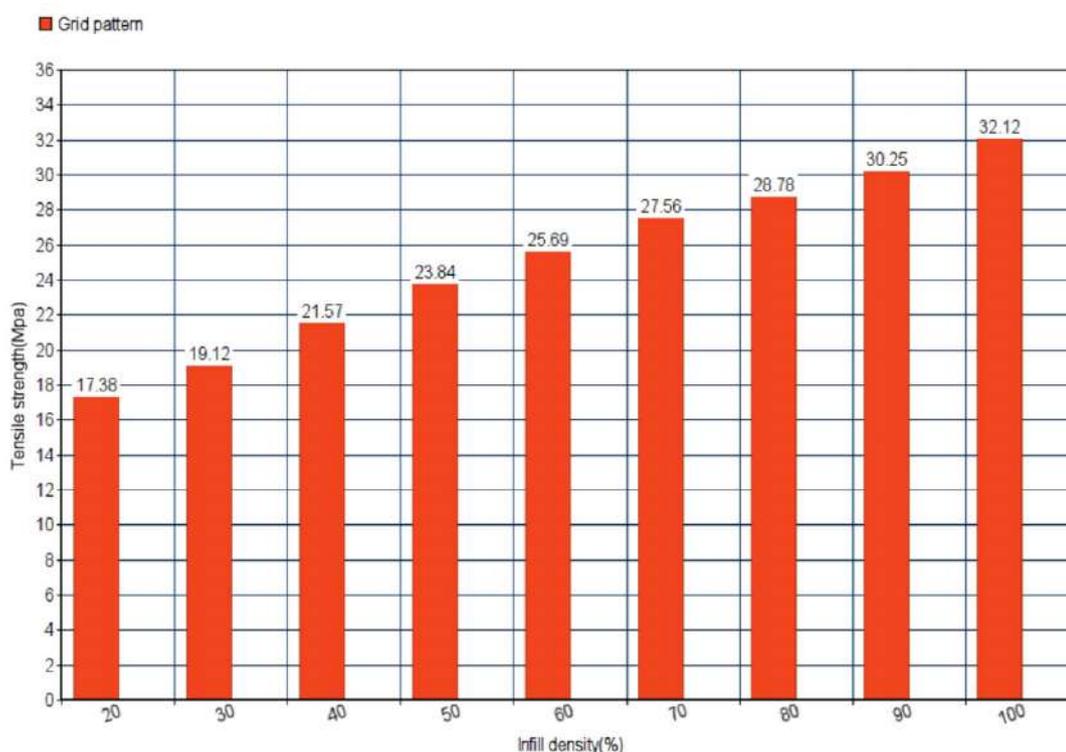


Figura 7 - Limite de resistência vs. Percentual (densidade) de *infill*
FONTE: (SRINIVASAN *et al.*, 2020)

2.7.2 Altura de Camada (H_c)

Chamada por muitos autores de espessura de camada, a altura de cada cordão e a diferença de altura de deposição entre duas camadas consecutivas é chamada neste trabalho de altura de camada (H_c). A Figura 8 ilustra a altura de camada de uma impressão que utiliza a tecnologia FDM. Vale ressaltar que esta figura não leva em consideração a pressão que o *nozzle* (bico) faz ao depositar a camada e, conseqüentemente, o espalhamento que o cordão sofre.

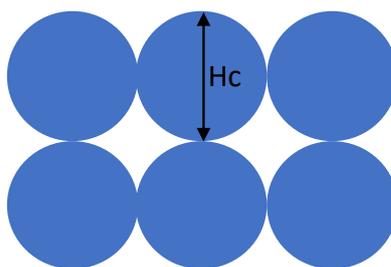


Figura 8 - Representação da altura de camada (H_c)
Fonte: Imagem própria

A altura de camada possui grande influência sobre as propriedades mecânicas de uma peça. Porém, os estudos mostram que a variação da altura de camada não tem uma influência linear sobre a tensão máxima e o módulo de elasticidade.

Martins (2017a) concluiu que o aumento da altura de camada de 0,06mm para 0,10mm aumentou ligeiramente a tensão máxima que a peça aguenta em cerca de 1,7%. Em contrapartida, ao aumentar a altura de camada de 0,10mm para 0,17mm, nota-se uma redução média da tensão máxima em aproximadamente 3,4%.

Sood (2010) chegou a mesma conclusão que o estudo mencionado acima: somente para alturas de camada acima de 0,17mm, o aumento da altura de camada aumenta a resistência mecânica. Além disso, para alturas de camada entre 0,127mm e 0,17mm, o aumento da altura de camada diminui a resistência mecânica da peça. Porém, para este autor, esse comportamento é esperado para o material ABS, que é sensível a variações de temperatura. Para camadas muito baixas (finas), a probabilidade de ocorrer distorções e tensões residuais é maior, uma vez que estão suscetíveis a um maior gradiente de temperaturas. Sendo assim, no caso de materiais sensíveis a variações de temperatura, uma altura de camada mais elevada mantém a temperatura da camada anterior mais elevada por mais tempo e, conseqüentemente, as tensões residuais são menores.

Porém, de modo geral, alturas de camada menores tendem a aumentar o valor da resistência mecânica e da rigidez das peças. Isso porque camadas de altura menor tendem a preencher melhor os espaços vazios da peça na hora da deposição.

A Figura 9 mostra a influência da altura de camada no preenchimento de vazios no interior das peças. Para alturas maiores, a dimensão fica mais próxima do diâmetro do bico de extrusão, o que aproxima o cordão da forma circular, reduzindo o preenchimento dos espaços vazios. Para alturas menores, o bico de extrusão deforma

o cordão de modo a aumentar o preenchimento dos vazios entre as camadas. Porém, deve ser levado em consideração o material utilizado e a presença de tensões residuais maiores em alturas de camada menores (MARTINS, 2017a).

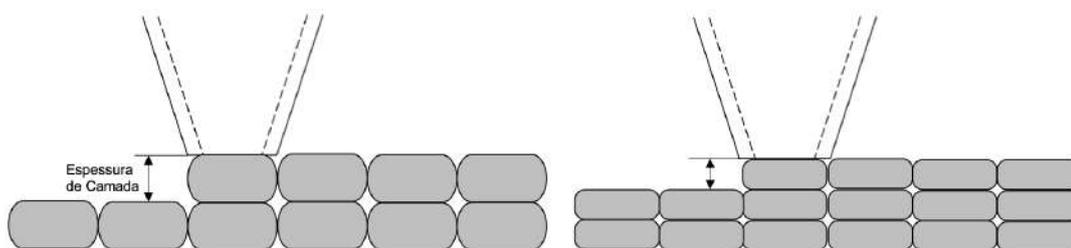


Figura 9 - Processo de deposição das camadas para alturas de camada diferentes
FONTE: (MARTINS, 2017a)

2.7.3 Orientação dos cordões e Perfil do Infill

A orientação dos cordões de *infill* tem relação direta com a resistência mecânica da peça. Quanto maior for o alinhamento dos cordões com a direção de aplicação da força, maior será a resistência mecânica e a rigidez. (MARTINS, 2017a)

Os diferentes perfis de *infill* variam, justamente, a orientação e a distribuição do material dentro do preenchimento da peça. Dessa forma, é esperado que perfis que tenham um maior alinhamento de cordões com a direção de aplicação da força suportem cargas maiores (MARTINS, 2017a).

Martins (2017a) estudou também a variação da orientação dos cordões intercalados de $0^\circ/90^\circ$ para $-45^\circ/45^\circ$ e encontrou aumento na tensão máxima, porém não teve variação significativa no módulo de elasticidade. O perfil de *infill* do estudo era em linhas e com densidade próximas a 100%. A conclusão dos resultados do perfil de *infill* foi que a diminuição da tensão de resistência é causada por distorções sofridas pelos cordões de 0° .

Cabreira e Santana (2020) compararam alguns tipos de perfil de *infill* quanto à tensão máxima, ao módulo de elasticidade e à deformação. Os perfis estudados por eles foram: *rectilinear*, *grid*, triangular e *honeycomb*. Os resultados mostraram que o tipo de perfil escolhido afeta as três propriedades estudadas.

O estudo acima concluiu que o perfil *grid*, seguido do *rectilinear* possuem módulos de elasticidade mais altos e os perfis *honeycomb* e triangular possuem

módulos de elasticidade mais baixos. Os autores explicaram que o aumento do módulo de elasticidade do perfil *grid* e *rectilinear* está ligado ao fato de os mesmos terem um maior número de cordões depositados no mesmo sentido de aplicação de carga, o que permite que eles absorvam diretamente a tensão, evitando a deformação da estrutura. Por outro lado, os perfis *honeycomb* e triangular são fabricados com cordões angulares, na sua estrutura interna, em relação à direção de aplicação de força. Esses cordões angulares são mais facilmente deformados com a aplicação de força, o que gera módulos de elasticidade mais baixos (CABREIRA; SANTANA, 2020).

Os autores esperavam encontrar tensões máximas semelhantes para os perfis *rectilinear* e *grid*, por terem mais cordões na mesma direção de aplicação da força. Porém, o perfil *grid* teve uma redução na tensão máxima, que foi atribuída à ineficácia da transferência de tensão entre a estrutura, devido a forma como esses espécimes romperam. Além disso, foi observado um valor de tensão máxima semelhante ao *grid* para o *honeycomb* e um menor valor para o triangular (CABREIRA; SANTANA, 2020).

As maiores deformações encontradas foram para os perfis *honeycomb* e *rectilinear*, enquanto os perfis *grid* e triangular tiveram deformações menores. Os valores encontrados para módulo de elasticidade, tensão de resistência e deformação são apresentados na Figura 10 (CABREIRA; SANTANA, 2020).

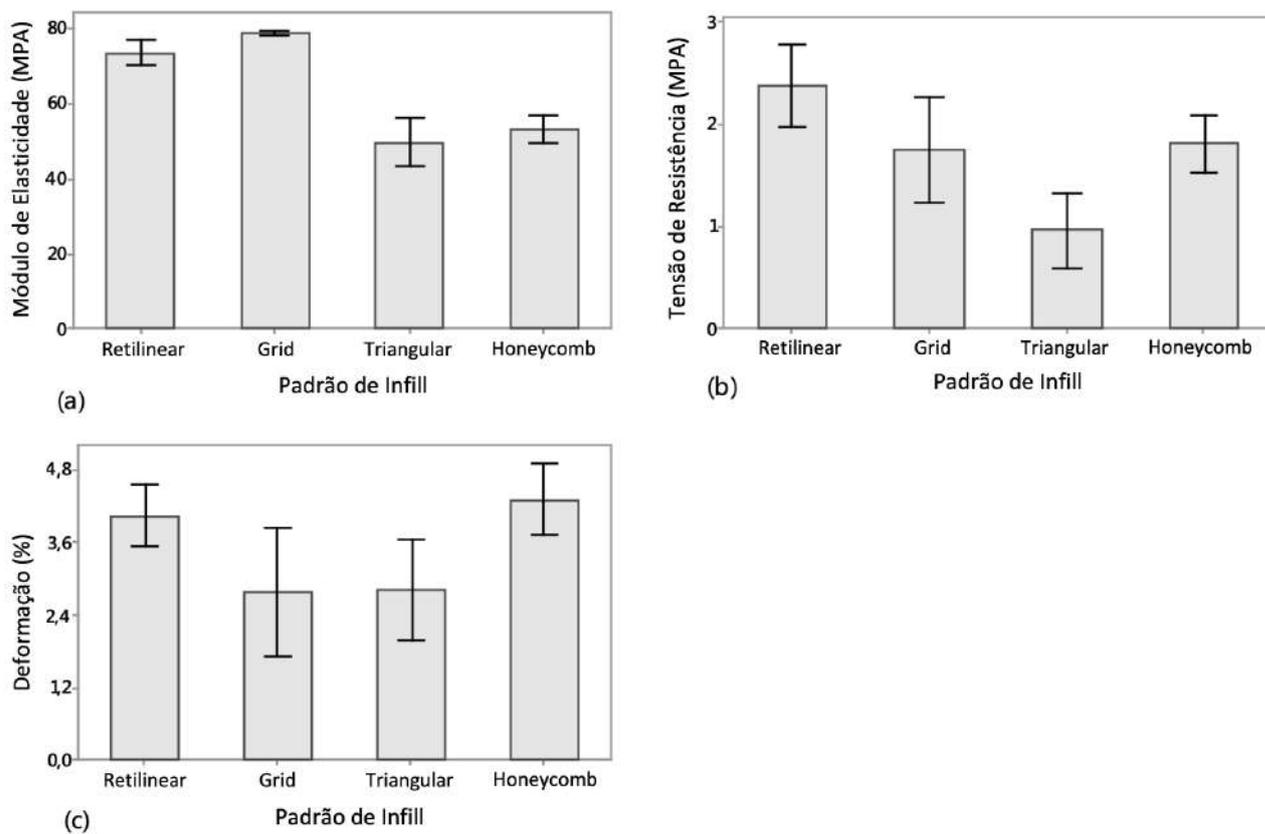


Figura 10 - Módulo de elasticidade (a), limite de resistência (b) e deformação (c) para os perfis de infill

FONTE: Adaptada (CABREIRA; SANTANA, 2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foram feitas melhorias e uma pré-estabilização de uma impressora comercial. Em seguida, foram definidos parâmetros de impressão e impressos corpos de prova com condições pré-definidas, com o objetivo de obter dados de propriedades mecânicas do PETG e comparar algumas variantes de impressão escolhidas.

3.1 MATERIAIS

Nesta seção serão descritos os materiais fundamentais utilizados durante o estudo.

3.1.1 Impressora Comercial

A impressora comercial escolhida foi a *Creality Ender 3 v2* (Figura 11), por conta do baixo custo e qualidade de impressão quando comparada às demais impressoras de outros fabricantes na mesma faixa de preço. Conforme manual do fabricante a impressora possui as seguintes características:

- Volume de impressão: 220mm x 220mm x 250mm;
- Movimentação: Cartesiana
- Diâmetro do filamento: 1,75mm
- Precisão de impressão: 0,1mm
- Altura de camada: 0,1 – 0,4mm
- Velocidade máxima de impressão: 100mm/s
- Temperatura máxima do *hotend*: 255°C
- Temperatura máxima da mesa de vidro: 110°C

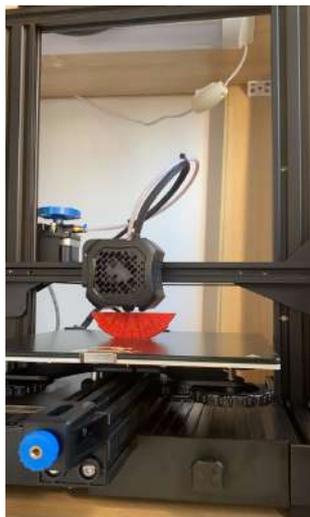


Figura 11 - Impressora montada realizando teste de impressão em PLA
FONTE: Imagem própria

3.1.2 Filamento de PETG

O material escolhido para estudo foi o PETG (politereftalato de etileno glicol). O filamento tem diâmetro de 1,75mm, sendo assim compatível com a impressora utilizada. O fabricante indica a temperatura de impressão na faixa de 225°C a 255°C e a temperatura da mesa aquecida entre 80°C e 90°C. A Figura 12 mostra o carretel sendo utilizado durante a impressão.



Figura 12 - Carretel de 1kg de PETG sendo utilizado para impressão.
FONTE: Imagem própria

3.1.3 Container de Armazenamento de Filamento

Um container de armazenamento (Figura 13) foi utilizado para o filamento ser colocado entre impressões. Isso se faz necessário uma vez que o PETG é sensível a umidade. Dessa forma, sempre antes de impressões, a umidade do filamento é retirada submetendo o mesmo a uma temperatura de 60°C durante seis horas, conforme indica o fabricante do container. Assim, fica garantido que o material se encontra nas mesmas condições durante a impressão de todos os corpos de prova, para assegurar maior confiabilidade no resultado dos testes subsequentes.



Figura 13 - Container para armazenamento do filamento
FONTE: Imagem própria

3.1.4 Software de Fatiamento

O software de fatiamento utilizado no projeto é o *Ultimaker Cura 3*, que é gratuito e amplamente utilizado pela comunidade de impressão 3D. Neste software o modelo “.STL” é transformado em um arquivo “.GCODE” que é então levado a impressora por um cartão SD.

É no software de fatiamento que os parâmetros de impressão são definidos, como: velocidade, temperatura do *hotend*, temperatura da mesa aquecida, percentual de utilização dos ventiladores, altura de camada, parâmetros de retração, entre outros. A Figura 14 mostra o menu principal do software de fatiamento utilizado.

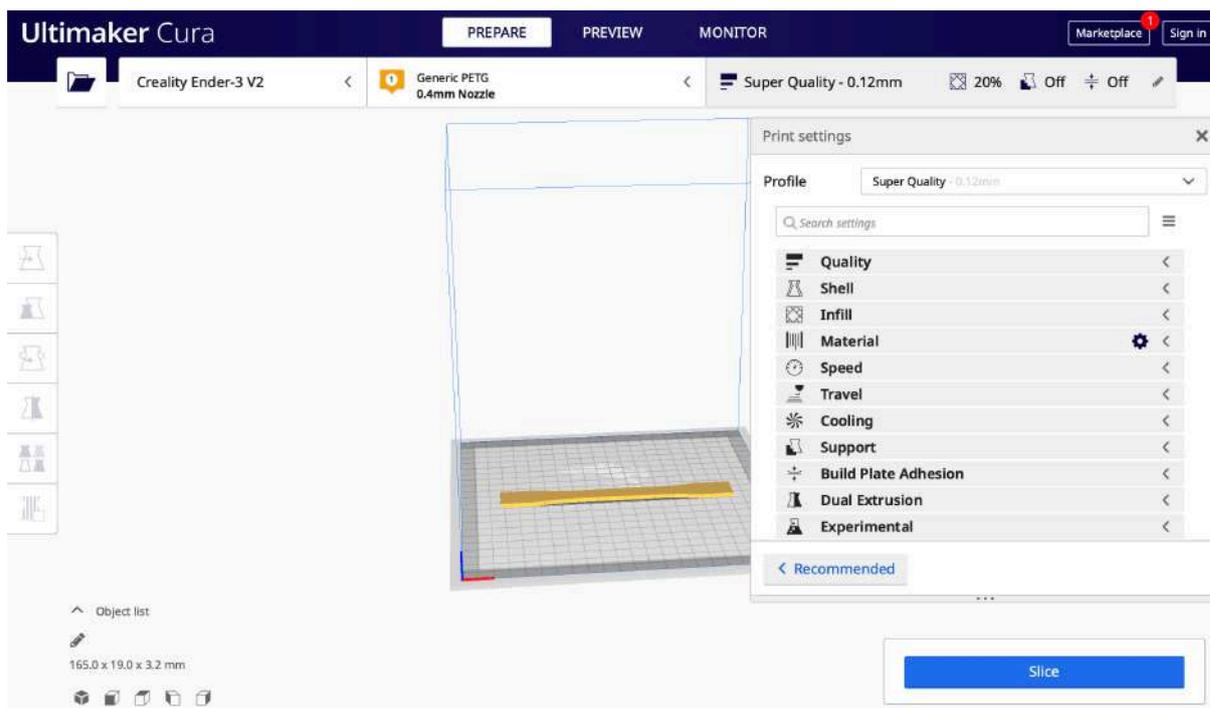


Figura 14 - Menu principal do software de fatiamento (Ultimaker Cura)
FONTE: Imagem própria

3.2 MÉTODOS

Nesta seção será descrito a metodologia utilizada no estudo, desde a melhoria da impressora até a realização dos testes.

3.2.1 Melhorias na Impressora Comercial

Primeiramente, as molas que regulam o nivelamento da mesa de impressão foram trocadas por molas mais rígidas, que são melhores para o nivelamento da mesa e desregulam mais dificilmente.

Em seguida a extrusora de plástico, que vem na impressora, foi trocada por uma extrusora de alumínio, que tem maior confiabilidade. Além disso, a extrusora de alumínio tem duas engrenagens que empurram o filamento até o *hotend*, enquanto a extrusora que vem na impressora possui somente uma engrenagem que empurra o filamento.

Após a instalação da nova extrusora, a configuração *E-steps/mm* foi ajustada. Esse ajuste foi feito regulando o comprimento do filamento que sai da extrusora (quando não acoplada ao *hotend*) quando o eixo é movimentado. Após uma verificar que saia da extrusora aproximadamente 53% menos material do que deveria, a configuração do *E-steps/mm* passou de 94,5 para 145,0.

3.2.2 Definição dos Parâmetros Fixos de Impressa

Testes de impressão foram realizados a fim de definir os parâmetros fixos de impressão. Primeiramente, foram impressos diversos barcos com parâmetros dentro da faixa indicada pelo fabricante e, assim, foi possível fazer um ajuste prévio da impressora para utilização do PETG. A Figura 15 mostra alguns dos barcos que foram impressos para ajustar a primeira camada e para conhecer as dificuldades de imprimir utilizando o material proposto. Os parâmetros utilizados nas impressões da Figura 15 se encontram na Tabela 5.

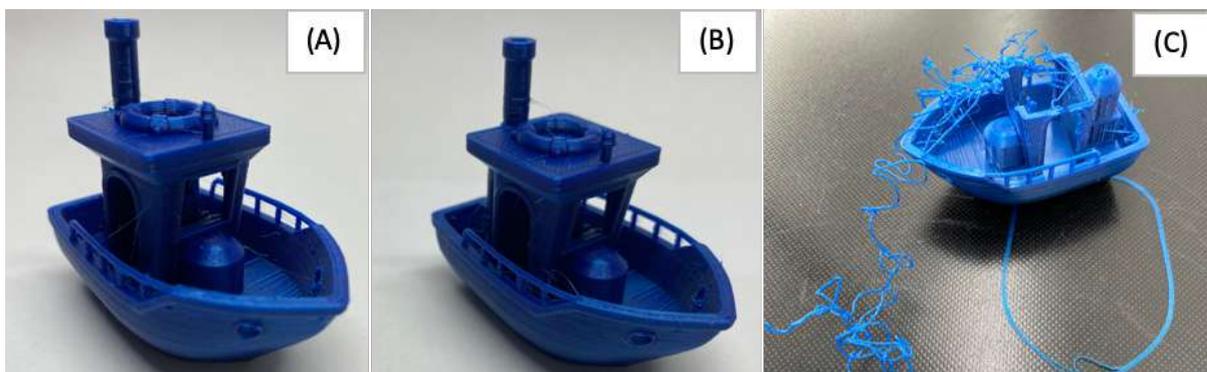


Figura 15 - Barcos impressos em PETG para testes iniciais
 FONTE: Imagem própria

Tabela 5 - Parâmetros de impressão dos barcos para teste inicial

Item	Altura de Camada (mm)	Temperatura da Mesa (°C)	Temperatura de Impressão (°C)	Velocidade de Impressão (mm/s)	Tipo de Adesão a Mesa	Tempo (h)
A	0,2	80	235	45	Skirt	2,45
B				35		2,90
C		70		45		-

FONTE: Tabela própria

A partir dos testes iniciais de impressão já foi possível verificar que, na amostra “C”, a temperatura da mesa aquecida não foi suficiente para realizar a adesão da primeira camada à mesa durante toda a impressão. Com isso, decidiu-se manter a temperatura da mesa em 80°C (amostras “A” e “B”).

Além disso, foi possível verificar que há um pequeno ganho de qualidade quando comparadas as amostras “A” e “B”, devido a redução da velocidade de impressão. Porém, essa melhora da qualidade de impressão vem com o aumento do tempo de impressão para a mesma peça. Dessa forma, escolheu-se prosseguir com uma velocidade média de 40mm/s.

Em seguida, foram impressas torres de temperatura. Usualmente, as torres de temperaturas de PETG variam de 225°C até 265°C. Porém, uma vez que o limite de temperatura da impressora comercial utilizada é de 255°C, este foi o limite máximo da torre impressa. Assim, cada sessão da torre foi impressa em uma temperatura diferente, indicada na mesma (com exceção das temperaturas de 265°C e 260°C, que foram impressas a 255°C). Na Figura 16 é possível ver uma das torres impressas.



Figura 16 - Torre de resfriamento impressa em PETG
FONTE: Imagem própria

Na torre é possível observar que em temperaturas mais elevadas, existe maior problema de teias (*strings* é o termo comumente utilizado). Em contrapartida, a redução da temperatura resulta em uma menor adesão entre as camadas, e esse efeito pode ser melhor notado a partir de 235°C, uma vez que a parte da impressão que não tem apoios (impressa sem suportes a um ângulo de 180°) começa a ter maior “empeno”, além de outros efeitos mais pontuais, como pontos com falta de deposição de material. Dessa forma, optou-se por utilizar a temperatura de 240°C, onde os efeitos danosos à impressão são menos notados.

A última etapa para a definição dos parâmetros fixos foi a impressão de torres de retração, uma variando a velocidade de retração – torre 1 – (a velocidade com que o filamento é retornado pela extrusora para que sejam realizados movimentos sem a deposição de material) e outra variando o comprimento de retração – torre 2 – (o comprimento do filamento que é retornado pela extrusora para que sejam realizados movimentos sem a deposição de material).

Os parâmetros da torre 1 e da torre 2 estão na Tabela 6 e a Figura 17 mostra ambas as torres.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados nas torres de retração

Torre	Altura de Camada (mm)	Temperatura de Impressão (°C)	Velocidade de Impressão (mm/s)	Velocidade de Retração (mm/s)	Distância de Retração (mm)
1	0,2	240	40	45	Seção 1: 4mm Seção 2: 5mm Seção 3: 6mm Seção 4: 7mm Seção 5: 8mm
2				Seção 1: 25mm/s Seção 2: 30mm/s Seção 3: 35mm/s Seção 4: 40mm/s Seção 5: 45mm/s	4

FONTE: Tabela própria

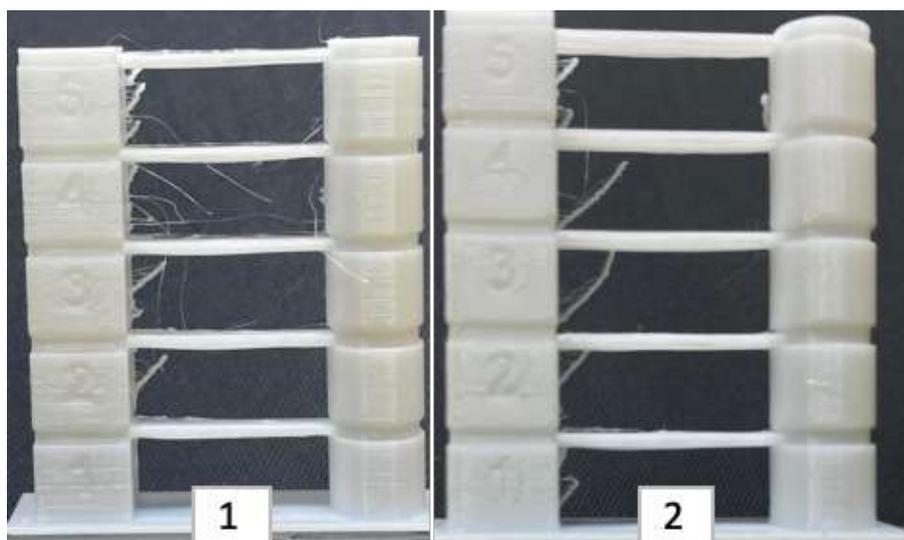


Figura 17 - Torres de retração impressas em PETG
FONTE: Imagem própria

Na torre 1 da Figura 17 é possível notar que a menor distância de retração acarreta uma redução considerável de teias. Porém, o menor valor, de quatro milímetros, apresenta falhas relativas à falta de deposição de material (no local do número “1”). Assim, foi escolhido como parâmetro comprimento de retração o valor de cinco milímetros.

Já na torre 2 é possível notar que uma menor velocidade de retração diminui as teias. Porém, fica visível que para 25mm/s de velocidade de retração houve um problema de adesão entre as camadas na ponte realizada na parte superior da seção. Dessa forma, a velocidade de retração escolhida foi de 30mm/s para os corpos de prova.

Na Tabela 7 estão os parâmetros fixos (básicos do software de fatiamento utilizado) escolhidos para a impressão dos corpos de prova, respeitando as recomendações do fabricante de filamento, seguindo os testes de impressão acima descritos.

Tabela 7 - Valores dos parâmetros fixos de impressão

Subgrupo	Parâmetro de Impressão	Valor
Casca	Espessura da Parede (mm)	1,6
	Número de Camadas da Parede	4
	Espessura do Topo/Fundo (mm)	0,8
	Número de Camadas Topo/Fundo	4 ou 7
Material	Temperatura de Impressão (°C)	240
	Temperatura da Mesa Aquecida (°C)	80
	% de Fluxo	90%
Velocidade	Velocidade de Impressão (mm/s)	40
Retração	Velocidade de Retração (mm/s)	30
	Distância de Retração (mm)	5
Resfriamento	% de Utilização dos Ventiladores	50%
Adesão à Mesa	Método de Adesão a Mesa Aquecida	Skirt (Saia)

FONTE: Tabela própria

3.2.3 Definição dos Parâmetros Variáveis de Impressão

Os parâmetros variáveis de impressão serão os estudados por este trabalho.

Escolheu-se variar:

1. Densidade de preenchimento (*infill*)
2. Altura de camada.

Esses parâmetros têm influência sobre o limite de escoamento da peça e sobre o tempo de fabricação da mesma. A altura de camada também tem forte influência na qualidade superficial do que é impresso pela técnica de FDM.

A Figura 18 mostra a diferença de percentuais de preenchimento em uma mesma peça para um mesmo perfil de *infill*. Os níveis de preenchimento escolhidos para serem estudados neste trabalho são: 70%, 50% e 30%; todos utilizando o perfil “grid” (rede).

As alturas de camada escolhidas foram de 0,20mm e de 0,12mm. Esse valor influencia na quantidade de camadas de topo e de fundo, uma vez que a espessura dessas camadas deve se manter a mesma para os testes subsequentes.

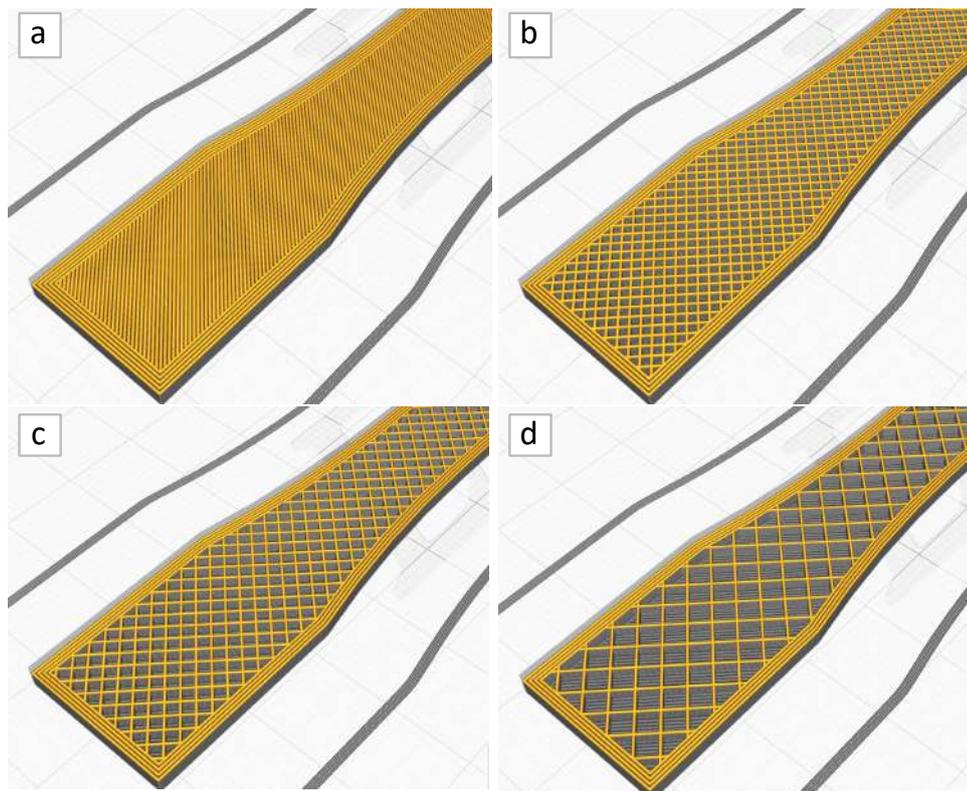


Figura 18 - Diferença entre percentuais de preenchimento. Perfil de preenchimento "grid". (a)100% (b)70% (c)50% (d)30%. FONTE: Imagem própria.

Além desses parâmetros, achou-se relevante analisar a diferença de perfil do preenchimento. Para isso, fixou-se a densidade de preenchimento em 70% e variou-se os perfis de preenchimento de acordo com a Figura 19. Os perfis escolhidos foram: *grid* (rede), *tri-hexagon* (tri-hexagonal) e concêntrico.

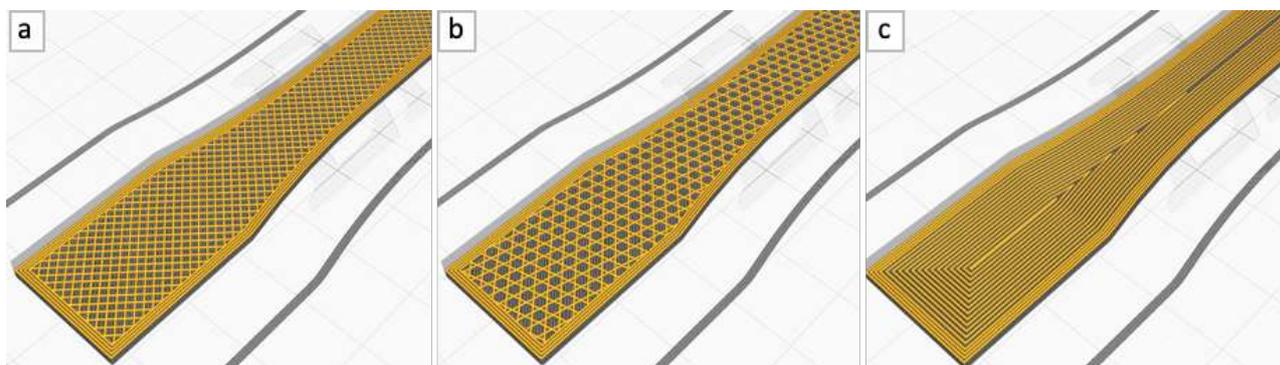


Figura 19 - Diferentes perfis de preenchimento para 70% de *infill*. (a)Grid, (b)Tri-Hexagonal, (c)Concêntrico. FONTE: Imagem própria

Com estes parâmetros definidos, foram impressos os corpos de prova, para que os testes sejam realizados, conforme a norma ASTM D638 – 14. Para cada

condição foram fabricados dois corpos de prova. As condições nas quais cada corpo de prova foi impresso podem ser vistas na Tabela 9.

Além disso, foram impressos quatro corpos de prova de referência (Tabela 8), para que os valores de ensaios sejam comparados com os encontrados na literatura: dois desses com espessura de camada de 0,20mm e os outros dois com espessura de camada de 0,12mm.

Tabela 8 - Condições de referência e parâmetros para a impressão dos corpos de prova de referência

Condição	%Infill	Camada (mm)	Perfil
REF1	100%	0,20	N/A
REF2	100%	0,12	N/A

FONTE: Tabela própria

Tabela 9 - Condições do estudo e parâmetros para a impressão dos corpos de prova

Condição	%Infill	Camada (mm)	Perfil
C01	30%	0,20	Grid
C02	30%	0,12	Grid
C03	50%	0,20	Grid
C04	50%	0,12	Grid
C05	70%	0,20	Grid
C06	70%	0,12	Grid
C07	70%	0,20	Tri-Hexagonal
C08	70%	0,12	Tri-Hexagonal
C09	70%	0,20	Concêntrico
C10	70%	0,12	Concêntrico

FONTE: Tabela própria

3.2.4 Impressão dos Corpos de Prova

Após as condições de impressão terem sido definidas, os corpos de prova foram inicialmente desenhados em 3D com a utilização de um software CAD e, em seguida, convertidos para um arquivo “.STL”. As dimensões, em milímetros, utilizadas no desenho estão expostas na Figura 20.

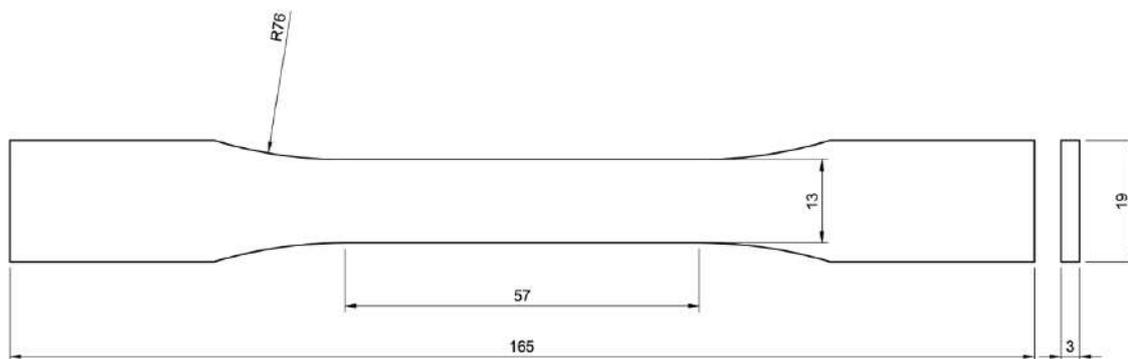


Figura 20 - Formato e dimensões (mm) dos corpos de prova a serem impressos
FONTE: Imagem própria

O arquivo base “.STL” foi exportado para o software de fatiamento utilizado, no qual as condições de impressão eram imputadas e um arquivo “.GCODE” foi gerado para cada condição definida nas Tabela 8 e Tabela 9. Os arquivos “.GCODE” foram passados para um cartão de memória que foi ligado à impressora.

Por fim, na impressora, escolhe-se o arquivo que se deseja imprimir para dar início ao processo de impressão. Foram impressos 2 corpos de prova para cada condição.

Antes de toda impressão, a umidade era retirada do material utilizando o container de armazenamento de filamento, conforme as recomendações do fabricante. Além disso, antes de se imprimir, a mesa de impressão era nivelada, para garantir homogeneidade dos corpos de prova.

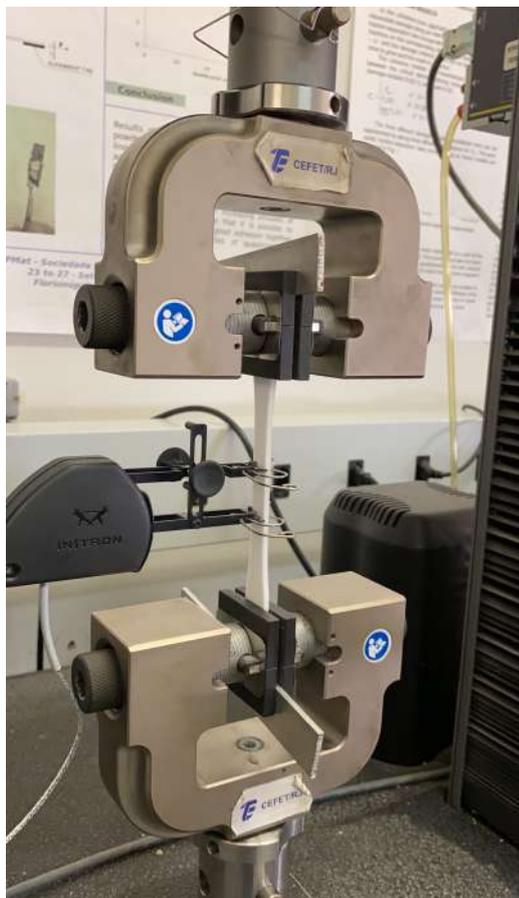
3.2.5 Medições e Ensaio de Tração

De acordo com os parâmetros fixos e variáveis definidos na etapa anterior, foi realizado o ensaio de tração dos corpos de prova impressos, de acordo com a norma ASTM D638 – 14, no Laboratório de Compósitos e Adesivos – LADES, do CEFET/RJ utilizando uma máquina de tração Instron modelo 5966 de 10kN.

Inicialmente todos os corpos de prova foram medidos com a utilização de um paquímetro calibrado. Foram realizadas três medições da espessura e três medições da largura da flecha, dentro do comprimento de calibração de cada corpo de prova. Todos os corpos de prova estavam dentro das tolerâncias previstas pela norma e os valores medidos foram imputados no programa da máquina de teste de tração.

Em seguida, os corpos de prova eram posicionados nas garras da máquina de ensaio de tração. A utilização de calços foi necessária para que os corpos de prova

ficassem firmes nas garras. Após o aperto das garras, o extensômetro é posicionado sobre os corpos de prova para que a deformação (mm/mm) seja captada durante o ensaio. A Figura 21 mostra um corpo de prova posicionado para realização do ensaio de tração.



**Figura 21 - Corpo de prova posicionado na máquina para realização do ensaio de tração
FONTE: Imagem própria**

Por fim, os ensaios foram realizados até a ruptura dos corpos de prova. A velocidade utilizada no ensaio foi de 5 milímetros por minuto, respeitando a norma, conforme Tabela 4. Para o primeiro corpo de prova ensaiado na condição 5 (CO5), o extensômetro captou valores muito elevados de deformação (mm/mm) e, por isso, os dados de deformação deste ensaio foram expurgados dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, serão analisados os resultados do ensaio de referência, para que os valores encontrados com *infill* de 100% possam ser comparados com os valores da literatura.

Foram realizados dois estudos utilizando o material PETG. O primeiro foi relacionado ao perfil do *infill* e o segundo foi realizado sobre o percentual de *infill*. Ambos os estudos compararam valores de altura de camada. As condições de ambos os estudos estão expostas na Tabela 9.

Nesta seção os resultados de ambos os estudos serão expostos separadamente.

4.1 RESULTADOS DE REFERÊNCIA

Os resultados dos ensaios dos corpos de prova de referência estão exibidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos corpos de prova de referência

Referência	σ Limite de Resistência (MPa)	ϵ Deformação na tensão máxima (mm/mm)	E Módulo de Elasticidade (GPa)	Tempo de Impressão (h)	Peso (g)
REF1	32,3	3,43%	1,51	1,62	8,85
REF2	33,9	3,29%	1,57	2,58	8,90

FONTE: Tabela própria

Os valores obtidos para o limite de resistência, a deformação na tensão máxima e o módulo de elasticidade estão condizentes com os encontrados por Santana *et al.* (Tabela 2), para o PETG impresso com ângulo de varredura de 45°/-45° (como *infill* é de 100%, não há padrão de *infill* aplicado, mas sim camadas depositadas com variação de ângulo de 45° e -45° para a camada subsequente).

Os valores de resistência estão condizentes, também, com os obtidos por Srinivasan *et al.* (2020) para um percentual de *infill* de 100% (Figura 7).

Neste trabalho denominam-se dados de saída os valores de tempo de fabricação do corpo de prova e o peso.

4.2 PERCENTUAL DE INFILL

O primeiro parâmetro que foi estudado no presente trabalho foi a influência do percentual de *infill* sobre as propriedades mecânicas do PETG e sobre os dados de saída de impressão (tempo de fabricação e peso final).

Para cada condição foram fabricados dois corpos de prova. A Figura 22 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas para cada condição, onde é possível perceber que há uma homogeneidade no padrão de cada condição, evidenciando que o processo de fabricação foi bem uniforme (garantindo repetibilidade).

Vale ressaltar, como já mencionado na seção 3.2.5, que devido a uma falha no extensômetro durante o ensaio de tração, os valores obtidos de deformação e, conseqüentemente, de módulo de elasticidade da condição 5 foram descartados para os resultados deste estudo.

Após o rompimento de cada CP notou-se que para alturas de camada de 0,20mm, o material apresenta uma curva mais côncava próximo a tensão máxima e permanece em regime plástico durante uma maior faixa de deformação, o que costuma ser característica de maior ductilidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2010), quando comparado às curvas de altura de camada 0,12mm. Embora todas as curvas se aproximem mais a um comportamento dúctil do que frágil, a curva que apresenta maior característica de ductilidade foi a da condição 5 (Figura 22e), enquanto as demais tem características de uma ruptura mais frágil. O mesmo padrão foi notado para o aumento do percentual de *infill*: a curva apresenta característica de maior ductilidade quando se aumenta o percentual de *infill* utilizado na fabricação dos corpos de prova.

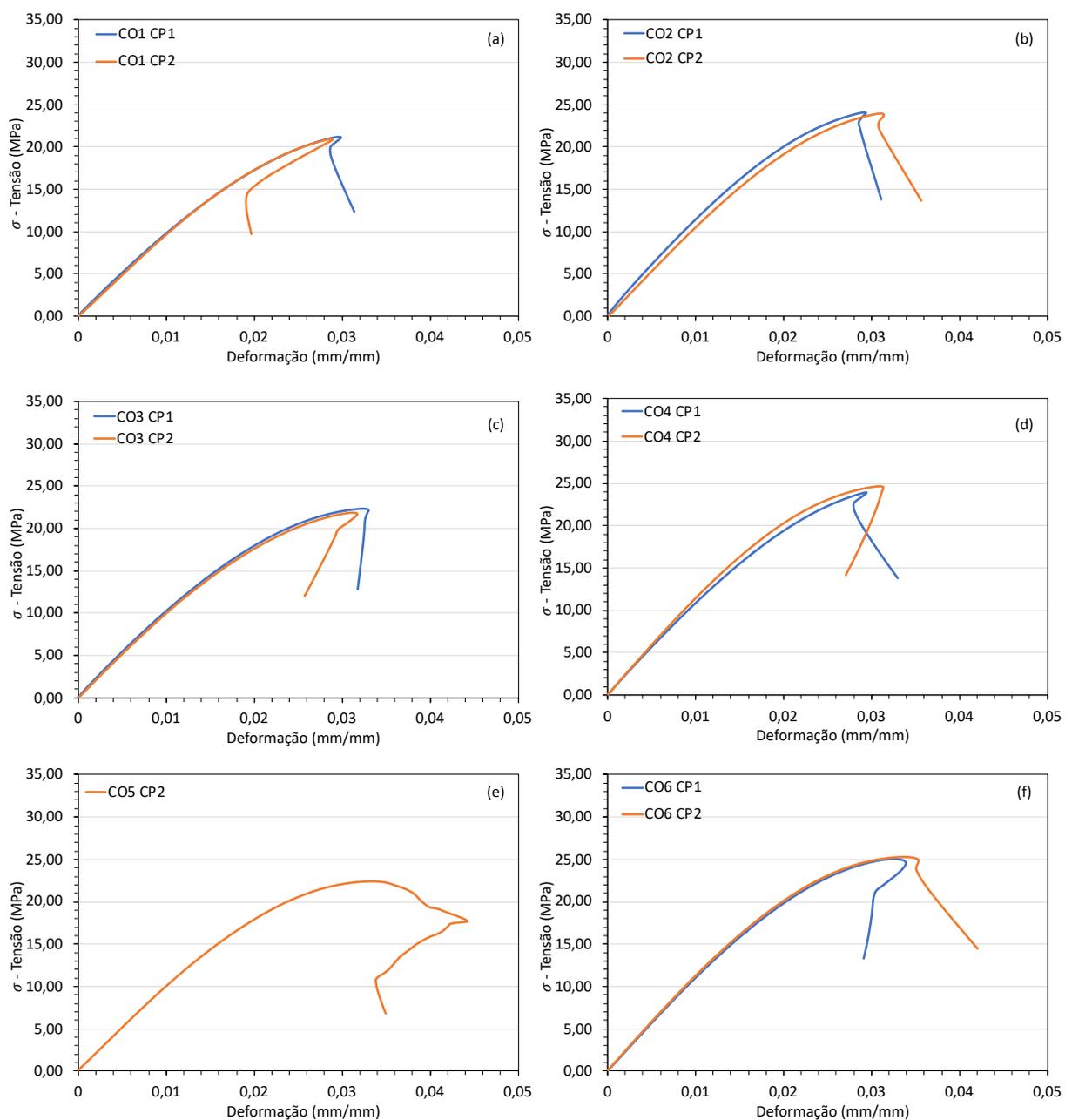


Figura 22 - Curvas de tensão vs. deformação para as condições de 1 a 6
FONTE: Imagem própria

A Figura 23 mostra um corpo de prova rompido de cada condição para melhor evidenciar essa diferença.

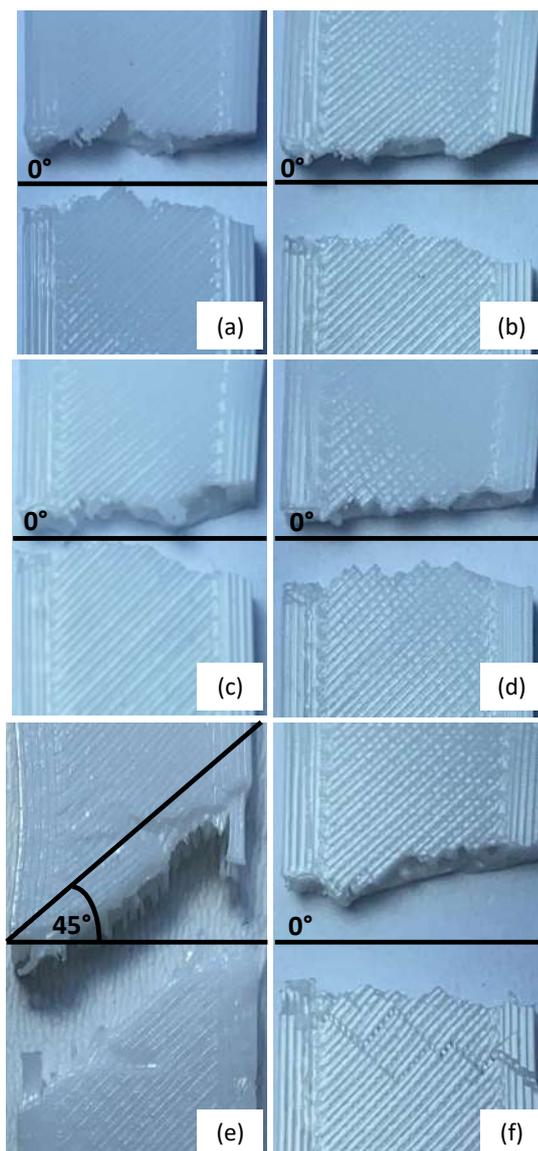


Figura 23 - Zona de ruptura de um corpo de prova para cada condição CO1(a), CO2(b) CO3(c), CO4(d), CO5(e) e CO6(f) de variação de percentual de infill.
 FONTE: Imagem própria

As rupturas mostradas para as condições de 1 a 6, com exceção da condição 5, mostram um comportamento de uma fratura mais frágil, uma vez que a fratura ocorreu em angulação mais próxima a 0° . Já a condição 5, que teve uma ruptura com angulação mais próxima a 45° mostra um perfil de maior ductilidade quando comparado às demais (SANTANA *et al.*, 2018). Sendo assim, o comportamento das curvas tensão-deformação e a análise das rupturas dos corpos de prova demonstraram a mesma tendência. Fica evidente, assim, que tanto a redução do percentual de *infill* quanto a redução da altura de camada colaboram para uma ruptura mais frágil.

A média dos valores resultante dos ensaios e do processo de fabricação dos corpos de prova onde se variou o percentual de *infill* entre 30%, 50% e 70% para um mesmo perfil (*grid*) estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Média dos resultados dos ensaios das condições 1 a 6

Condição	σ Limite de Resistência (MPa)	ϵ Deformação na tensão máxima (mm/mm)	E Módulo de Elasticidade (GPa)	Tempo de Impressão (h)	Peso (g)
C01	21,04	2,93%	0,99	1,12	6,40
C02	23,99	3,02%	1,14	1,83	6,73
C03	22,11	3,18%	1,06	1,18	6,95
C04	24,29	3,02%	1,16	1,95	7,31
C05	22,62	3,32%	1,02	1,25	7,41
C06	25,14	3,30%	1,14	2,03	7,77

FONTE: Tabela própria

Os resultados gerais de limite de resistência, deformação na tensão máxima, módulo de elasticidade, tempo de impressão e peso, para cada corpo de prova, estão dispostos nas Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28, respectivamente. Eles serão discutidos com maior profundidade nas seções subsequentes.

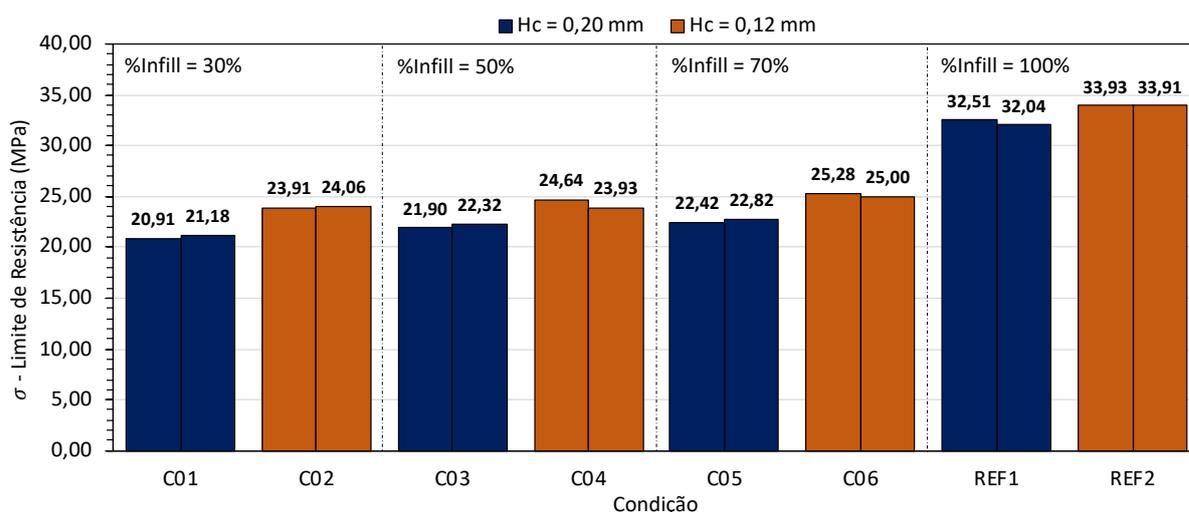


Figura 24 - Limite de resistência para as condições de 1 a 6

FONTE: Imagem própria

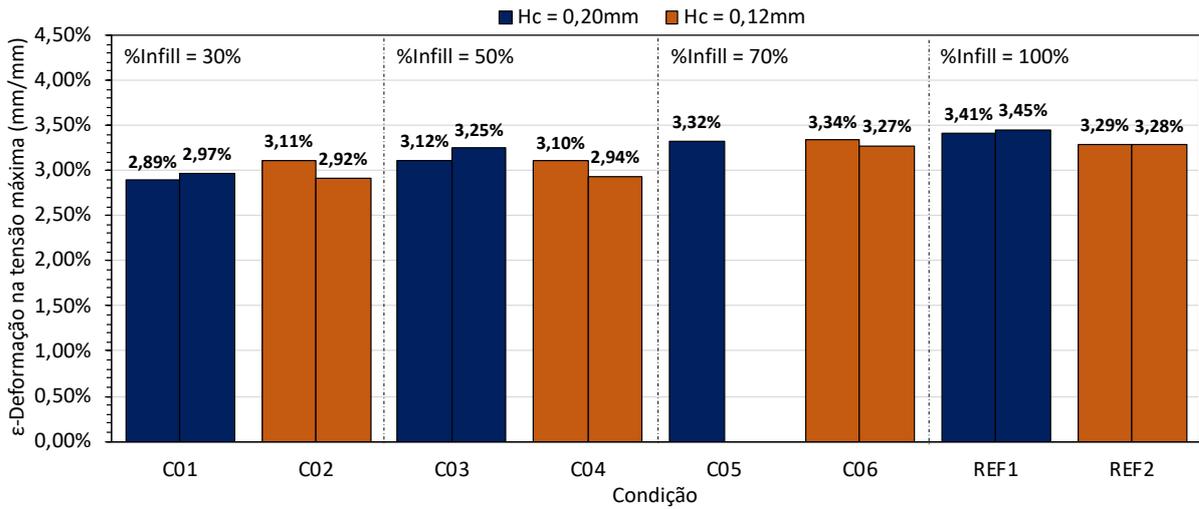


Figura 25 - Deformação na tensão máxima para as condições de 1 a 6
FONTE: Imagem própria

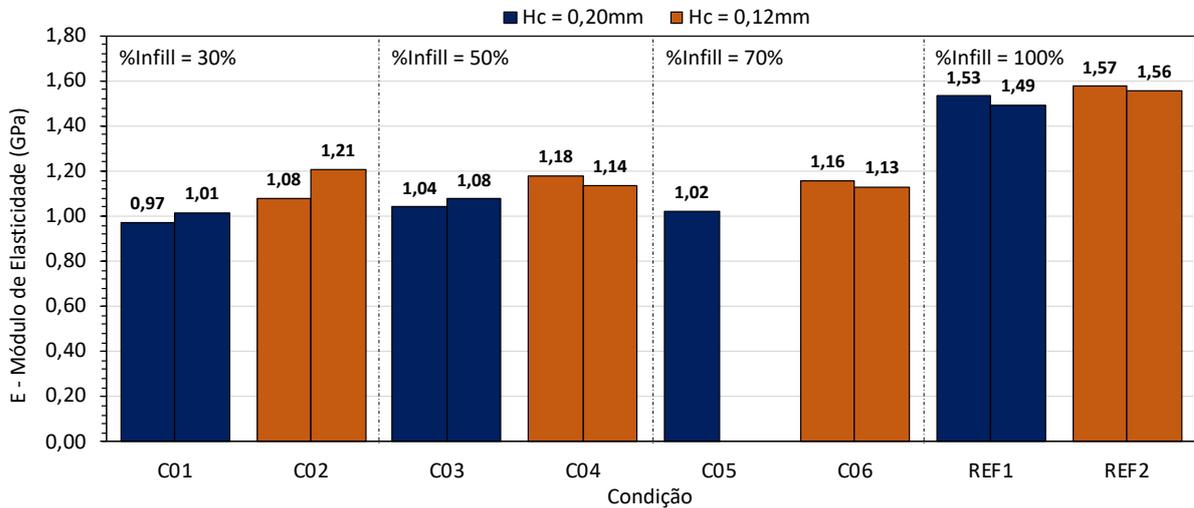


Figura 26 - Módulo de elasticidade para as condições de 1 a 6
Fonte: Imagem própria

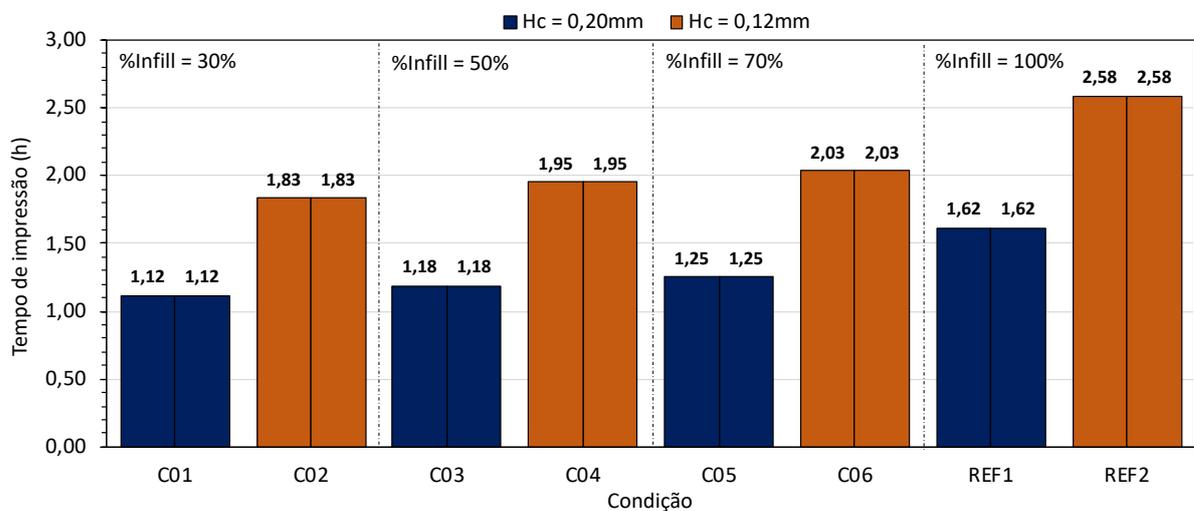


Figura 27 - Tempo de impressão para as condições de 1 a 6
FONTE: Imagem própria

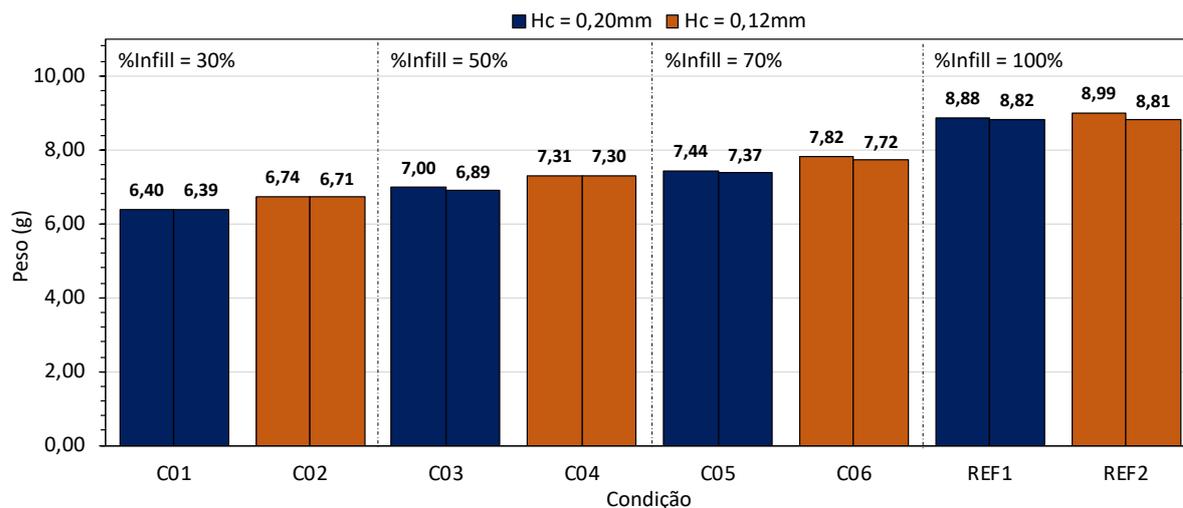


Figura 28 - Peso para as condições de 1 a 6
FONTE: Imagem própria

Após analisar todos os gráficos apresentados, fica claro que ao diminuir a altura de camada, tem-se um padrão de aumento nos valores de propriedades mecânicas e nos dados de saída. Entretanto, para melhor descrever essa influência, foi realizado um estudo mais detalhado, conforme é apresentado a seguir.

4.2.1 Propriedades vs. Altura de Camada

A Figura 29 mostra a influência da altura de camada dos três percentuais de *infill* estudado no limite de resistência do PETG.

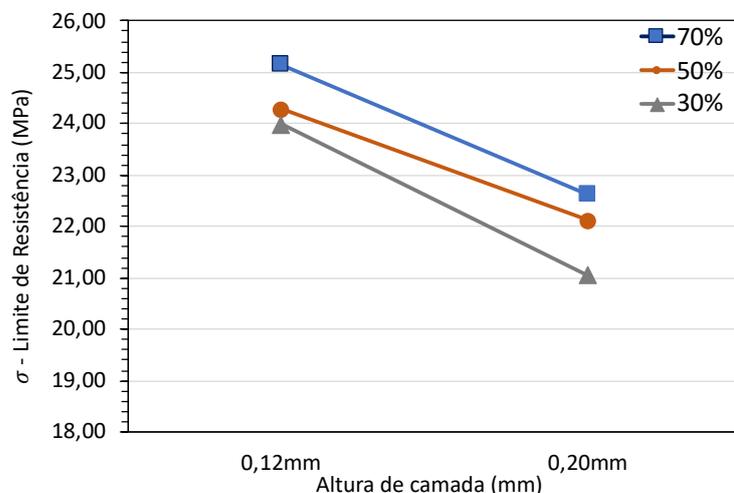


Figura 29 - Limite de resistência vs. altura de camada de acordo com percentual de infill
FONTE: Imagem própria

Como pode ser observado na Figura 29, a tensão limite de resistência do material diminui para todos os percentuais de *infill* quando a altura de camada aumenta. Essa redução é de, aproximadamente, 11% quando utilizado 70% de *infill*, 10% quando utilizado 50% de *infill* e 14% quando utilizado 30% de *infill*, mostrando assim um percentual de redução semelhante para os percentuais de *infill* utilizados e, por esta razão, as retas têm um padrão bem paralelo.

Os resultados encontrados para o aumento do limite de resistência com a redução da altura de camada são condizentes com os encontrados por Martins (2017a) e por Sood *et al.* (2010). Para uma elevação da altura de camada de 0,10mm para 0,17mm os autores encontraram redução na tensão máxima. Porém, vale ressaltar que esses autores apontaram que, para alturas de camada muito inferiores, o aumento das distorções e das tensões residuais (por conta da maior taxa de resfriamento), pode gerar uma queda no limite de resistência do material.

O aumento do limite de resistência é esperado, uma vez que, para uma altura de camada menor, mais cordões e camadas são depositados na peça. Essa justificativa foi utilizada por Oliveira (2017) em relação ao percentual de *infill*, mas ela também é verdadeira para a altura de camada. No trabalho apresentado, para um maior o número de cordões, cada cordão fica responsável por sustentar uma carga menor. Dessa forma, a tensão máxima aumenta para um número maior de cordões, o que explica a relação entre tensão de resistência e altura de camada.

Ainda sobre esse tópico, Martins (2017a) explicou esse comportamento associando a menor altura de camada a um melhor preenchimento dos vazios existentes na peça. Pois, para menores alturas de camada, a deformação que o bico de impressão faz no cordão depositado ajuda a preencher melhor os vazios existentes entre ele e o cordão anterior, fortalecendo também a ligação entre eles. Assim, a resistência mecânica é elevada. A Figura 9 ilustra esse comportamento.

Além da anisotropia, outro importante quesito para a resistência mecânica é a velocidade de resfriamento do material. Sendo assim, é esperado que alturas de camada menores resfriem mais rápido e, portanto, tenham uma resistência mecânica mais elevada, comportamento que é coerente com os resultados obtidos. Vale ressaltar que a taxa de resfriamento, no entanto, não pode ser elevada a ponto de prejudicar a adesão entre as camadas subsequentes e gerar tensões residuais elevadas (SOOD *et al.*, 2010).

A Figura 30 mostra a influência da altura de camada dos três percentuais de *infill* estudado na deformação na tensão máxima do PETG.

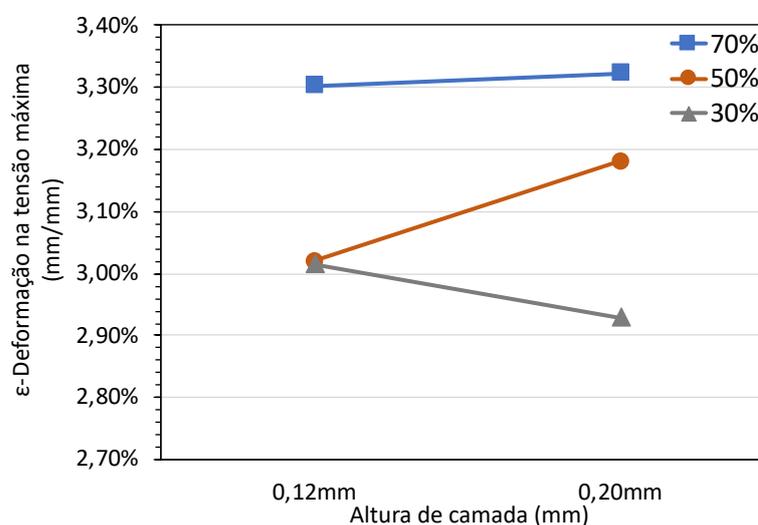


Figura 30 - Deformação na tensão máxima vs. altura de camada de acordo com percentual de infill

FONTE: Imagem própria

Com base na Figura 30, a deformação na tensão máxima não apresentou uma tendência igual com o aumento da altura de camada para os diferentes percentuais de *infill* estudados. A deformação não teve alteração significativa para o *infill* de 70%, teve aumento para o *infill* de 50% e teve redução para o *infill* de 30%, com o aumento da altura de camada.

A redução da deformação com o aumento da espessura de camada que ocorreu no percentual de *infill* de 30%, destoando do comportamento dos demais percentuais de *infill*, pode ter sido resultado de um baixo número de amostras ensaiadas. Assim, para que um comportamento mais coerente seja detectado em relação ao aumento da altura de camada e a deformação para diferentes percentuais de *infill*, é necessário realizar um estudo mais detalhado e com um maior número de amostras.

A Figura 31 mostra a influência da altura de camada dos três percentuais de *infill* estudado no módulo de elasticidade e no tempo de impressão do PETG.

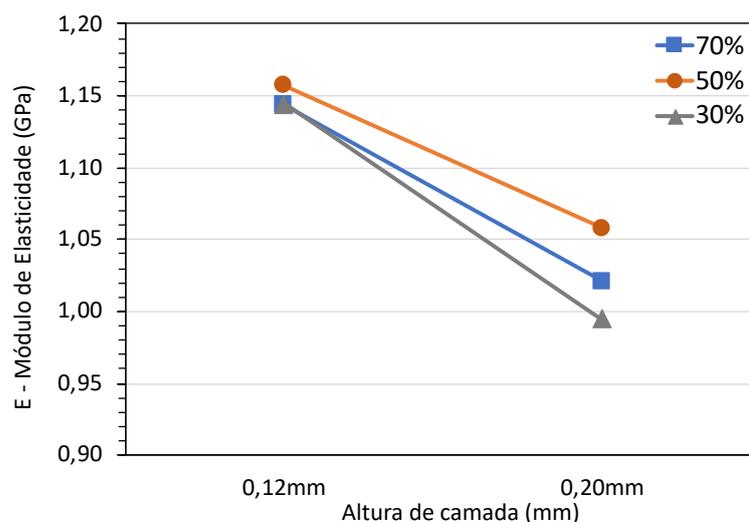


Figura 31 - Modulo de elasticidade vs. altura de camada de acordo com percentual de infill
FONTE: Imagem própria

O módulo de elasticidade do material diminui para todos os percentuais de *infill* quando a altura de camada aumenta. Essa redução é de, aproximadamente, 12% quando utilizado 70% de *infill*, 9% quando utilizado 50% de *infill* e 15% quando utilizado 30% de *infill*, mostrando assim um percentual de redução semelhante para os perfis de *infill* utilizados (Figura 31).

Martins (2017a) encontrou resultados similares, pois para o autor, a redução da espessura de camada também está associada a um aumento da rigidez. Ele encontrou uma redução de 2,2% na rigidez quando a altura de camada variou de 0,06mm para 0,10mm e uma redução de 0,5% quando a altura de camada variou de 0,10mm para 0,17mm. Assim, a tendência de redução do módulo de elasticidade com o aumento da altura de camada se confirma. A explicação para esse comportamento é a mesma utilizada para a relação entre limite de resistência e altura de camada explicado anteriormente (redução de vazios e maior número de cordões).

A Figura 32 mostra a influência da altura de camada dos três percentuais de *infill* estudado no módulo de elasticidade e no tempo de impressão do PETG.

O tempo de impressão do material diminui para todos os percentuais de *infill* quando a altura de camada aumenta. Essa redução é de, aproximadamente, 64% em todos os percentuais de *infill* estudados (Figura 32). Essa redução tem impacto significativo no quesito produtividade e deve ser sempre levada em consideração ao escolher a altura de camada utilizada, uma vez que a redução de tempo é percentualmente superior a todas as reduções de propriedades mecânicas do PETG.

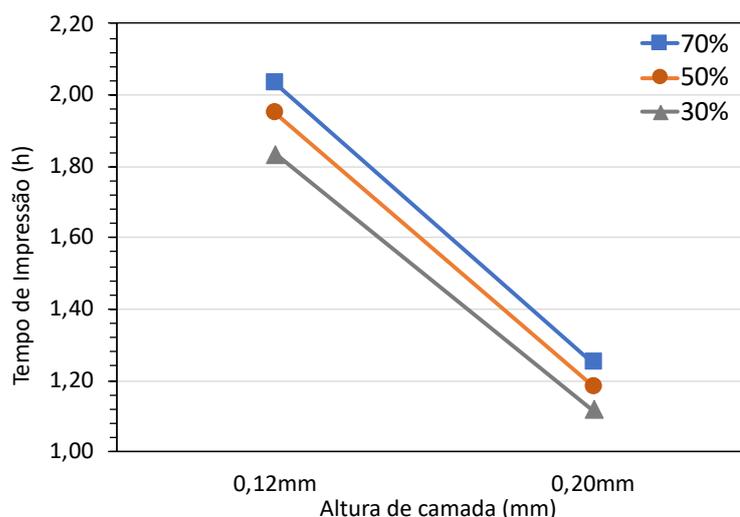


Figura 32 - Tempo de impressão vs. espessura de camada de acordo com percentual de infill
FONTE: Imagem própria

Esse comportamento era esperado uma vez que, quando há a redução da altura de camada, mais camadas e cordões são necessários para compor uma peça com as mesmas dimensões. Dessa forma, como o tempo para imprimir um único cordão não se altera, uma vez que a velocidade de impressão é a mesma, é necessário um maior tempo para a fabricação da peça quando a espessura de camada é reduzida.

4.2.2 Produtividade vs. Percentual de Infill

A Figura 33 mostra que tanto o limite de resistência quanto o tempo de impressão aumentam com o aumento do percentual de *infill*. Dessa forma, o ganho em resistência tem uma perda em produtividade.

Ao aumentar o percentual de *infill* de 30% para 50%, há um ganho de aproximadamente 3,0% em resistência e uma penalização de aproximadamente 6,2% em tempo de impressão. Porém, ao aumentar o percentual de *infill* de 50% para 70%, há um ganho de aproximadamente 3,0% em resistência e uma penalização de aproximadamente 4,8% em tempo de impressão.

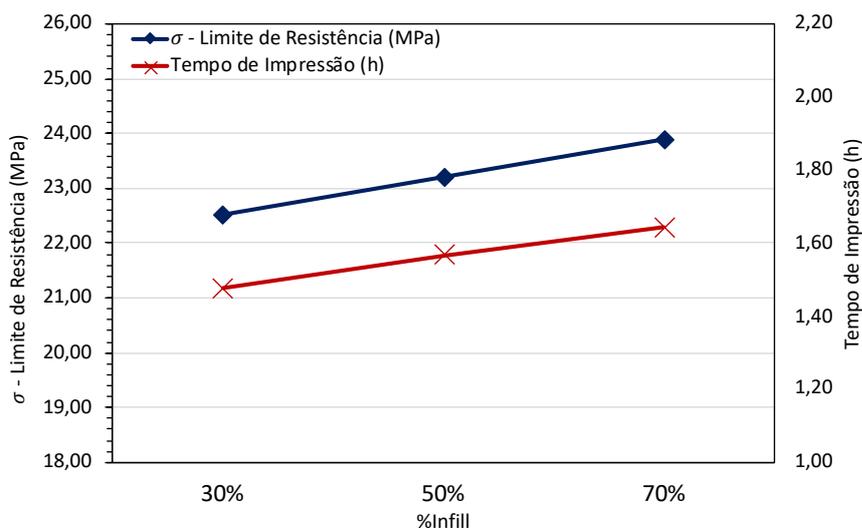


Figura 33 - Limite de resistência e tempo de impressão por percentual de infill
FONTE: Imagem própria

Dessa forma, nota-se uma tendência: ao aumentar o percentual de *infill*, o ganho de resistência mantém um aumento quase linear de aproximadamente 3%, enquanto o tempo de impressão reduz a sua penalização.

Os valores encontrados têm ligação forte com o *air gap* explicado na seção 2.7.1 deste trabalho. Já era esperado que o aumento do percentual de *infill* gerasse tanto a elevação do tempo de impressão, uma vez que é mais demorado para se fabricar cada camada, quanto o aumento da resistência mecânica, já que se aumenta a quantidade de material na seção transversal (a área útil da seção transversal), sendo necessária uma força maior para que haja a ruptura. Porém, o resultado prático obtido é fundamental para a quantificação destas variações.

Oliveira (2017) encontrou que um aumento de 10% do percentual de *infill* resulta em aproximadamente 11% da resistência à tração da peça. Embora o aumento encontrado por ele tenha sido mais significativo, é importante levar em consideração que o material estudado era outro. Mesmo com os valores diferentes, a tendência encontrada foi a mesma. Oliveira (2017) atribuiu o aumento da resistência mecânica ao aumento do número de cordões que ocorre dentro da peça quando o percentual de *infill* é aumentado (similar ao que ocorre para a redução da altura de camada).

Srinivasan (2020) encontrou que o limite de resistência do material aumenta com o aumento do percentual de *infill*. Os valores de resistência encontrados no trabalho apresentado pelo autor foram um pouco superiores aos do presente estudo, porém isso pode ser explicado pela utilização de uma espessura de camada de

0,10mm (menor). Os resultados encontrados no trabalho de Srinivasan (2020) está na Figura 7. Este estudo é uma importante fonte de comparação, uma vez que o material utilizado também foi o PETG e o perfil de *infill* utilizado foi o *grid*.

A Figura 34 mostra que a deformação na tensão máxima também aumenta com o aumento do percentual de *infill*. Dessa forma, o aumento da deformação também implica numa perda em produtividade.

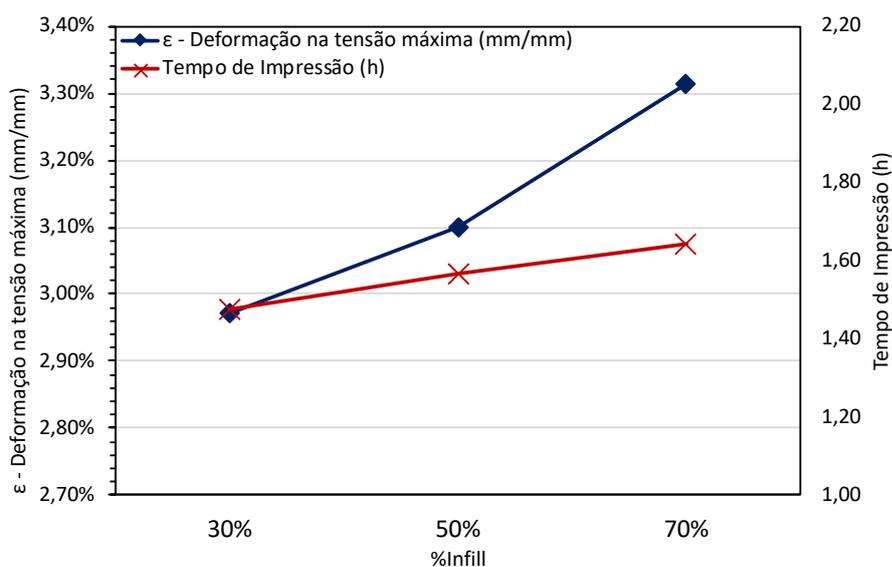


Figura 34 - Deformação na tensão máxima e tempo de impressão por percentual de infill
FONTE: Imagem própria

Diferentemente do limite de resistência, a deformação na tensão máxima tem uma tendência de aumento significativo com o aumento do percentual de *infill*. Ela aumentou 4,3% com o aumento do percentual de *infill* de 30% para 50% e teve um aumento ainda mais significativo de 6,9% com o aumento do percentual de *infill* de 50% para 70%.

Essa tendência pode ser explicada pelo fato de que quanto maior a quantidade de material utilizada na seção transversal da peça, menor é a quantidade de vazios existentes e, além disso, maior é o caminho que uma trinca interna pode percorrer antes que sua propagação rompa a peça. Em outras palavras, como a trinca tem maior dificuldade para se propagar, mais o material consegue deformar antes de romper. A trinca em materiais poliméricos se inicia em regiões altamente tensionadas, que estão relacionadas a defeitos e heterogeneidades e se propaga através de vazios do material. A figura representa a expansão dos vazios do material (a) que formam

pontes fibrilares e a propagação da trinca (b) quando essas pontes e vazios se encontram (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

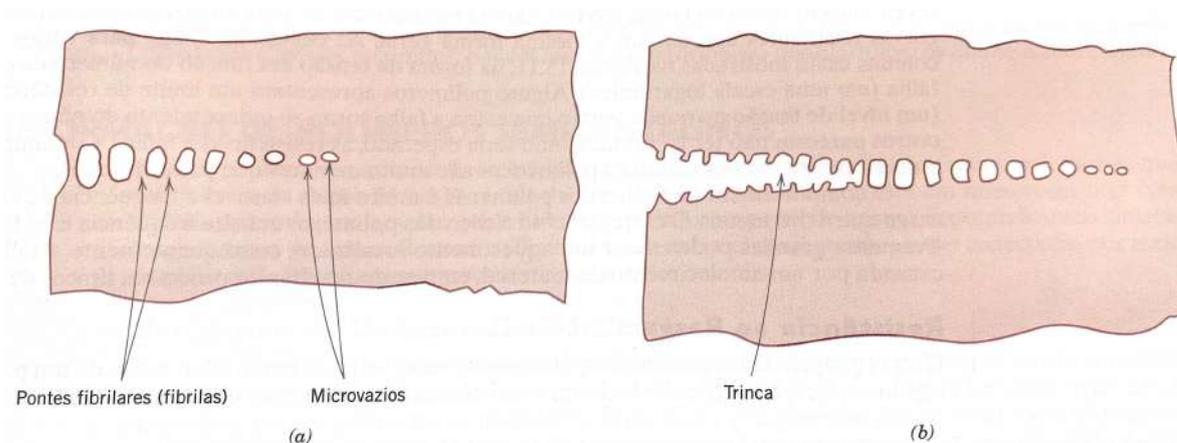


Figura 35 - Desenho esquemático de uma fibrilação (a) e a formação e propagação da trinca (b)
FONTE: (CALLISTER; RETHWISCH, 2010)

A Figura 36 mostra que o módulo de elasticidade não manteve um padrão de variação consistente com o aumento do percentual de *infill*.

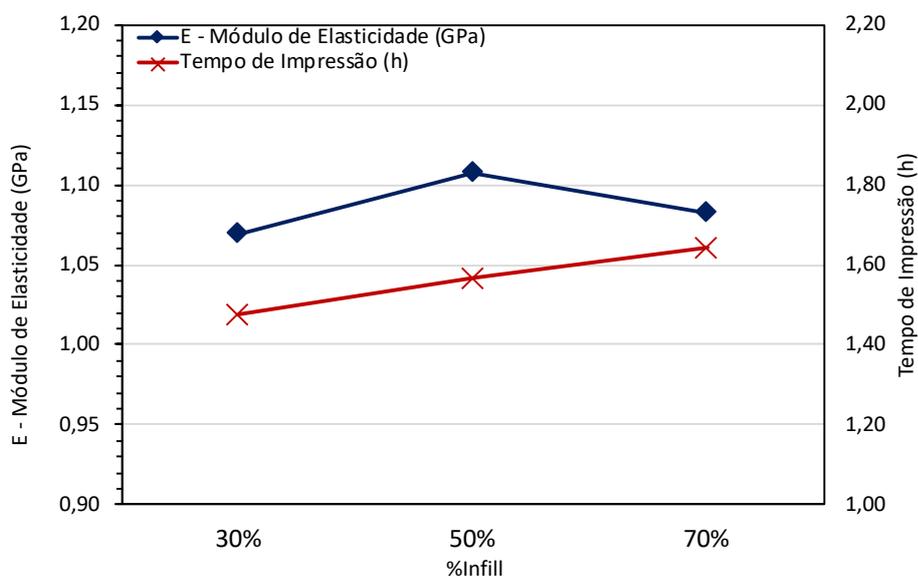


Figura 36 - Módulo de elasticidade e tempo de impressão por percentual de infill
FONTE: Imagem própria

A tendência mais próxima é a de manutenção do módulo de elasticidade com o aumento do percentual de *infill*. Dessa forma, a perda de produtividade não se reverte em aumento ou redução significativa do módulo de elasticidade. Esse resultado vai de encontro ao resultado descrito por Oliveira (2017), que observou uma tendência de aumento do módulo de elasticidade da peça quando há um aumento do

percentual de *infill*. Vale ressaltar que o autor do estudo acima utilizou variações de apenas 5% do percentual de *infill*, o que pode ter influência sobre as tendências encontradas.

Outros estudos também relacionaram a redução do *air gap*, consequência do aumento do percentual de *infill*, a um aumento da rigidez da peça. Indo assim, de encontro aos resultados encontrados no presente trabalho (AHN *et al.*, 2002; MARTINS, 2017a; SOOD *et al.*, 2011; SOOD *et al.*, 2010).

Dessa forma, recomenda-se a utilização de uma maior quantidade de corpos de prova para que o efeito do aumento do percentual de *infill* sobre a rigidez da peça seja melhor entendido para as condições estudadas.

4.3 PERFIL DO INFILL

Outro parâmetro que se considerou importante analisar é a influência do perfil de *infill*, juntamente com a variação da altura de camada, nas propriedades e nos dados de impressão do PETG.

O percentual de 70% foi escolhido para ser estudado com maior profundidade por apresentar o maior limite de resistência entre os demais percentuais. Além disso, sua escolha também foi baseada no fato de que a penalização do tempo de impressão reduziu para o mesmo ganho de resistência ao comparar o aumento do percentual de *infill* de 50% para 70% com o de 30% para 50% (seção 4.2.2).

Para cada condição foram fabricados dois corpos de prova. A Figura 37 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas para cada uma delas, onde é possível perceber que há uma homogeneidade no padrão de cada condição, evidenciando que o processo de fabricação foi bem uniforme (garantindo repetibilidade).

Vale ressaltar, como já mencionado na seção 3.2.5, que, devido a uma falha no extensômetro durante o ensaio de tração, os valores obtidos de deformação e, conseqüentemente, de módulo de elasticidade das condições 5 e 8 foram descartados para os resultados deste estudo.

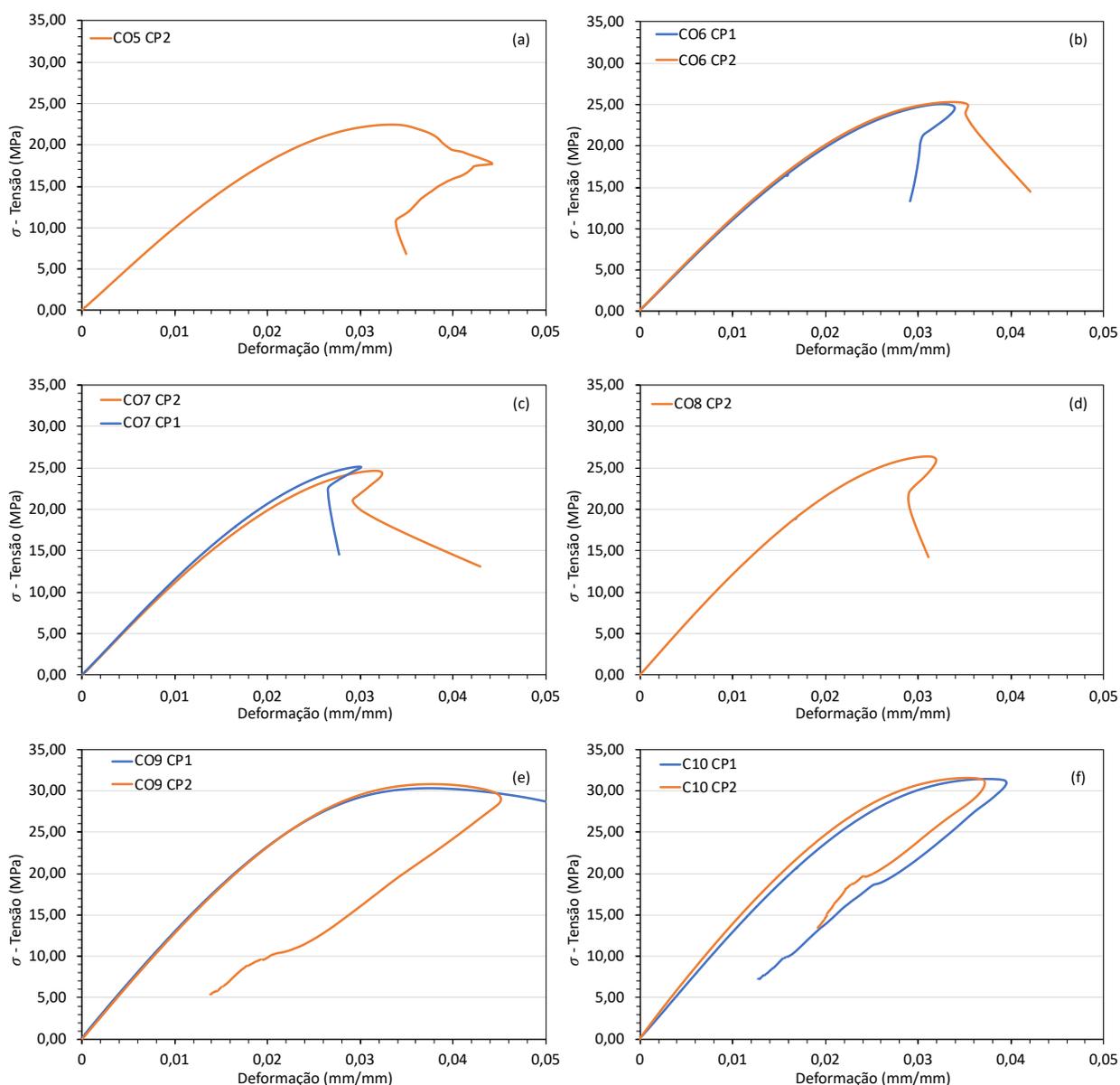
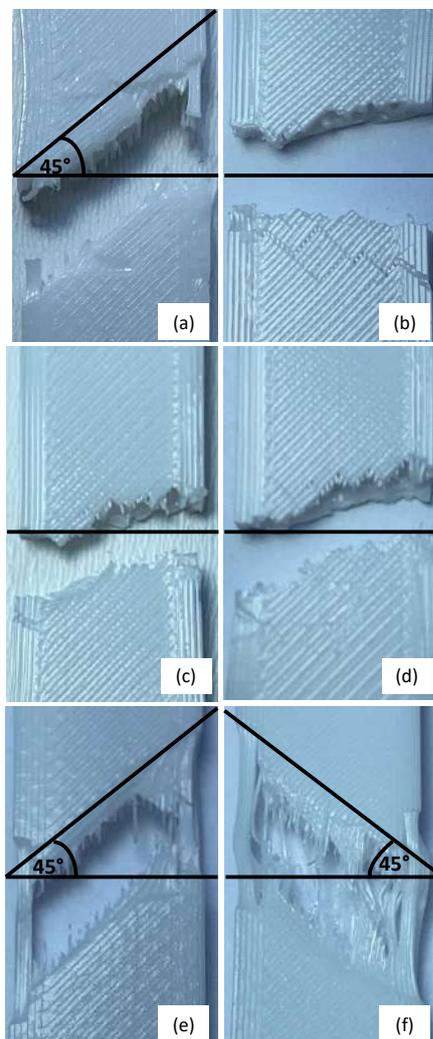


Figura 37 - Curvas de tensão vs. deformação para as condições de 5 a 10
FONTE: Imagem própria

Após o rompimento de cada CP notou-se o mesmo padrão do estudo de percentual de *infill*, onde, para alturas de camada de 0,20mm, o material apresenta uma curva mais côncava próximo a tensão máxima, o que costuma ser característica de maior ductilidade, quando comparado às curvas de altura de camada 0,12mm.

Porém, as curvas que apresentam maior característica de ductilidade foram as das condições 5, 9 e 10 (Figura 37), enquanto as demais tem características de uma ruptura mais frágil. Isso porque o perfil de *infill* também mostrou ter influência no comportamento das curvas, principalmente para o perfil concêntrico (condições 9 e 10).

A Figura 38 mostra um corpo de prova rompido de cada condição para melhor evidenciar essa diferença.



**Figura 38 - Zona de ruptura de um corpo de prova para cada condição CO5(a), CO6(b) CO7(c), CO8(d), CO9(e) e CO10(f) de variação de perfil de infill
FONTE: Imagem própria**

Os perfis de ruptura estão condizentes com as curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 37, uma vez que as curvas que se aproximam mais de um perfil dúctil têm zonas de ruptura mais próximas a 45° . E, de igual forma, as curvas que se aproximam mais de um perfil frágil (têm a concavidade da curva menor) têm zonas de ruptura mais próximas de 0° , conforme apresentado por Santana *et al.* (2018).

A média dos valores resultante dos ensaios e do processo de fabricação dos corpos de prova onde se variou o perfil de *infill* entre grid, tri-hexagonal e concêntrico para o mesmo percentual de preenchimento de 70% estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Média dos resultados dos ensaios das condições 5 a 10

Condição	σ Limite de Resistência (MPa)	ϵ Deformação na tensão máxima (mm/mm)	E Módulo de Elasticidade (GPa)	Tempo de Impressão (h)	Peso (g)
C05	22,62	3,32%	1,02	1,25	7,41
C06	25,14	3,30%	1,14	2,03	7,77
C07	24,89	3,05%	1,16	1,25	7,55
C08	26,29	3,11%	1,25	2,03	7,79
C09	30,43	3,59%	1,32	1,20	7,44
C10	31,51	3,63%	1,38	1,97	7,73

FONTE: Tabela própria

Os resultados gerais de limite de resistência, deformação na tensão máxima, módulo de elasticidade, tempo de impressão e peso, para cada corpo de prova, estão dispostos nas Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43, respectivamente.

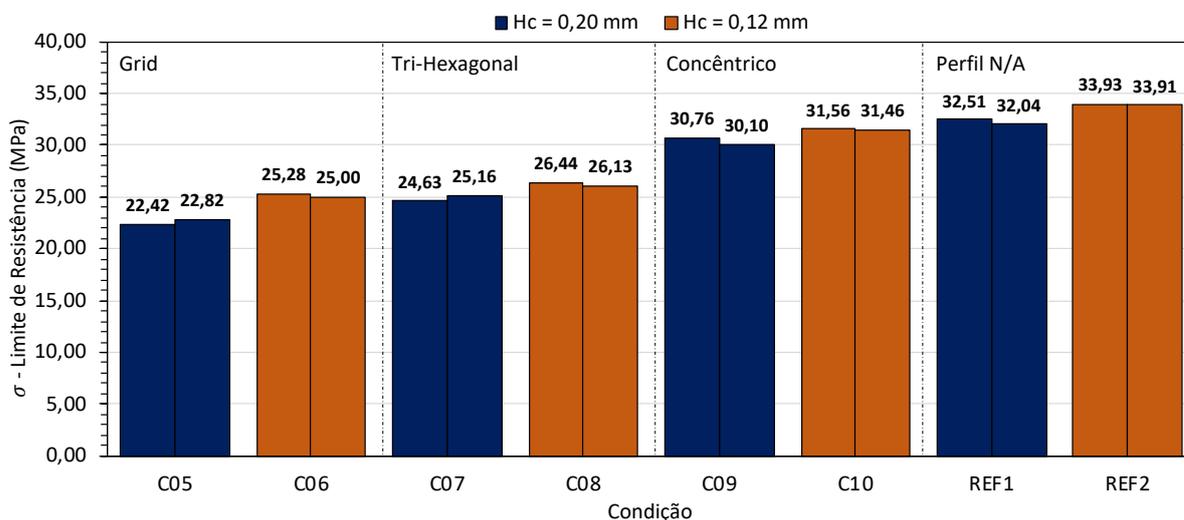


Figura 39 - Limite de resistência para as condições de 5 a 10

FONTE: Imagem própria

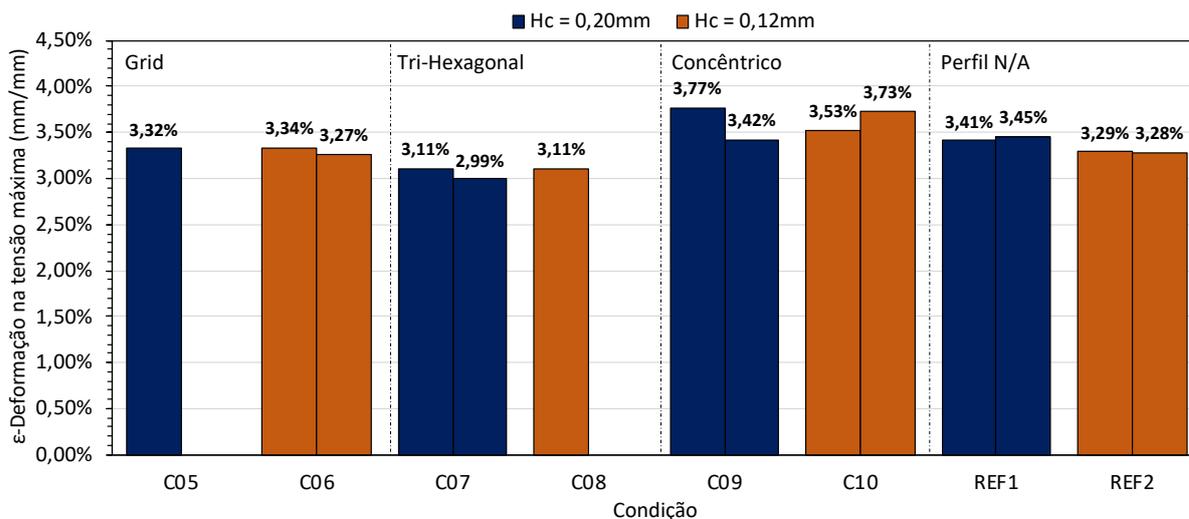


Figura 40 - Deformação na tensão máxima para as condições de 5 a 10
FONTE: Imagem própria

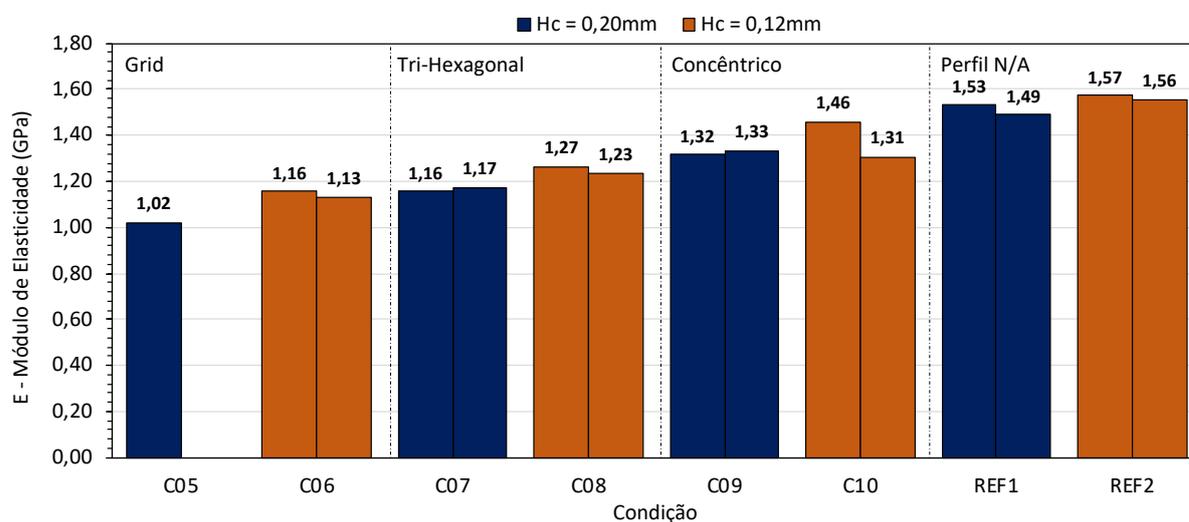


Figura 41 - Módulo de elasticidade para as condições de 5 a 10
FONTE: Imagem Própria

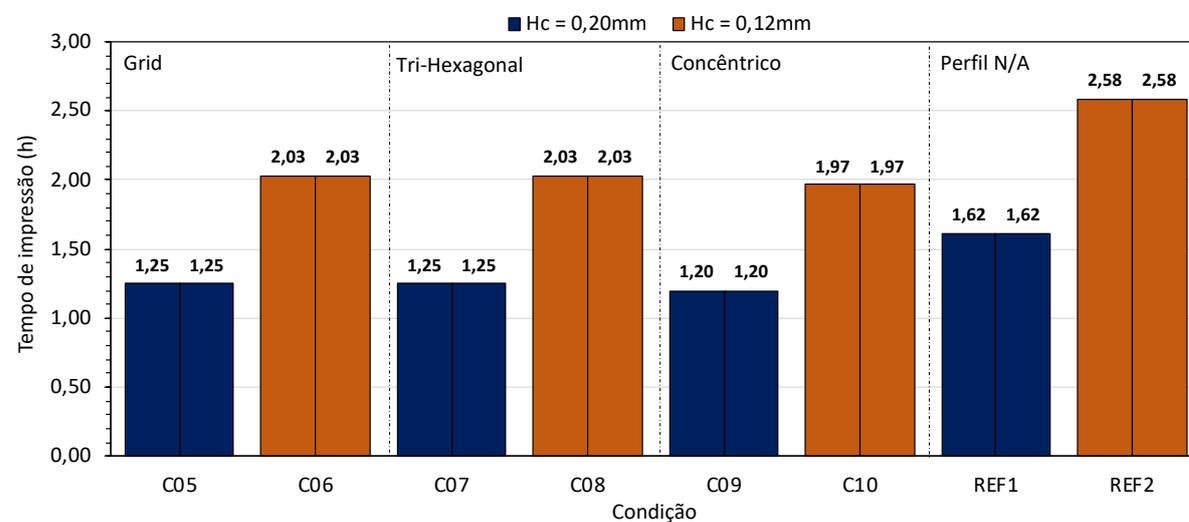


Figura 42 - Tempo de impressão para as condições de 5 a 10
FONTE: Imagem própria

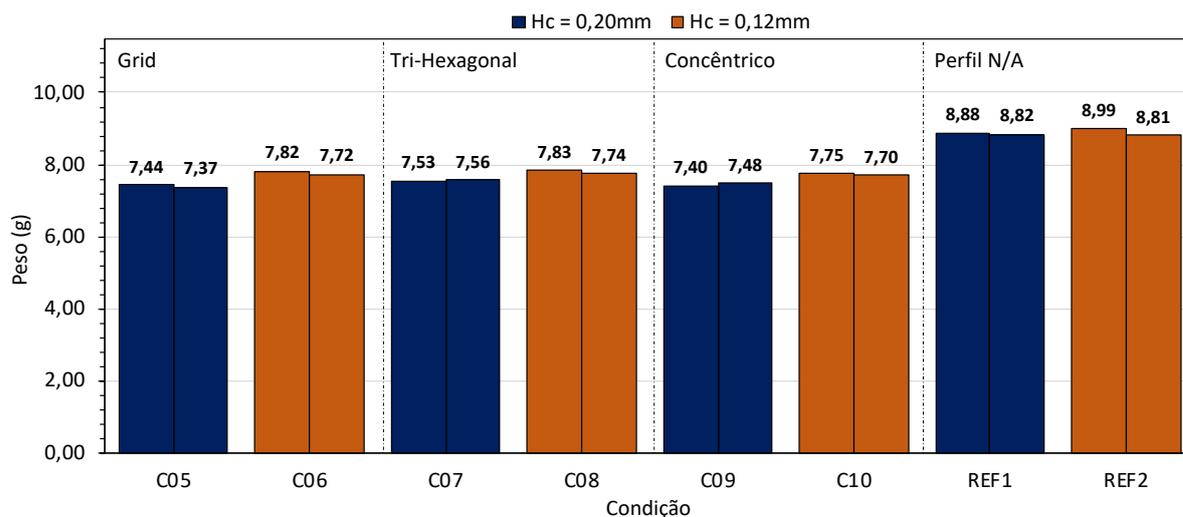


Figura 43 - Peso para as condições de 5 a 10
FONTE: Imagem própria

Como apresentado no item anterior, é proposto neste trabalho um estudo mais detalhado sobre como os parâmetros de fabricação influenciam nos resultados obtidos, conforme é apresentado a seguir.

4.3.1 Propriedades vs. Altura de Camada

A Figura 44 mostra a influência da altura de camada dos três perfis de *infill* estudados no limite de resistência do PETG.

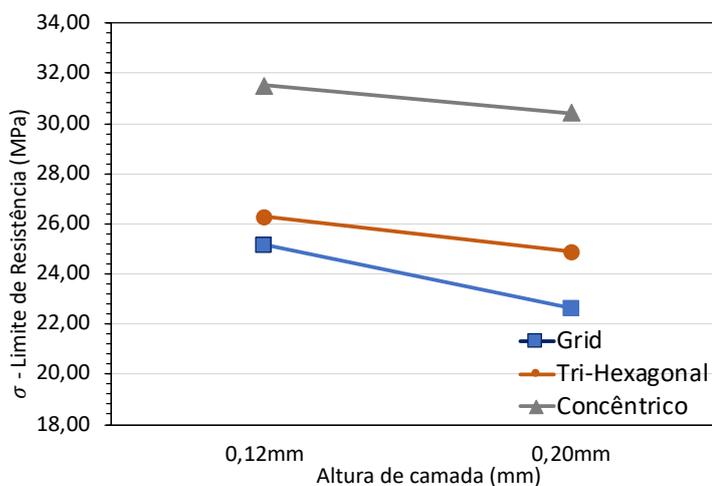


Figura 44 - Limite de resistência vs. altura de camada de acordo com perfil de infill
FONTE: Imagem própria

A tensão limite de resistência do material diminui para todos os percentuais de *infill* quando a altura de camada aumenta. Essa redução é de, aproximadamente, 11% quando utilizado o perfil *grid*, 6% quando utilizado o perfil tri-hexagonal e 4% quando utilizado o perfil concêntrico. Assim, vê-se um percentual de redução semelhante para os perfis de *infill* tri-hexagonal e concêntrico e uma redução mais expressiva para o perfil *grid* quando a altura de camada é aumentada (Figura 44).

A relação entre altura de camada para cada perfil de *infill* e as explicações para a redução do limite de resistência com a elevação da altura de camada são as mesmas apresentadas anteriormente para o percentual de *infill* (seção 4.2.1). A diferença entre os valores de tensão encontradas para cada perfil será discutida de forma mais detalhada na próxima seção (4.3.2).

A Figura 45 mostra a influência da altura de camada dos três perfis de *infill* estudados na taxa de deformação na tensão máxima do PETG.

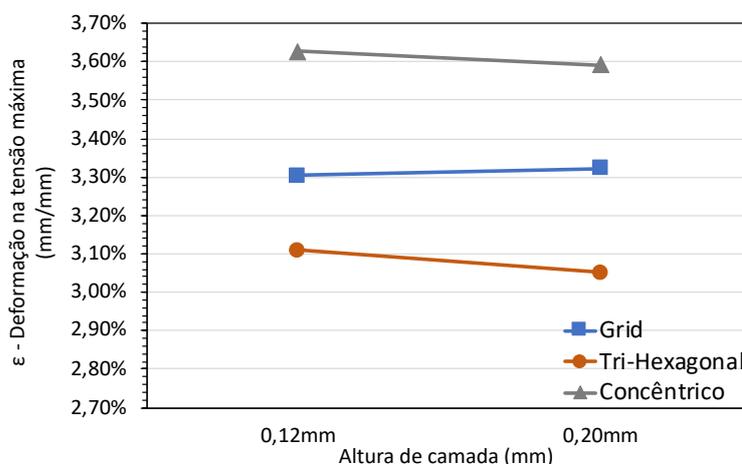


Figura 45 - Deformação na tensão máxima vs. espessura de camada de acordo com perfil de *infill*

FONTE: Imagem própria

A deformação na tensão máxima não apresentou uma tendência igual com o aumento da altura de camada para os diferentes perfis de *infill* estudados. A deformação não teve alteração significativa (inferior a 2%) para nenhum dos perfis de *infill* utilizados (Figura 45). Dessa forma, os resultados obtidos mostram tendência de manutenção da deformação na tensão limite de resistência para os perfis de *infill* quando há variação da espessura de camada, dentro das faixas aplicadas no presente trabalho.

Para que um comportamento mais coerente seja detectado em relação ao aumento da altura de camada e a deformação para diferentes perfis de *infill*, é necessário realizar um estudo mais aprofundado e com um maior número de amostras, igualmente ao que foi proposto para os percentuais de *infill*.

A Figura 46 mostra a influência da altura de camada dos três perfis de *infill* estudados no módulo de elasticidade do PETG.

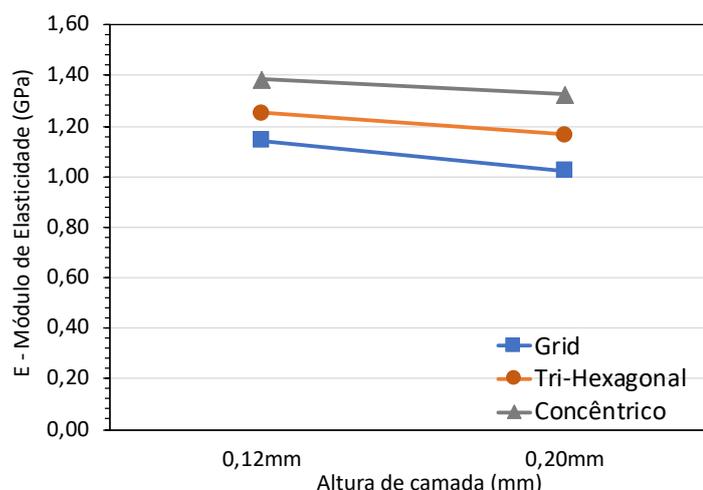


Figura 46 - Módulo de elasticidade vs. espessura de camada de acordo com perfil de *infill*
FONTE: Imagem própria

O módulo de elasticidade do material diminui para todos os perfis de *infill* quando a altura de camada aumenta. Essa redução é de, aproximadamente, 12% quando utilizado perfil *grid*, 7% quando utilizado perfil tri-hexagonal e 4% quando utilizado perfil concêntrico, mostrando assim um percentual de redução diferente dependendo do perfil de *infill* utilizado (Figura 46). Porém a tendência é de redução do módulo de elasticidade com o aumento da altura de camada.

A relação entre altura de camada para cada perfil de *infill* e as explicações para a redução do módulo de elasticidade com a elevação da altura de camada são as mesmas apresentadas anteriormente para o percentual de *infill* (seção 4.2.1).

A Figura 47 mostra a influência da altura de camada dos três perfis de *infill* estudados no tempo de impressão do PETG.

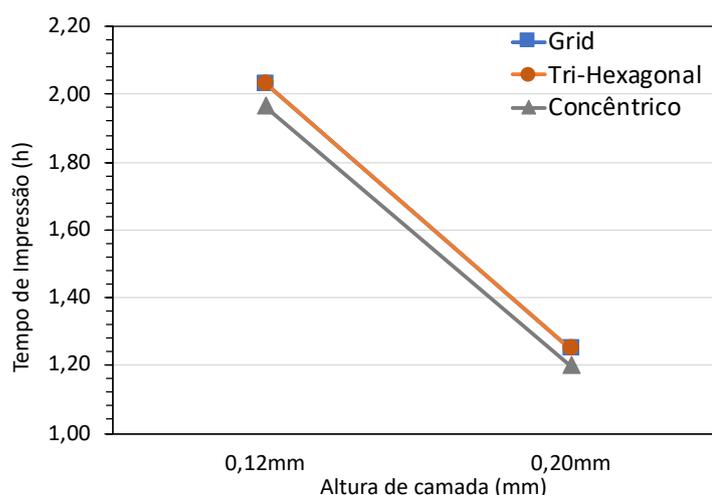


Figura 47 - Tempo de impressão vs. espessura de camada de acordo com perfil de infill
FONTE: Imagem própria

O tempo de impressão do material diminui para todos os percentuais de *infill* quando a altura de camada aumenta. Essa redução é de, aproximadamente, 63% em todos os perfis de *infill* estudados (Figura 47). Essa redução tem impacto sobre a produtividade e deve ser levada em consideração ao escolher a altura de camada utilizada, uma vez que a redução de tempo é percentualmente superior a todas as reduções de propriedades mecânicas do PETG. O comportamento do tempo de impressão foi muito semelhante ao observado quando se variou o percentual de infill (Figura 32). Além disso, é importante ressaltar que o tempo de impressão para o perfil *grid* é o mesmo que o do perfil tri-hexagonal, ou seja, o tempo de fabricação está mais relacionado a velocidade de deposição nesses casos.

4.3.2 Produtividade vs. Perfil de Infill

A Figura 48 mostra a influência do perfil de *infill* no limite de resistência e tempo de impressão.

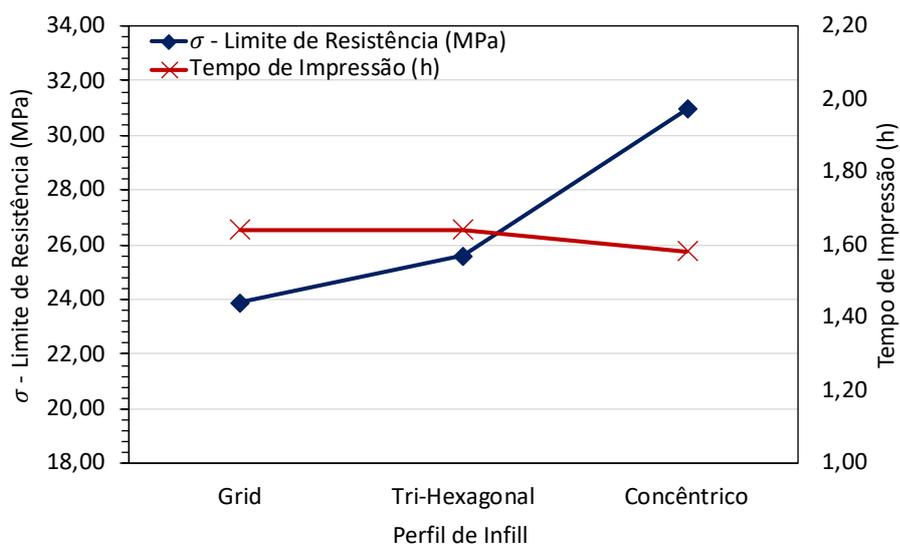


Figura 48 - Limite de resistência e tempo de impressão por perfil de infill
FONTE: Imagem própria

Com base na Figura 48 é notório que o perfil concêntrico possui o maior limite de resistência à tração e, em contrapartida do ocorrido para o aumento do percentual de *infill* (Figura 33), tem um ganho de produtividade, uma vez que o tempo para fabricação é menor. O ganho de resistência é de 29,6% quando comparado ao perfil grid e de 21,0% quando comparado ao perfil tri-hexagonal para uma redução de 3,6% no tempo de fabricação para ambos os perfis.

A Figura 49 mostra os ângulos de deposição dos cordões do *infill* para cada perfil estudado no presente trabalho.

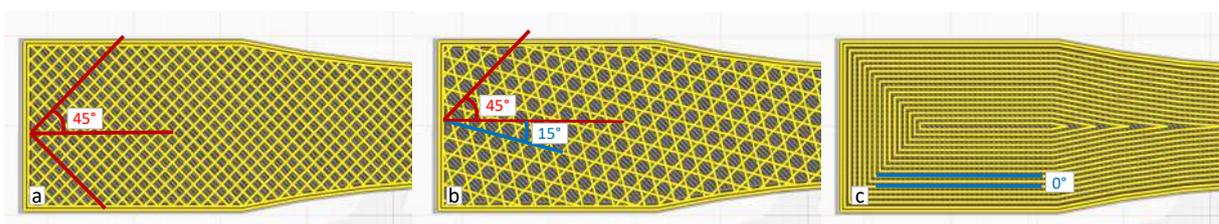


Figura 49 - Ângulos de deposição dos cordões por perfil de infill estudado; grid (a), tri-hexagonal (b) e concêntrico (c)
FONTE: Imagem própria

É possível observar que o perfil *grid* apresenta o maior ângulo (45°) em relação a direção de aplicação da força de ensaio. Já o perfil tri-hexagonal apresenta cordões com ângulo de 45° e 15°, tendo uma angulação intermediária, quando comparado com o perfil *grid* e concêntrico. E o perfil concêntrico possui, o maior

comprimento dos cordões depositados com um ângulo de 0° em relação a direção de aplicação da força.

Com essas informações, era esperado que o perfil concêntrico tivesse o maior limite de resistência, seguido do perfil tri-hexagonal e, por fim, do perfil *grid*. Isso ocorre porque quanto menor a angulação dos cordões em relação a direção de aplicação da carga, maior será a resistência da peça. Martins (2017a), Cabreira e Santana (2020) e Santana *et al.* (2018) chegaram a essa conclusão em seus estudos e utilizaram a teoria de alinhamento entre os cordões e a direção da força para explicar seus resultados.

Porém, vale lembrar que caso a força fosse aplicada em direção diferente da que foi aplicada no estudo, para os mesmos corpos de prova, a tendência seria uma variação do limite de resistência maior do perfil concêntrico, uma vez que a peça estaria sujeita ao maior descolamento das camadas. Ao contrário do que ocorre no perfil concêntrico, tanto no perfil *grid* quanto no perfil tri-hexagonal, por conta da direção em que as camadas são depositadas, não se espera uma queda brusca de tensão caso a força não seja aplicada na mesma direção que nos ensaios realizados.

É possível observar também, na Figura 48, que o perfil tri-hexagonal tem um ganho de resistência de 7,2% quando comparado ao perfil *grid* para um mesmo tempo de fabricação. Dessa forma, para aplicações de carga de tração, o perfil tri-hexagonal é mais vantajoso nos quesitos resistência e produtividade do que o perfil *grid*. Além disso, para a carga de estudo, o perfil concêntrico tem a maior resistência, com a melhor produtividade.

A Figura 50 mostra a influência do perfil de *infill* na deformação na tensão máxima e no tempo de impressão, onde é possível notar que o perfil concêntrico possui a maior deformação na tensão máxima. Isso ocorre porque, como a orientação das camadas longas de *infill* é paralela a direção de aplicação da força, a tendência é que as camadas “estiquem” (deformem) até que sejam “arrebentadas” (SANTANA *et al.*, 2018).

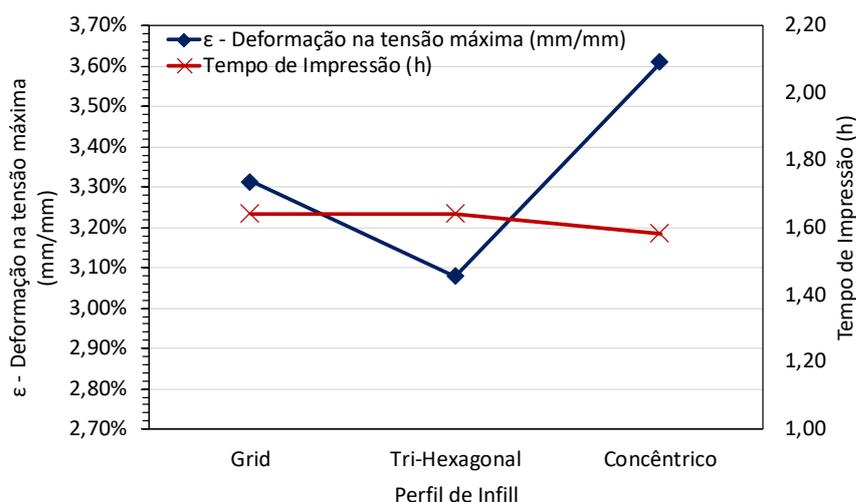


Figura 50 – Deformação na tensão máxima e tempo de impressão por perfil de infill
FONTE: Imagem própria

A deformação no perfil concêntrico é 17,2% maior que a deformação no perfil tri-hexagonal e 8,93% maior que a deformação no perfil grid, para uma redução de 3,6% do tempo de fabricação em comparação aos dois.

Já a deformação na tensão máxima do perfil tri-hexagonal é 7,0% inferior à deformação no perfil grid, para o mesmo tempo de fabricação da peça. Esse resultado é contrário à teoria apresentada por Santana *et al.* (2018), uma vez que para os autores se esperava que um maior alinhamento entre os cordões e a direção de aplicação da força fosse aumentar a capacidade do material se deformar. Uma explicação plausível é que os pequenos espaços triangulares entre os hexagonais favoreçam a propagação de trincas, uma vez que uma maior quantidade de vazios facilitaria a propagação da trinca (Figura 35) (CALLISTER; RETHWISCH, 2010; SANTANA *et al.*, 2018).

Com os resultados obtidos, o perfil concêntrico possui uma maior deformação na tensão máxima com o melhor valor de produtividade, enquanto, para o mesmo tempo de fabricação (maior que o do perfil concêntrico), o perfil *grid* apresenta deformação maior do que o tri-hexagonal.

A influência do perfil de *infill* no módulo de elasticidade e tempo de impressão é apresentada na Figura 51.

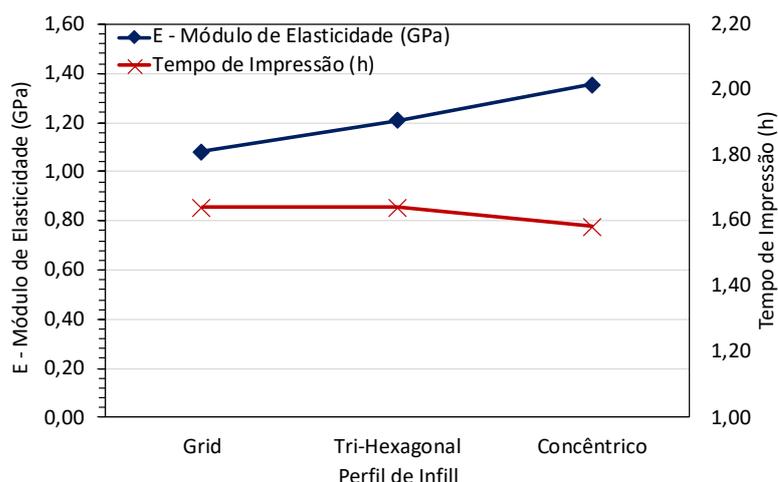


Figura 51 - Módulo de elasticidade e tempo de impressão por perfil de infill
FONTE: Imagem própria

O módulo de elasticidade tem perfil praticamente linear quando organizado, conforme a Figura 51, com um aumento de 11,6% quando comparado o perfil tri-hexagonal com o perfil *grid* (com um mesmo tempo de fabricação) e um aumento de 12,1% do perfil tri-hexagonal para o concêntrico (com redução de 3,6% no tempo de fabricação).

Esse comportamento também pode ser explicado pela orientação dos cordões na direção de aplicação da carga. O resultado se mostra consistente com os encontrados por Santana *et al.* (2018) e por Cabreira & Santana (2020). Porém, Martins (2017a) não encontrou variação significativa no módulo de elasticidade quando variou a direção dos cordões de $-45^{\circ}/45^{\circ}$ para $0^{\circ}/90^{\circ}$.

Dessa forma, de acordo com os resultados encontrados no presente estudo, para a carga aplicada, o perfil concêntrico possui o maior módulo de elasticidade, para um menor tempo de fabricação, seguido do perfil tri-hexagonal e, por fim, do perfil *grid*, sendo que os últimos dois possuem o mesmo tempo de fabricação.

O ganho em utilização de material, por meio de uma análise de custo, não foi abordado no presente trabalho, mas é de grande importância na hora de definir os parâmetros de projeto. Com os resultados obtidos foi possível verificar que há variação do peso e, portanto, do custo das peças quando se alteram os parâmetros estudados.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho, que teve como objetivo a análise das propriedades mecânicas do material PETG fabricado utilizando o processo FDM da Manufatura Aditiva, além de dados como tempo de produção e peso de material para a fabricação, permite obter as seguintes conclusões:

1. Os resultados de propriedades mecânicas, em sua maioria, são consistentes com os apresentados na literatura para outros materiais poliméricos, de acordo com a variação da altura de camada, do percentual de *infill* e do perfil de *infill*.
2. Os parâmetros estudados foram relevantes para as propriedades mecânicas do material e para a sua produtividade, sendo a espessura de camada um dos principais parâmetros de fabricação.
3. A redução da altura de camada de 0,20mm para 0,12mm é um importante meio para o aumento da resistência mecânica das peças e para o aumento da rigidez, porém com um impacto negativo na produtividade.
4. O aumento do percentual de *infill* entre os valores de 30%, 50% e 70% se mostrou uma possível forma de elevar a resistência e a rigidez das peças, também em detrimento do tempo de fabricação.
5. A variação entre os perfis de *infill* se mostrou a forma mais eficaz de melhorar as propriedades do material sob cargas de tração, uma vez que a utilização do perfil concêntrico possibilitou o aumento da resistência mecânica, do módulo de elasticidade e da deformação na tensão máxima da peça, tudo isso ligado a um menor tempo de fabricação e, assim, a uma melhor produtividade.
6. Para cargas que possivelmente alterem sua direção de aplicação, o perfil tri-hexagonal se mostrou superior ao perfil *grid* em relação as propriedades mecânicas, sem um acréscimo em tempo de fabricação.
7. Quando analisada a deformação na tensão máxima das peças, pode-se concluir que é necessária a realização de mais estudos, com uma maior quantidade de corpos de prova para que um padrão mais bem definido seja estabelecido em relação a esta propriedade.

Com os resultados obtidos neste trabalho, os usuários da tecnologia de impressão 3D podem ter maior conhecimento sobre as propriedades do material PETG na manufatura aditiva, como também definir os melhores parâmetros relacionados ao *infill* e à altura de camada para a confecção de peças funcionais,

auxiliando também o processo de seleção do melhor material e ainda ter uma base maior para o desenvolvimento de novos estudos em relação ao material dentro da manufatura aditiva.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realização de estudos com um maior número de amostragem.
2. Análise da relação de viabilidade técnico-econômica, por meio do estudo de tempo de produção x peso de material utilizado x propriedades mecânicas obtidas.
3. Utilização de métodos estatísticos para uma caracterização quantitativa mais confiável do material estudado.
4. Análise de fratura dos corpos de prova utilizando MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura).

REFERÊNCIAS

AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S. *et al.* Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid Prototyping Journal**, 8, n. 4, p. 248-257, 2002.

ASTM. D638 – 14 – Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International 2014.

CABREIRA, V.; SANTANA, R. M. C. Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 25, 2020.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010. v. 8 Ed).

GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K. *et al.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, 69, p. 65-89, 2015/12/01/ 2015.

GOZZO, L. F. **Projeto e Construção de uma Impressora 3D Baseada na Tecnologia da Modelagem por Fusão e Deposição**. 2017. 55 f. Monografia de conclusão de curso - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

MARTINS, T. **Influência dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D com um único material**. 2017a. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa.

MARTINS, V. H. C. **Impressão 3D: uma abordagem de produção mais limpa?** 2017b. 88 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Industrial - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/46577>.

RELVAS, C. **O mundo da impressão 3d e do fabrico digital**. Porto: Engebook - Conteúdos de Engenharia e Gestão, 2017. E-book: 978-989-723-268-8.

RELVAS, C. A. M. **Processos de prototipagem rápida no fabrico de modelos de geometria complexa: estudo realizado sobre o modelo anatómico da mão**. 2002. Dissertação de mestrado em Design Industrial - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. d. C.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 23, 2018.

SOOD, A. K.; CHATURVEDI, V.; DATTA, S.; MAHAPATRA, S. S. OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS IN FUSED DEPOSITION MODELING USING WEIGHTED PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, 10, n. 02, p. 241-259, 2011.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials & Design**, 31, n. 1, p. 287-295, 2010/01/01/ 2010.

SRINIVASAN, R.; RUBAN, W.; DEEPANRAJ, A.; BHUVANESH, R. *et al.* Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. **Materials Today: Proceedings**, 27, p. 1838-1842, 2020/01/01/ 2020.

THOMPSON, M. K.; MORONI, G.; VANEKER, T.; FADEL, G. *et al.* Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **CIRP Annals**, 65, n. 2, p. 737-760, 2016/01/01/ 2016.