

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

MILENA FONTOURA DA SILVA

**RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO COM PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PEÇAS POLIMÉRICAS OBTIDAS POR IMPRESSÃO 3D PELA TÉCNICA FDM**

Porto Alegre
2022

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO COM
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS POLIMÉRICAS OBTIDAS
POR IMPRESSÃO 3D PELA TÉCNICA FDM**

MILENA FONTOURA DA SILVA

ENGENHEIRA DE PRODUÇÃO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Setembro, 2022



**RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO COM
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS POLIMÉRICAS OBTIDAS
POR IMPRESSÃO 3D PELA TÉCNICA FDM**

MILENA FONTOURA DA SILVA
ENGENHEIRA DE PRODUÇÃO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge André Ribas Moraes

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Porto Alegre
Setembro, 2022

Ficha Catalográfica

S586r Silva, Milena Fontoura

Relação dos parâmetros de impressão com propriedades mecânicas de peças poliméricas obtidas por impressão 3D pela técnica FDM / Milena Fontoura Silva. – 2022.

81 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Ribas de Moraes.

1. Impressão 3D. 2. FDM. 3. PLA. 4. ABS. 5. Propriedades mecânicas. I. Santos, Carlos Alexandre dos. II. Moraes, Jorge Ribas de. III. . IV. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
 ESCOLA POLITÉCNICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE
 MATERIAIS

RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO COM PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS POLIMÉRICAS OBTIDAS POR IMPRESSÃO 3D PELA TÉCNICA FDM

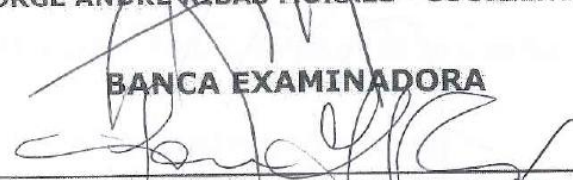
CANDIDATA: MILENA FONTOURA DA SILVA

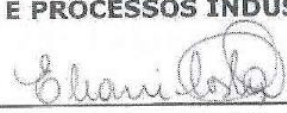
Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.


 DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR


 DR. JORGE ANDRÉ RIBAS MORAES - COORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA


 DRA. LIANE MAHLMANN KIPPER - PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM
 SISTEMAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS - UNISC


 DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
 Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900
 Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625 E-mail:
 engenharia.pg.materiais@pucrs.br
 www.pucrs.br/politecnica

“Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita fadiga e resistência.”

(Henry Ford)

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus familiares, principalmente minha mãe e irmã, que se fizeram presentes em todas as etapas envolvendo a conclusão do mestrado.

A Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) pela oportunidade de estudo e por toda infraestrutura disponível.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de estudos a que sou beneficiária.

Ao professor Carlos Alexandre, por me auxiliar e orientar nesta trajetória, respondendo sempre meus e-mails (mesmo tarde da noite ou aos finais de semana).

Ao professor Jorge André, que prontamente aceitou ao meu convite de coorientador, agregando muito a este trabalho.

A professora Ruth Cardoso e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, por me permitir utilizar o laboratório de polímeros.

Aos meus amigos e colegas de trabalho que foram muito compreensíveis, principalmente nesta reta final.

Ao Henrique, Gustavo e Alessandra, técnicos dos laboratórios da PUCRS, que fizeram meus ensaios à distância e sempre responderam meus questionamentos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS	13
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Impressão 3D.....	20
3.2. Funcionamento Básico de uma Impressora 3D	21
3.2.1. Criação de um Modelo CAD	22
3.2.2. Conversão para o Formato STL.....	22
3.2.3. Fatiamento do Arquivo em Camadas Finas de Seção Transversal	23
3.2.4. Construção do Modelo de Camadas	23
3.2.5. Limpeza e Acabamento	24
3.3. Principais Técnicas de Impressão 3D	24
3.3.1. Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	24
3.3.2. Estereolitografia (SLA)	25
3.3.3. Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	26
3.3.4. Manufatura de Objetos Laminados (LOM)	27
3.3.5. Binder Jetting.....	28
3.3.6. Deposição de Energia Direcionada (DED)	29
3.3.7. Material Jetting (MJ)	30
3.4. Parâmetros de Impressão.....	31
3.4.1. Porcentagem de Preenchimento	31
3.4.2. Velocidade de Impressão.....	31
3.4.3. Orientação de Impressão	32
3.4.4. Orientação dos Filamentos	32

3.4.5. Espessura da Camada.....	32
3.5. Polímeros Empregados em Impressão 3D	32
3.5.1. Termoplásticos	33
3.5.1.1. PLA.....	34
3.5.1.2. ABS	35
3.6. Propriedades Mecânicas dos Polímeros	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. Parâmetros de Impressão.....	43
4.1.1. Simplify 3D.....	44
4.2. Impressora por FDM	45
4.3. Ensaio de Tração	46
4.4. Ensaio de Dureza	47
4.5. Ensaio de Impacto	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1. Ensaio de Tração	51
5.2. Ensaio de Dureza Shore D.....	59
5.3. Ensaio de Impacto	61
5.4. Discussões	64
6. CONCLUSÕES.....	70
7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Comparação entre um modelo CAD e um modelo STL (Lino, 2014).	23
Figura 3.2 Esquema da técnica FDM (THRE3D, 2014).	25
Figura 3.3 Esquema da técnica SLA (THRE3D, 2014).	26
Figura 3.4 Esquema da técnica SLS (THRE3D, 2014).	27
Figura 3.5 Esquema da técnica LOM (THRE3D, 2014).	28
Figura 3.6. Esquema da técnica Bider Jetting (THRE3D, 2014).	29
Figura 3.7 Esquema da técnica Directed Energy Deposition (Loughborough, 2016).	30
Figura 3.8 Esquema da técnica Material Jetting (Liou, 2007).	31
Figura 3.9 Valor bruto da produção por seguimento (ABRE, 2019).	33
Figura 3.10 Perfil do PLA (Alkaios, 2017).	34
Figura 3.11 Perfil do ABS (Alkaios, 2017).	35
Figura 3.12 Resultados para o ABS de tensão x deformação (Lovo <i>et al.</i> 2017).	36
Figura 3.13 Resultados do ensaio de dureza com a variação na espessura de camada (Martins <i>et al.</i> , 2016).	38
Figura 3.14 Médias dos resultados da dureza com a variação da temperatura de mesa (Carneiro <i>et al.</i> , 2019).	39
Figura 3.15 Gráfico dos valores de energia absorvida (Cabreira; Santana, 2017).	40
Figura 4.1 Fluxograma descrevendo as etapas metodológicas.	43
Figura 4.2 Tela do Software Simplify 3D (SIMPLIFY3D, 2021).	44
Figura 4.3 Impressora MakerBot Replicator 2X – vista frontal.	45
Figura 4.4 Impressora MakerBot Replicator 2X – vista parte interna.	45

Figura 4.5 Dimensões padronizadas dos corpos de prova para ensaios de tração - tipo I, II e IV (ASTM D 638).	46
Figura 4.6 Esquema do durômetro de ensaio de Dureza Shore D (ASTM D 2240). .	48
Figura 4.7 Ensaio de impacto tipo: (a) Charpy e (b) Izod (ASTM D 256).	49
Figura 4.8 Padrão do corpo de prova para ensaios de impacto Izod (ASTM D 256).	49
Figura 5.1 Corpos de prova em ABS para o ensaio de tração.	52
Figura 5.2 Gráfico tensão x deformação - ABS tipo "A".	52
Figura 5.3 Gráfico tensão x deformação - ABS tipo "B".	53
Figura 5.4 Corpos de prova em PLA para o ensaio de tração.	54
Figura 5.5 Gráfico tensão x deformação - PLA tipo "A".	54
Figura 5.6 Gráfico tensão x deformação - PLA tipo "B".	55
Figura 5.7 Curvas tensão x deformação características dos materiais.	56
Figura 5.8 Médias das tensões: (a) tensão de ruptura, (b) limite de resistência à tração para o ABS e PLA.	56
Figura 5.9 Tensão de Escoamento segundo a norma ASTM D 638.	57
Figura 5.10 Deformação dos materiais.	58
Figura 5.11 Corpos de prova para ensaio de Dureza.	59
Figura 5.12 Médias das durezas shore D.	61
Figura 5.13 Corpos de prova para o ensaio de Impacto.	62
Figura 5.14 Gráfico com dados de energia absorvida no impacto.	62
Figura 5.15 Deposição de filamentos em 0°/90° e 45°/-45°.	64
Figura 5.16 Fluxograma com informações sobre o parâmetro orientação de preenchimento.	65
Figura 5.17 Densidades de preenchimento para os parâmetros A e B, respectivamente.	66

- Figura 5.18 Fluxograma com informações do parâmetro de porcentagem de preenchimento. 67
- Figura 5.19 Fluxograma com informações sobre o parâmetro de espessura de camada. 68
- Figura 5.20 Fluxograma com os resultados gerais dos materiais (a) ABS (b) PLA... 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Parâmetros para impressão 3D (Cabreira; Santana, 2017).	39
Tabela 3.2 Parâmetros de impressão (Cabreira; Santana, 2017).	40
Tabela 3.3 Média das energias absorvidas por cada material (Adaptado de Guachambala <i>et al.</i> , 2020).	41
Tabela 4.1 Parâmetros A e B para impressão	43
Tabela 4.2 Dimensões do corpo de prova para ensaios de tração - tipo II (ASTM D 638).	46
Tabela 4.3 Espessuras dos tipos de amostra para ensaios de tração (Adaptado de ASTM D 638).	47
Tabela 4.5 Dimensões dos corpos de prova para ensaios de impacto Izod (ASTM D 256).	50
Tabela 5.1 Comparações da resistência à tração, de escoamento e de ruptura.	58
Tabela 5.2 Medidas de dureza shore D.	60

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i> (Associação Americana de Testes em Materiais)
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Assistido por Computador)
D	Distância Entre as Garras
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Fusão e Deposição)
G	Comprimento do Calibre/Bitola
L	Comprimento da Seção Estreita
LO	Comprimento Total
LOM	Manufatura de Objetos Laminados
MJ	<i>Material Jetting</i>
PC	Polycarbonato
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PLA	Ácido Poliláctico
PPSF	Polifenilsulfona
R	Raio do Filete
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i> (Estereolitografia)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva a Laser)
STL	<i>Standard Tessellation Language</i> (Linguagem Padrão Tessellation)
TPU	Poliuretano Termoplástico
W	Largura da Seção Estreita
WO	Largura Total
3D	Tridimensional

RESUMO

SILVA, MILENA FONTOURA. **Relação dos parâmetros de impressão com propriedades mecânicas de peças poliméricas obtidas por impressão 3D pela técnica FDM.** Porto Alegre. 2022. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A tecnologia de Impressão 3D por FDM (*Fused Deposition Modeling*) é um dos processos de manufatura aditiva mais conhecidos atualmente. Nele, filamentos de termoplástico são extrudados e depositados em camadas sucessivas para que se construa o objeto final. Uma vez que o uso das impressoras 3D se torna crescente, há a necessidade de se conhecer e pesquisar como estes objetos impressos respondem à estímulos externos. Assim, objetiva-se analisar o comportamento mecânico dos polímeros quando os mesmos são impressos utilizando-se diferentes parâmetros de impressão. No presente estudo optou-se pela escolha dos materiais ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Poli Ácido Lático), devido ao seu uso em diversos segmentos da indústria, bem como em trabalhos acadêmicos. Os corpos de prova foram submetidos à ensaios de resistência à tração, dureza Shore e tenacidade ao impacto. A metodologia foi dividida em duas partes: a primeira constituiu na impressão de corpos de prova utilizando a tecnologia FDM variando parâmetros como: porcentagem de preenchimento, velocidade de impressão, orientação e espessura da camada; na etapa posterior foram analisadas as propriedades mecânicas de cada material de acordo com as normas ASTM D 638 (tração), D 2240 (dureza) e D 256 (tenacidade ao impacto). Os resultados mostraram que a combinação do material PLA e os parâmetros “B” (30% de porcentagem de preenchimento, 0,3 mm de espessura de camada, orientação de preenchimento de 45° -45°, e velocidade de impressão de 40 mm/s.), resistiram às maiores tensões no ensaio de tração e obteve as maiores durezas na escala Shore D. Em contrapartida, quem sem destacou no ensaio de impacto foi o ABS impresso com os parâmetros “B”.

Palavras-Chaves: Impressão 3D, FDM, PLA, ABS, Propriedades Mecânicas, Parâmetros de Impressão.

ABSTRACT

SILVA, MILENA FONTOURA. **Relation of printing parameters with mechanical properties of polymers obtained by 3D printing using the FDM technique.** Porto Alegre. 2022. Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Nowadays, the 3D printing technology by FDM (Fused Deposition Modeling) is one of the best-known additive manufacturing processes. In this case, thermoplastic filaments are extruded and deposited in successive layers to build the final object. Since the use of 3D printers becomes increasing, there is a need to know and research how these printed objects respond to external stimuli. Therefore, the objective is to analyze the mechanical behavior of polymers when they are printed using different printing parameters. In the present study, it was choosing the ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PLA (Poly Lactic Acid) materials, due to their use in several segments of the industry, as well as in academic works. The specimens were submitted to tensile strength, Shore hardness and impact toughness tests. The methodology was divided in two parts: the first consisted of printing specimens using FDM technology and varying parameters such as: percentage of filling, printing speed, orientation and layer thickness; in the subsequent step, the mechanical properties of each material were analyzed according to ASTM D 638 (traction), D 2240 (hardness) and D 256 (impact toughness). The results of these tests are that the combination of material PLA and parameters "B" (30% of infill density, 0,3 mm of layer thickness, infill speed of 40 mm/s and raster angle of 45° -45°), showed the highest tensile strength and hardness on the Shore D scale. In contrast, the ABS material printed with parameters "B" presented the best behavior in the impact test.

Keywords: 3D Printing; PLA; ABS; Mechanical properties; Printing Parameters.

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D deixou de ser uma ideia utópica para tornar-se algo palpável e acessível. Uma vez que surgiram os primeiros protótipos, o mundo voltou sua atenção às incontáveis possibilidades de aplicação desta técnica, seja em objetos pequenos e decorativos, peças de substituição ou até mesmo produtos voltados a área da saúde, como as próteses (Subramaniam *et al.*, 2019; Lino, 2014). Esta tecnologia oferece vantagens importantes para a indústria, pois diminui os custos e os riscos de fabricação, e ainda apresenta a possibilidade de um menor desperdício de material durante o processamento, que é uma preocupação comum do mundo atual. Aos consumidores há a possibilidade de fabricação de itens personalizados, já que os mesmos não se contentam mais com objetos idênticos, produzidos em massa.

Para Lipson e Kurman (2013), este processo de manufatura apresenta muitas vantagens sobre a manufatura convencional, pois ainda que os projetos impressos em 3D sejam complexos, isso não os torna mais onerosos, pelo contrário, é muito barato personalizar os objetos e imprimir formas que seriam impossíveis usando a manufatura tradicional.

Neste contexto, esta invenção evoluiu bastante com o passar dos anos, desde então, diversas tecnologias de impressão 3D foram criadas e melhoradas, sendo a mais acessível (e por esse motivo também a mais utilizada) a *Fused Deposition Modeling* (FDM) para o português Modelagem por Fusão e Deposição. O grande número de empresas a desenvolver e comercializar impressoras com esta tecnologia fez com que o custo de fabricação das mesmas pudesse ser reduzido. Esta tecnologia é também silenciosa e não produz muitos ruídos, adaptando-se facilmente a ambientes de escritório (Toffoli, 2018; Vyavahare *et al.*, 2020).

As impressoras 3D com a técnica de FDM criam o objeto a partir da extrusão e deposição de material fundido de filamentos. O bico de extrusão, ou extrusor, movimenta-se nos eixos x e y, enquanto que a plataforma (onde o material é depositado), movimenta-se no eixo z. A extrusora recebe o material na forma de um fio e o aquece até que se tenha um material fundido. Quando este material extrudado entra em contato com o material da superfície da peça, ele se solidifica e se adere a

camada anteriormente depositada. Neste momento a plataforma se desloca para baixo, no eixo z e o processo se repete até o objeto estar formado (Macedo, 2011).

Para o FDM existem diversos materiais disponíveis, tais como: ABS, Nylon, Policarbonato, PLA entre outros. A fim de verificar o comportamento de cada material a uma determinada situação, é preciso compará-los a partir de parâmetros pré-estabelecidos (Monteiro *et al.*, 2012).

Segundo Carneiro *et al.* (2019) estes parâmetros atuam diretamente no resultado final da peça, no que tange ao dimensionamento e propriedades mecânicas. Para Bolelli e Leão (2019) deve-se considerar os diferentes parâmetros de impressão a ser determinados, já que eles são os responsáveis pelas características do protótipo em sua fase final. Dados como a geometria interna do modelo, densidade do preenchimento, orientação no processo de deposição dos filamentos e velocidade de produção, são exemplos de parâmetros que podem ser alterados.

Dado o notório espaço que estas impressoras vêm ganhando no mercado, percebe-se a importância de entender mais sobre o comportamento mecânico das peças impressas, aliado a otimização dos parâmetros de impressão a serem utilizados. O presente estudo portanto optou pela escolha da técnica FDM e os materiais ABS e PLA para submeter os mesmos a ensaios mecânicos, utilizando parâmetros de impressão distintos, a fim de analisar e comparar o resultado final das peças.

Tendo em vista que há uma lacuna de estudos que abordem mais de um material e a variação de mais de um parâmetro, a presente pesquisa pretende abordar esta problemática. Envolvendo nos resultados além da comparação entre os materiais, a comparação dos parâmetros. Ou seja, mais variáveis a serem analisadas.

Assim, o presente trabalho está estruturado da seguinte forma: No Capítulo 1 é apresentado uma breve introdução sobre o tema, no Capítulo 2 são destacados os objetivos geral e específico, enquanto no Capítulo 3 são apresentadas as principais informações sobre os tópicos abordados, bem como o estado da arte. A parte experimental, com os materiais e métodos utilizados, é apresentada no Capítulo 4,

sendo os resultados e as discussões mostradas no Capítulo 5. O Capítulo 6 dedica-se as conclusões, seguido pelas propostas de trabalhos futuros e referências bibliográficas.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é analisar o comportamento mecânico de peças poliméricas impressas em impressora 3D FDM (Modelagem por Fusão e Deposição), relacionando parâmetros de impressão com algumas propriedades mecânicas resultantes (resistência a tração, dureza e resistência ao impacto).

2.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma pesquisa na literatura para identificar o que há de pesquisa nesta área, e quais as lacunas que podem ser exploradas;
- Imprimir peças em configurações geométricas específicas com os materiais ABS e PLA, empregando a técnica de impressão 3D de FDM (filamento) e aplicando diferentes parâmetros de impressão;
- Determinar as propriedades mecânicas das peças impressas por meio de ensaios de tração, dureza e tenacidade ao impacto;
- Relacionar as propriedades obtidas com os parâmetros de impressão 3D.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Impressão 3D

Rajan *et al.* (2022) destacam que a necessidade de maior versatilidade e a evolução da customização de produtos direcionaram o avanço tecnológico de manufaturas aditivas. A impressão 3D é uma tecnologia de fabricação aditiva, e recebeu o nome de prototipagem rápida pelo comitê técnico responsável pela norma ASTM F42. Originalmente, a manufatura aditiva era utilizada apenas como validação e/ou visualização de conceitos e projetos, mas o avanço da técnica de impressão 3D possibilitou o desenvolvimento de ferramentas e componentes (Medellin; Zaragoza, 2019).

A Forbes, em 2017, publicou dados relevantes, dos quais: 57% dos fabricantes globais investiram em áreas de pesquisa e desenvolvimento voltados a impressão 3D, 95% dos entrevistados alegaram que esta tecnologia é uma grande vantagem tecnológica frente aos concorrentes. A revista em questão ainda revelou que 47% do mercado de impressão 3D foi mais bem sucedido que os anos anteriores (Bai *et al.*, 2020). Nos próximos 5 anos (a partir do ano da publicação), analistas preveem que o crescimento da indústria de impressão 3D será de 24% ou 35 bilhões de dólares. Para Rajan *et al.* (2022) só no ano de 2020 houve um crescimento de 7,5%.

Os processos usuais para fabricação de protótipos envolvem geralmente muitas horas-máquina, etapas longas e custos elevados. A técnica de impressão 3D, que é uma das diversas técnicas de impressão do mercado, surge como um processo inovador de prototipagem rápida que promete a fabricação de protótipos em um único passo e com tempo reduzido. O termo prototipagem rápida se refere a uma série de tecnologias capazes de construir modelos físicos obtidos através de softwares computacionais CAD, traduzido do inglês, *Computer Aided Design* (Garcia, 2010). Para Heinzl e Hertz (1985), o modo de impressão tridimensional veio para revolucionar a prototipagem e a manufatura, uma vez que a impressora 3D é capaz de fabricar além de protótipos, ferramentas de máquinas e peças.

A idealização da tecnologia de impressão 3D ocorreu na década de 80, na Califórnia, pelo engenheiro Charles Hull. Mais tarde, apenas nos anos 2000, as máquinas começaram a ser comercializadas por um valor inferior a mil dólares, o que possibilitou a popularidade e acessibilidade deste tipo de tecnologia (Ventola, 2014; Kuhn; Minuzzi, 2015). Para Bradshaw *et al.* (2014), uma vez que os conteúdos referentes a impressão 3D foram disponibilizados, tanto na forma de fabricação de impressoras caseiras, como de protótipos prontos para serem impressos, a disseminação e a procura da impressão tridimensional foi ainda maior.

Na técnica de impressão tridimensional, o objeto é formado através da sobreposição de diversas camadas do material em questão, possibilitando a criação de geometrias complexas, que não seriam possíveis de serem criadas de outro modo. Hoje em dia, o termo “impressão 3D” tornou-se bem amplo, uma vez que com o passar dos anos foram aparecendo novas técnicas de deposição de material (Cummins, 2010).

A utilização da impressora 3D apresenta as seguintes vantagens, conforme Modeen (2005): (a) capacidade de produção de formas complexas e detalhadas; (b) redução de *lead time* para peças únicas; (c) desperdícios quase nulos; (d) possibilidade de instalação em diferentes ambientes. O autor destaca também os pontos fracos aliados a esta tecnologia: (a) dependendo do nível de precisão e tamanho do objeto a ser impresso, o tempo pode ser longo; (b) a maioria dos equipamentos fabrica itens com volume limitado; (c) os materiais disponíveis para impressão são poucos; (d) a qualidade final da superfície geralmente necessita de um acabamento secundário (Modeen, 2005).

3.2. Funcionamento Básico de uma Impressora 3D

Para Gorni (2001), o funcionamento básico de uma impressora 3D é dividido em cinco itens: (item 1) Um modelo tridimensional é criado através de um software computacional CAD; (item 2) O modelo é convertido para o formato STL; (item 3) Acontece o fatiamento do arquivo STL (*Standard Tessellation Language*) em camadas finas de seção transversal; (item 4) O modelo físico é construído em camadas; (item 5) Limpeza.

3.2.1. Criação de um Modelo CAD

Para Tut *et al.*, (2010) *Computer Aided Design* (CAD) é uma ferramenta de melhoria do desenho técnico, onde o computador é usado para modelar objetos reais ou virtuais. Devido as facilidades desta ferramenta, ela é amplamente utilizada em projetos mecânicos, arquitetônicos, elétricos, eletrônicos, entre outros.

O objeto a ser criado é modelado através de um software computacional. O responsável pelo projeto pode usar um arquivo CAD já existente ou criar um exclusivo. Este processo de criação de modelo CAD é idêntico para todas as técnicas de impressão 3D (Hotza, 2009).

3.2.2. Conversão para o Formato STL

De acordo com Hotza (2009), uma vez que os diferentes softwares de CAD usam algoritmos distintos para simulação de modelos sólidos, o formato STL foi adotado como padrão. Desta forma, a segunda etapa é converter o arquivo de CAD para STL. O chamado *Standart Tessellation Language* (STL), foi criado pelo grupo *Albert Battaglin Consulting* e é compatível com inúmeros softwares de desenho e amplamente usado para prototipagem rápida. Este formato de arquivo descreve as superfícies segundo os vértices que compõe cada uma de suas faces, sem representar cor, textura ou outro atributo comum a modelos 3D artísticos (Azevedo, 2013; Rapidtoday, 2013).

Segundo Lino (2014), o STL converte a superfície em uma malha de triângulos, a fim de simplificar formas mais complexas como um círculo ou cubo. Desta forma, o objeto torna-se mais simples e reduz, por consequência, o tempo de impressão. Isto está demonstrado na Figura 3.1.

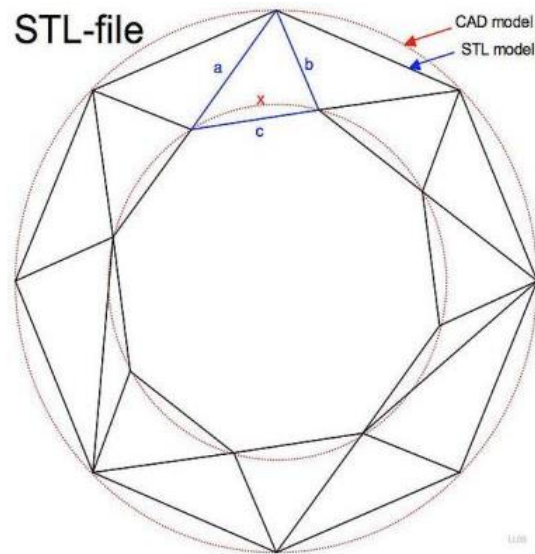


Figura 3.1 Comparação entre um modelo CAD e um modelo STL (Lino, 2014).

3.2.3. Fatiamento do Arquivo em Camadas Finas de Seção Transversal

Após converter o arquivo para o formato STL, o software de pré-processamento fatia o modelo em várias camadas e usa estes dados para determinar a trajetória do extrusor (parte mecânica que aquece e guia o depósito do material) para que seja possível formar cada uma dessas camadas (Azevedo, 2013; Lino, 2014).

Segundo Hotza (2009), há diversos programas de pré-processamento à disposição e a maioria permite ao usuário ajustes quanto ao tamanho, localização e orientação do modelo a ser impresso. Esta orientação de construção é importante por diferentes razões, tais como: (a) as propriedades dos protótipos variam de acordo com a direção da coordenada (na direção z, os protótipos tendem a se tornar mais fracos e menos precisos do que no plano x-y); (b) a orientação da peça irá ditar o tempo exigido para impressão do modelo (colocar a dimensão mais curta na direção z reduz o número de camadas, e por consequência encurta o tempo total).

3.2.4. Construção do Modelo de Camadas

Na quarta etapa acontece a construção do modelo. A partir da técnica escolhida, dentre as diversas existentes, a máquina constrói a camada a partir de um

polímero, papel, pó metálico ou outro material. Em sua maioria, as máquinas necessitam pouca ou nenhuma intervenção de um operador (Hotza, 2009).

3.2.5. Limpeza e Acabamento

A última etapa é o pós-processamento, e envolve primeiramente a retirada do objeto da máquina. Alguns materiais devem ser curados antes de seu uso, e, outros materiais precisam ainda ser limpos e passar por um lixamento e/ou pintura que melhoram a durabilidade e o visual do objeto (Hotza, 2009).

3.3. Principais Técnicas de Impressão 3D

As principais técnicas de impressão 3D são descritas a seguir, sendo elas: Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), Estereolitografia (SLA), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Manufatura de Objetos Laminados (LOM), *Binder Jetting*, *Material Jetting* e *Directed Energy Deposition* (DED).

3.3.1. Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

Em 1988, S. Scott Crump desenvolveu e patenteou esta tecnologia, para mais tarde, em 1989 fundar a empresa Stratasys e iniciar a comercialização da mesma (Fernandes, 2016; Marwah *et al.*, 2017). Na Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling*, FDM), um determinado material termoplástico é depositado em pequenas quantidades por um bico extrusor sobre a plataforma de construção, a fim de formar a primeira camada. Assim que a primeira camada estiver terminada, inicia-se a deposição da segunda camada, e assim sucessivamente, até que a peça esteja completamente formada. A plataforma de construção se mantém a uma temperatura mais baixa, para que o termoplástico endureça de forma rápida (Hotza, 2009; Rajan *et al.*, 2022; Masood, 2004). A Figura 3.2 representa o esquema da técnica FDM.

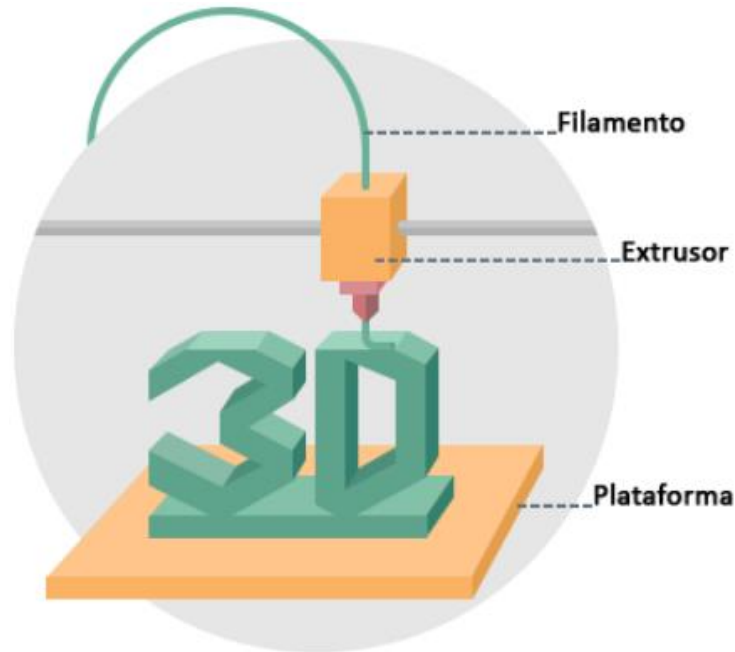


Figura 3.2 Esquema da técnica FDM (THRE3D, 2014).

Na técnica de Impressão 3D de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), há uma gama de materiais que podem ser utilizados, tais como: politereftalato de etileno glicol (PETG), poliuretano termoplástico (TPU), ácido polilático (PLA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC) e polifenilsulfona (PPSF), além de cera e poliéster (Volpato, 2007; Gonzalez 2016). Para Takagaki (2012), esta técnica de impressão oferece materiais mais baratos em relação a outros processos, que são, em sua maioria vendidos em bobinas (compra-se por peso), em diâmetros de 1.75mm e 3mm.

3.3.2. Estereolitografia (SLA)

Em 1987, através da empresa 3D Systems, surgia a primeira técnica de impressão 3D (Takagaki, 2012). Na Estereolitografia (*Stereolithography Apparatus*, SLA), modelos tridimensionais de foto-polímeros líquidos se solidificam quando expostos à luz ultravioleta. Um feixe de laser de baixa potência percorre o caminho determinado, enrijecendo o polímero. Uma vez que a primeira camada está concluída, um elevador abaixa a plataforma que suporta a peça para que o líquido do tanque cubra toda a superfície recém criada. Então o processo recomeça e o laser traça a segunda camada sobre a primeira, até que o protótipo esteja pronto. Após a conclusão

da impressão, os suportes de material devem ser retirados e o modelo deve ser colocado em um forno ultravioleta (UV) para que a cura se complete (Hotza, 2009; Monteiro, 2015). A Figura 3.3 demonstra o esquema de impressão 3D utilizando a técnica de SLA.

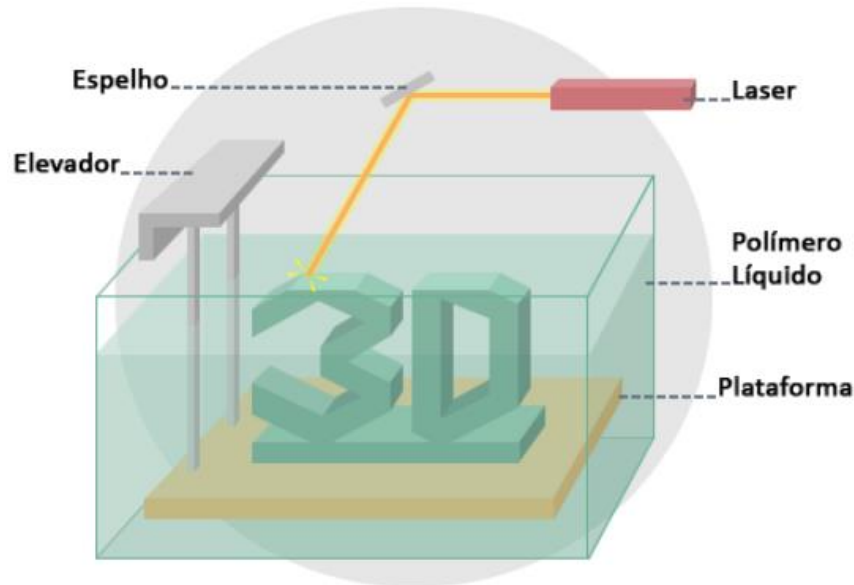


Figura 3.3 Esquema da técnica SLA (THRE3D, 2014).

3.3.3. Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering*, SLS) foi inventada por pesquisadores do Texas e patenteada em 1989. Esta técnica consiste em direcionar um feixe de laser para ligar materiais em forma de pó em um objeto sólido. O laser traça o padrão da primeira camada, em uma plataforma, fazendo que com que esta seja sinterizada. A plataforma é abaixada e outra camada é traçada e o pó, reaplicado. Este processo se repete até que a peça esteja terminada (Hotza, 2009; Monteiro, 2015).

Uma grande vantagem da técnica é a quantidade de materiais passíveis de utilização, como termoplásticos, cerâmicos, borrachas e até metais (apesar de não haver possibilidade de misturar diferentes materiais em uma só peça). Em contrapartida, o processo de SLS resulta em superfícies porosas, devido à matéria-

prima base (Monteiro, 2015). A Figura 3.4 representa um esquema de impressão 3D utilizando a técnica de SLS.

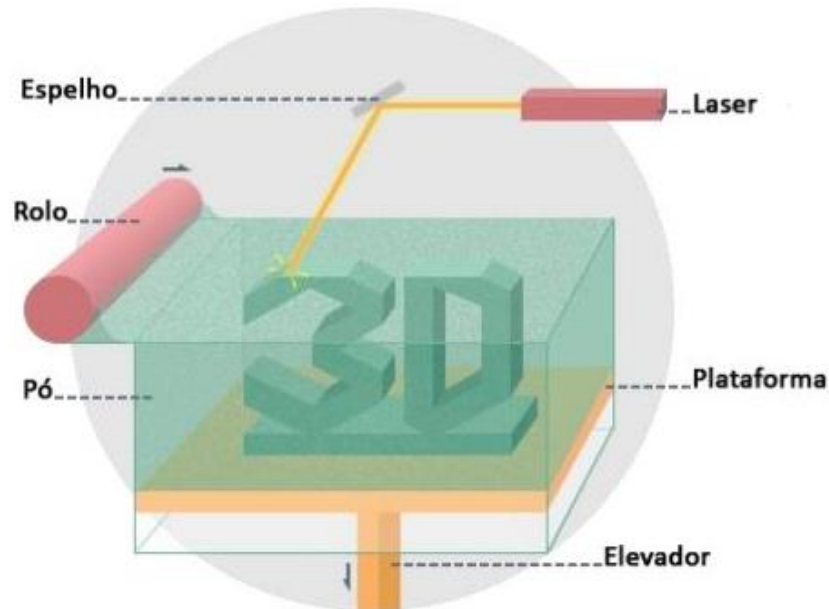


Figura 3.4 Esquema da técnica SLS (THRE3D, 2014).

3.3.4. Manufatura de Objetos Laminados (LOM)

Na Manufatura de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing*, LOM), não é utilizada uma cabeça de impressão, ao invés disso, camadas de material em forma de finas lâminas são ligadas para formar um protótipo. Um laser focalizado corta a primeira camada seguindo o contorno de cada seção da geometria e posterior a isso uma outra camada de finas lâminas são aplicadas sobre a camada anterior, e assim sucessivamente. Uma vez que todas as camadas estão formadas e já cortadas, a impressora as pressiona para fundi-las em um objeto sólido (Lipson; Kurman, 2013). A Figura 3.5 demonstra um esquema de impressão 3D utilizando a técnica LOM.

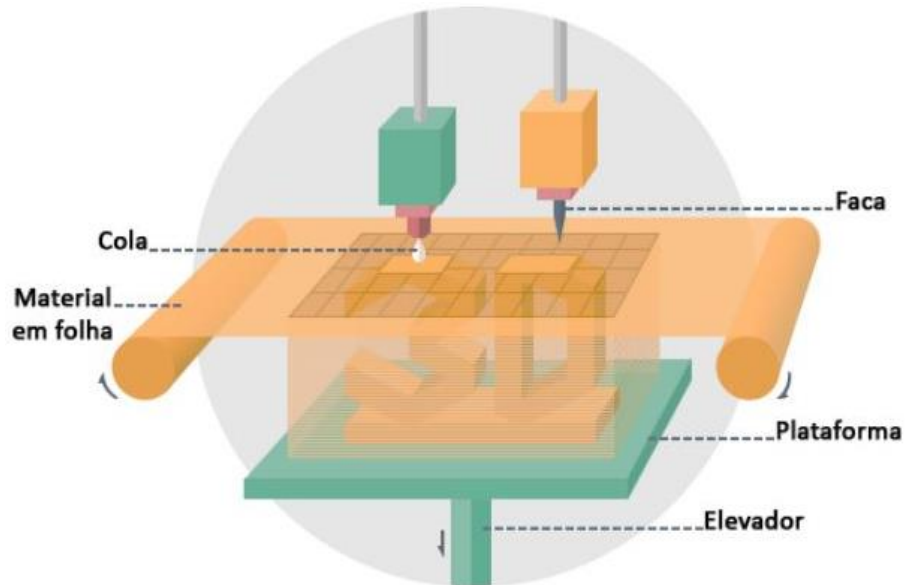


Figura 3.5 Esquema da técnica LOM (THRE3D, 2014).

3.3.5. Binder Jetting

Esta técnica foi desenvolvida na década de 80 por pesquisadores do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Nesta técnica, um cabeçote de jato-de-tinta libera, de forma seletiva, um fluido ligante para fundir o pó nas áreas desejadas, sobre uma plataforma. Após uma camada terminada, a plataforma desce alguns milímetros e é liberado mais pó, e assim, sucessivamente até formar toda a peça. Peças acabadas podem receber cera, cola, ou outro selante, que melhoram sua durabilidade e o acabamento (Hotza, 2009; Monteiro, 2015).

Um ponto positivo é que esta tecnologia é simples, pois não usa lasers ou outro componente que requer alta demanda de energia. Há possibilidade também de imprimir em cores, uma vez que gotas de tinta (minúsculas) podem ser acrescentadas durante o processo. No entanto, a superfície final da peça é porosa (Monteiro 2015). A Figura 3.6 exemplifica a técnica descrita.

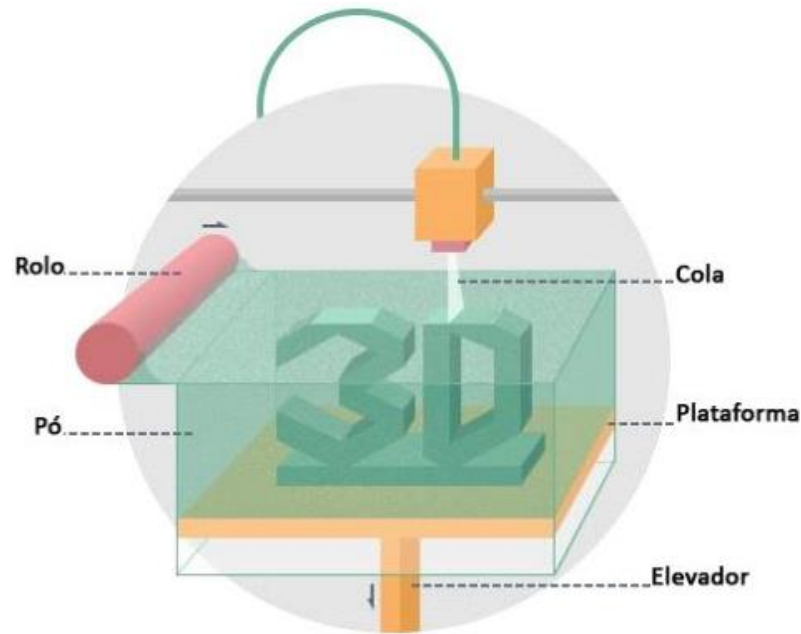


Figura 3.6. Esquema da técnica Binder Jetting (THRE3D, 2014).

3.3.6. Deposição de Energia Direcionada (DED)

O DED (*Directed Energy Deposition*) apresenta uma particularidade quando comparada às demais técnicas, pois o material pode ser depositado de qualquer ângulo, possibilitando uma maior liberdade de movimentos e a criação de formas distintas. O processo é resumido basicamente a uma máquina de solda automatizada, onde o braço robótico tem, na sua extremidade, um cabeçote que deposita o laser na superfície especificada, soldando assim a matéria prima (Santos, 2018).

O processo pode ser realizado com polímeros e cerâmicos, mas geralmente usa-se um metal sob forma de pó ou fio. Para Gibson *et al.* (2010), o DED é bastante utilizado quando se pretende reparar ou acrescentar um material a componentes já existentes. A Figura 3.7 ilustra esta técnica de impressão.

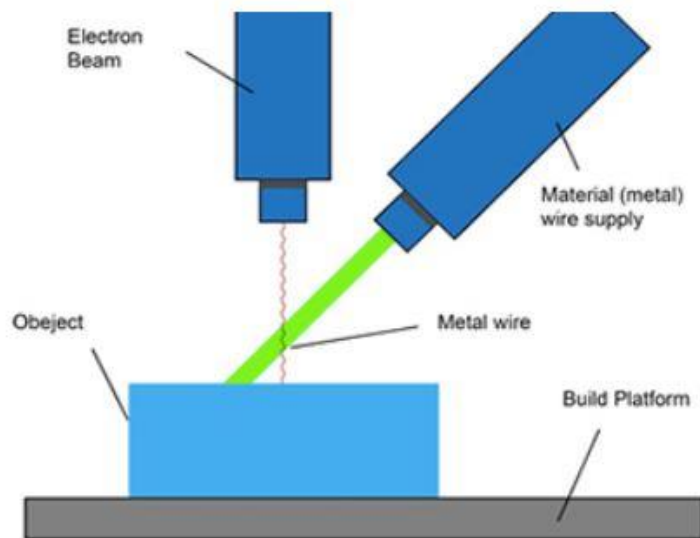


Figura 3.7 Esquema da técnica Directed Energy Deposition (Loughborough, 2016).

3.3.7. Material Jetting (MJ)

Dentre as técnicas citadas, a *Material Jetting* apresenta uma grande vantagem, uma vez que possibilita a impressão de diferentes materiais em uma mesma peça. E, por possibilitar esta diversificação de materiais, o objeto final pode conter partes rígidas, macias e coloridas (Gibson *et al.*, 2010).

Este processo ocorre através da deposição da matéria prima em forma de gotas em uma forma. Após isso, ocorre a cura em uma luz ultravioleta (UV) ou a temperatura ambiente (Santos, 2018). Pode ser considerada uma desvantagem desta técnica o uso de suporte/molde para impressão. A Figura 3.8 demonstra o esquema da técnica de impressão 3D, *Material Jetting*.

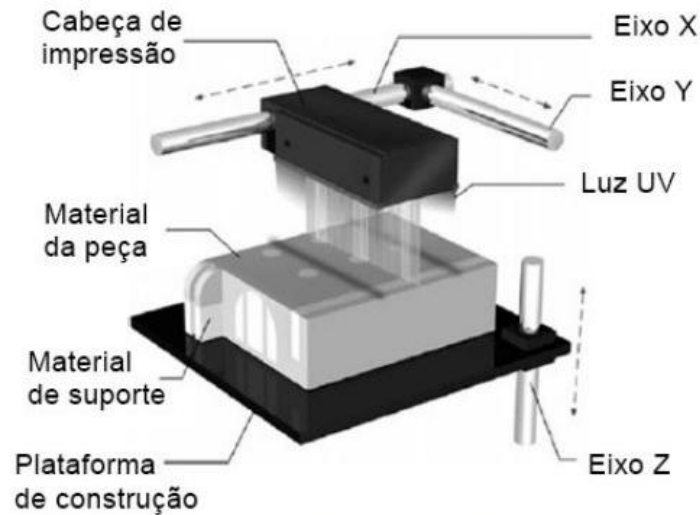


Figura 3.8 Esquema da técnica Material Jetting (Liou, 2007).

3.4. Parâmetros de Impressão

Devido as incontáveis variáveis existentes no que se refere a impressão 3D, torna-se necessária uma configuração prévia, com ajustes de parâmetros específicos e que resultarão nas características finais deste da peça ou componente a ser impresso, uma vez que estes parâmetros têm potencial para alterar a dimensão e o comportamento mecânico da peça final.

3.4.1. Porcentagem de Preenchimento

A porcentagem ou densidade de preenchimento refere-se à quantidade de material impresso que a peça terá no seu interior. É medido em porcentagem, podendo variar de 0% a 100%, sendo que, este segundo corresponde a uma peça completamente sólida, e o primeiro, diz respeito a uma peça apenas com contorno. A medida que a porcentagem de preenchimento for aumentada, o objeto impresso se tornará mais pesado e resistente. Em contrapartida, o tempo e custo (gasto com material), será maior (Casagrande, 2018; ALL3DP, 2019).

3.4.2. Velocidade de Impressão

A velocidade de impressão caracteriza-se pela velocidade que o bico extrusor se movimentará durante todo o período de impressão (Sood *et al.*, 2011). Segundo

Silva *et al.*, (2020), é indicado mantê-la moderada, para um melhor acabamento e qualidade, sendo que usualmente este valor é de 60mm/s, podendo chegar a 40 mm/s quando se buscar uma qualidade superficial melhor.

3.4.3. Orientação de Impressão

A orientação de impressão é a posição da peça na mesa de construção e relação aos eixos X, Y e Z (Sood *et al.*, 2011). Este parâmetro deve ser analisado considerando a geometria da peça, o tempo para impressão e o acabamento que se espera. Além disso, certas orientações farão com que haja a necessidade da criação de suportes (Gibson *et al.*, 2010).

3.4.4. Orientação dos Filamentos

A orientação da deposição dos filamentos é a maneira como os filamentos são depositados, camada a camada 0°, 90° ou 45°, X, Y e Z respectivamente. Esta escolha fornece à peça diferentes comportamentos diante dos esforços a que ela será submetida. Para tanto, deve ser escolhido conforme a finalidade da peça (Sood *et al.*, 2011).

3.4.5. Espessura da Camada

A espessura da camada é a dimensão da altura da camada medida na direção do eixo Z do modelo. É definida pelo diâmetro do bico extrusor, sendo que o mais comumente utilizado são dimensões entre 0,1mm e 0,3mm dependendo da qualidade pretendida e a finalidade da peça. Este parâmetro afeta qualidade, tempo de impressão, resistência entre outras características (ALL3DP, 2019; Araujo 2016).

3.5. Polímeros Empregados em Impressão 3D

Polímeros são considerados materiais orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos, de grande peso molecular, cuja estrutura molecular se dá a partir da repetição de pequenas unidades, estas levam o nome de meros. O termo polímero origina do grego: poli = muitos e meros = unidades repetidas e representa uma

molécula formada a partir de muitas partes idênticas, os meros. A grande molécula é assim chamada macromolécula (Silva, 2010; Crowford, 1998).

Os polímeros são utilizados quase que em todas as aplicações da atividade humana e industrial. Desde embalagens, construção civil, eletrônicos, produtos automotivos e aeroespaciais, componentes agrícolas até produtos voltados à beleza e saúde. Portanto, compreender suas propriedades é de suma importância para entender como o polímero se transforma, através do seu ciclo de vida, para um produto acabado e, dependendo do tipo, podendo ser até reciclado e reintroduzido (Correa; Yamakawa Ir, 1999; Silva, 2010). A Figura 3.9 mostra os valores da produção, em bilhões de reais, por segmento da indústria, e é possível verificar que o plástico corresponde a 41% do total, seguido pelo setor de embalagens de papel/cartão/papelão com 30%, metálicas com 19%, vidro com 6%, têxteis para embalagens com 3% e madeira com 1%.

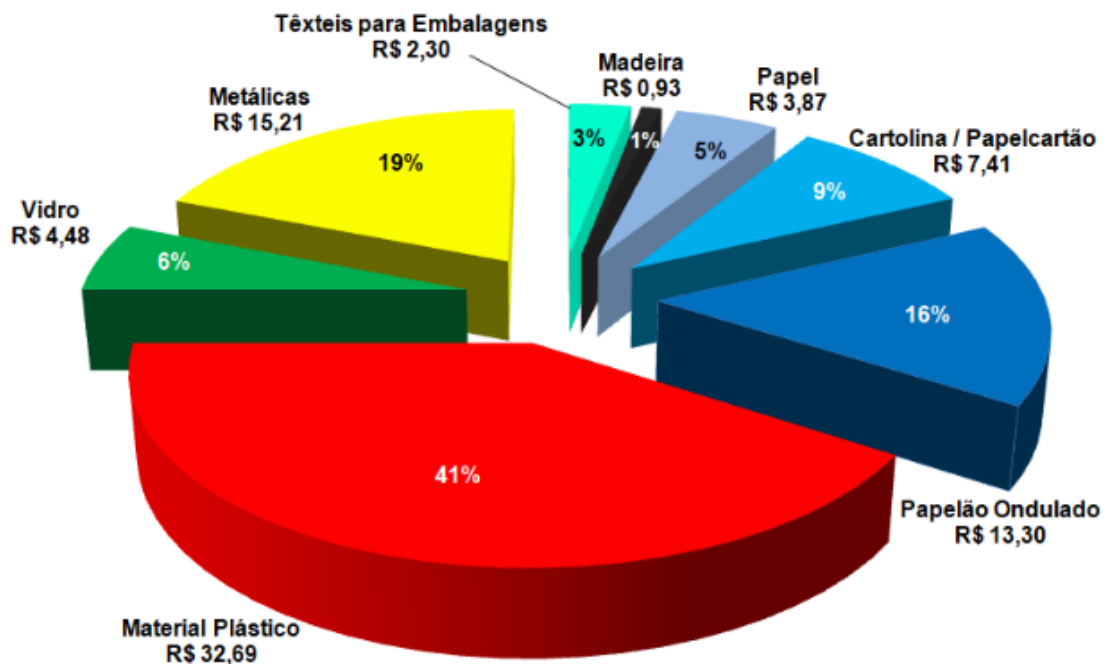


Figura 3.9 Valor bruto da produção por seguimento (ABRE, 2019).

3.5.1. Termoplásticos

Termoplásticos são formados por extensas cadeias poliméricas unidas através de ligações intermoleculares de Van der Waals que se comparada à ligações

covalentes, são consideradas fracas. Uma vez que o termoplástico é aquecido, as forças intermoleculares são conseqüentemente enfraquecidas, tornando-se mais moles e flexíveis e deixando o material semelhante a um fluido viscoso. Quando o material resfria, ele torna-se sólido novamente. Este ciclo temperatura alta – amolecimento do material – resfriamento – solidificação, pode ser repetido inúmeras vezes, e isso é uma grande vantagem dos termoplásticos. Em contrapartida, uma desvantagem, suas propriedades são sensíveis à temperaturas elevadas (Crowford, 1998; Silva 2010).

3.5.1.1. PLA

O Poli (Ácido Lático) é um termoplástico, comumente chamado de PLA, que tem sua origem a partir de amidos vegetais, como milho, trigo, entre outros e em condições corretas é biodegradável (Salinas, 2014). Os filamentos deste material produzem peças mais precisas, atentando fielmente aos detalhes e cantos acentuados, resultando em um melhor acabamento da superfície (Brito *et al.*, 2012). A partir das características do PLA, foi criado um perfil para este material, demonstrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 Perfil do PLA (Alkaios, 2017).

3.5.1.2. ABS

O Acrilonitrila-Butadieno Estireno, conhecido comercialmente como ABS, é um termoplástico derivado do petróleo, e por isso leva muito mais tempo para se degradar. Este material apresenta boas características mecânicas, como rigidez e leveza, podendo ter aplicação em diversas áreas, domésticas e industriais (Celentano 2003; Albuquerque, 2014). Para Salinas (2014), os filamentos de ABS também possuem boas propriedades de pós-processamento, uma vez que as peças impressas podem ser lixadas, coladas e pintadas.

Para Unwin *et al.* (2013), o ABS quando se encontra à temperatura ambiente é estável e, portanto, não se decompõe em constituintes prejudiciais à saúde humana. Entretanto, a temperaturas altas (próximo de 400 °C), este material se decompõe em substâncias cancerígenas. A partir das características do ABS, foi criado um perfil para este material, demonstrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 Perfil do ABS (Alkaios, 2017).

3.6. Propriedades Mecânicas dos Polímeros

Esta sessão traz resultados de trabalhos com conteúdo semelhantes ao presente estudo, abordando pelo menos um dos materiais ensaiados (ABS e/ou PLA)

e parâmetros de impressão, a fim de obter diferentes resultados de propriedades mecânicas.

Os autores Lovo *et al.* (2017) estudaram as propriedades mecânicas do ABS, a partir da fabricação por FDM. As peças foram impressas a partir da norma ASTM D 638 (tipo IV), e seguindo as seguintes orientações: [90°], [45°/-45°] e [0°/90°]. Os autores obtiveram o seguinte resultado, descrito na Figura 3.12.

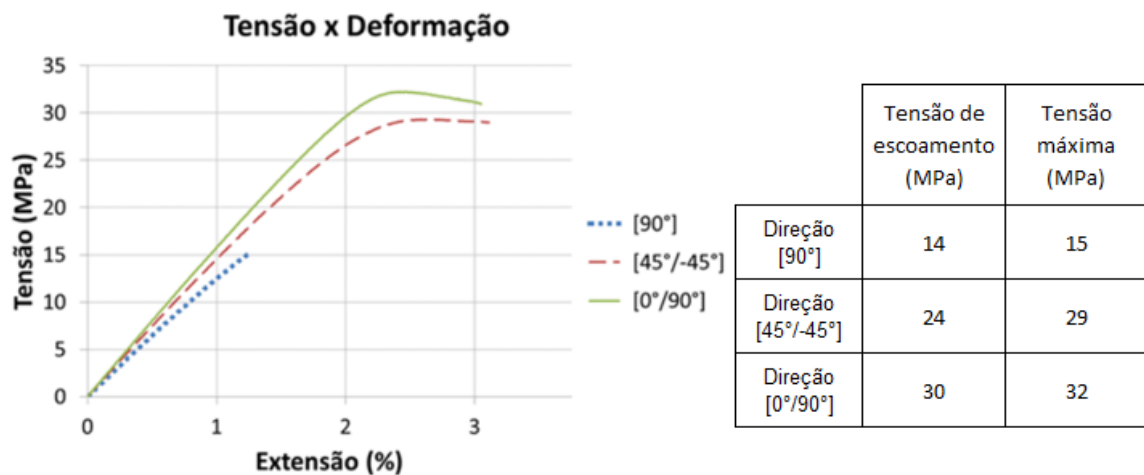


Figura 3.12 Resultados para o ABS de tensão x deformação (Lovo *et al.* 2017).

Comparando os resultados dos autores Lovo *et al.* (2017) tem-se que na peça impressa em uma única direção obteve valores de tensões bem inferiores quando comparado as peças com a deposição dos filamentos em [45°/-45°] e [0°/90°].

Pelegrino *et al.* (2019), a partir da técnica FDM, e utilizando a norma vigente para tração em polímeros, imprimiu corpos de prova em ABS, posicionando a peça de forma horizontal na mesa (de impressão) e variando a deposição dos filamentos, 45°, e 0°. Como resultado deste ensaio os autores constataram que a tensão de escoamento do ABS, com filamentos depositados em 45°, tiveram um resultado de 11,2 MPa, enquanto que o mesmo material, com os filamentos orientados em 0° (paralelo a força de tração), apresentou um valor de 28,4 MPa.

Segundo Dizon *et al.* (2018), em geral as melhores propriedades mecânicas são atingidas quando a deposição de filamentos ocorre de forma longitudinal, ou seja,

paralela à direção da força. Anteriormente, os autores Zieman *et al.* (2012) confirmaram esta afirmação ao ensaiar materiais termoplásticos e constatar que os maiores resultados de limite de resistência a tração foram obtidos através da deposição de filamentos em 0°.

Medeiros *et al.* (2020) imprimiram peças em PLA utilizando a técnica FDM, a fim de submetê-las a ensaios de tração. Para tanto, variaram o parâmetro correspondente a densidade de preenchimento. O material impresso com 40% de preenchimento apresentou um alongamento de 4,2 mm e um limite de resistência a tração de 22 MPa, enquanto que o mesmo material quando impresso com 70% de preenchimento, alongou 5,75 mm e obteve valor de limite de resistência a tração de 28 MPa. Para a tensão de ruptura obteve-se um ganho de 18,62% com o aumento da densidade.

Comprovando o que anteriormente foi constatado, Kling *et al.* (2021) variaram também a densidade de preenchimento de corpos de prova impressos pela técnica FDM, utilizando o material ABS. Os autores variaram as densidades em 20%, 50% e 80%, obtiveram os valores de limite de resistência a tração de 18,8 MPa, 19,7 MPa e 24,2 MPa respectivamente. Comprovando a teoria de que para maiores densidades, tem-se maiores tensões, tanto para o PLA como para o ABS.

Para o ensaio de dureza Shore D, Martins *et al.* (2016) escolheram o material ABS para estudo. Para tanto, imprimiram os corpos de prova através da técnica FDM e optaram por variar o parâmetro de espessura de camada para comparar e analisar os resultados obtidos por essa variância. As espessuras de camada selecionadas foram: 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, e 0,40 mm, e os resultados deste ensaio estão descritos na Figura 3.13

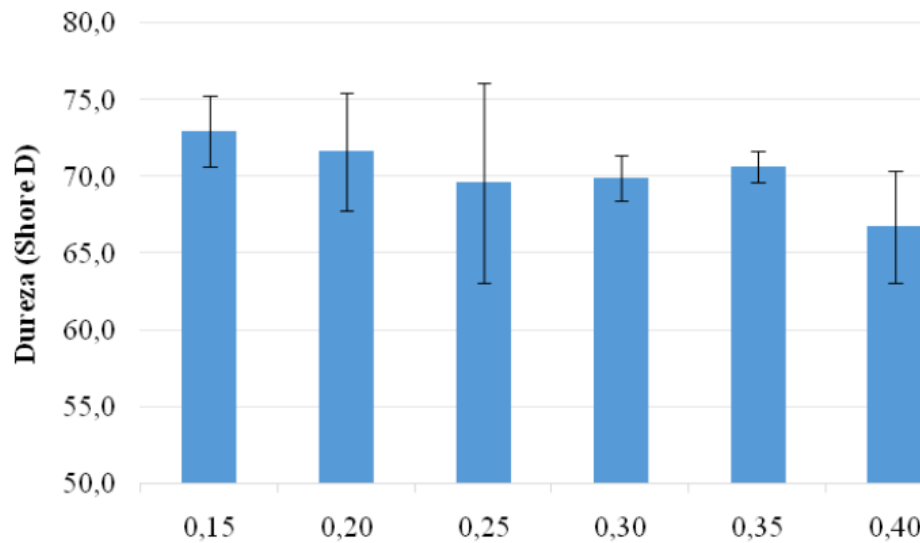


Figura 3.13 Resultados do ensaio de dureza com a variação na espessura de camada (Martins *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos no estudo de Martins *et al.* (2016) demonstram que, de forma geral, a variação do parâmetro em questão não tem grande influência nos valores de dureza, por exemplo não se pode dizer que quanto menor a espessura de camada, maior a dureza do ABS, isso fica claro no gráfico, uma vez que ele não é de natureza crescente ou decrescente.

Guachambala *et al.* (2020) imprimiram 10 corpos de prova de ABS e PLA, através da técnica FDM, e submeteram as peças à ensaios de dureza Shore D, e os resultados das médias obtidas foram os seguintes: 61,3 para o ABS e 64,8 para o PLA.

Carneiro *et al.* (2019) optaram por estudar como a temperatura de mesa de impressão 3D influencia o desempenho do ABS no ensaio de dureza Shore D. Diferentemente do PLA, o ABS necessita uma mesa de impressão aquecida, os autores, por sua vez, resolveram variar a temperatura de 80 a 130 °C e obtiveram as seguintes médias, mostradas na Figura 3.14.

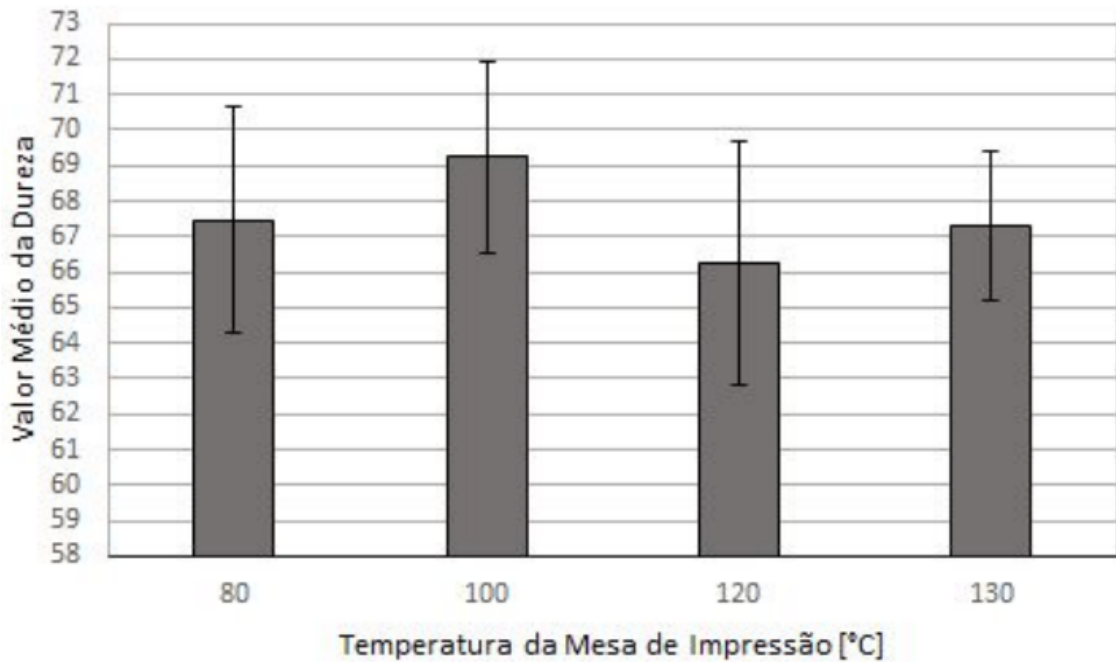


Figura 3.14 Médias dos resultados da dureza com a variação da temperatura de mesa (Carneiro *et al.*, 2019).

Carneiro *et al.* (2019) constaram através das durezas que a temperatura de mesa não é um grande influente para os resultados de dureza do ABS.

Os autores Cabreira e Santana (2017) imprimiram corpos de prova em PLA, e testaram a relação dos parâmetros de impressão com a resistência ao impacto Izod, para tanto, utilizaram a técnica FDM. No primeiro ensaio os corpos de prova variavam apenas o parâmetro “Orientação de Preenchimento”, os demais se repetiam. A Tabela 3.1 demonstra estes parâmetros.

Tabela 3.1 Parâmetros para impressão 3D (Cabreira; Santana, 2017).

Parâmetros	Valor
Orientação de preenchimento	0°, -45°, +45° e 90°
Espessura de camada	0,3 mm
Velocidade de deposição	15 mm/s

Seguindo a norma ASTM D 256, os autores obtiveram os resultados demonstrados na Figura 3.15 para as variações de “Orientação de preenchimento”.

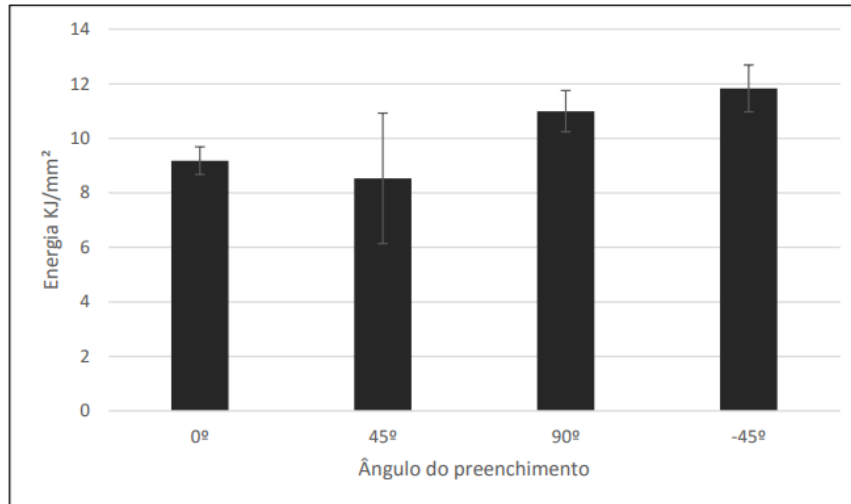


Figura 3.15 Gráfico dos valores de energia absorvida (Cabreira; Santana, 2017).

Observou-se, a partir do gráfico, que o ângulo de 0° foi o menos resistente ao impacto, enquanto que as orientações de preenchimento que demonstraram melhor desempenho foi de 90° e -45°, um destaque maior para este segundo. Para o segundo ensaio, os autores Cabreira e Santana (2017) fizeram outras variações de parâmetros, mostrados na Tabela 3.2, utilizando o “Grau de preenchimento” já conhecido anteriormente como aquele de maior resistência ao impacto.

Tabela 3.2 Parâmetros de impressão (Cabreira; Santana, 2017).

Parâmetros	Valor
Grau de preenchimento	100% e 50%
Orientação de preenchimento	- 45 °
Velocidade de deposição	15 mm/s
Espessura de camada	0,3 mm

A partir da norma ASTM D 256, os autores obtiveram os seguintes resultados para o ensaio de impacto tipo Izod: o corpo de prova cujo grau de preenchimento era de 100%, absorveu mais energia de impacto, aproximadamente 12 kJ/mm², enquanto que o corpo de prova 50% preenchido apresentou um valor de 7,5 kJ/mm².

Analisando este primeiro ensaio de impacto Izod dos autores Cabreira e Santana (2017), pode-se afirmar que a utilização de metade do preenchimento não necessariamente resulta na metade da energia absorvida pelos corpos de prova.

Pode-se traçar uma comparação com o presente trabalho, uma vez que o parâmetro “B”, que apresenta uma porcentagem de preenchimento de 30%, também fez com que o material (ABS e PLA) absorvesse mais energia.

Para comparar as propriedades mecânicas dos materiais, os autores Guachambala *et al.* (2020), submeteram o material ABS e PLA e ensaios de impacto Izod, seguindo o que prevê a norma ASTM D 256, para tanto obtiveram os resultados descritos na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 Média das energias absorvidas por cada material (Adaptado de Guachambala *et al.*, 2020).

Materiais	Média energia Impacto Izod (J/m)
ABS	34,91
PLA	19,2

A tabela com as médias das energias absorvidas no ensaio Izod, demonstra que o material ABS é mais resistente ao ensaio de impacto, pois precisa de mais energia por unidade de área para se romper.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa foi dividida em duas fases. A fase 1 que é a etapa que precede e a fase 2 que corresponde a etapa posterior à impressão 3D. Nesta primeira, os corpos de prova dos materiais ABS e PLA foram modelados no Software AutoCAD, seguindo o que determina as normas vigentes para cada ensaio: ASTM D 638 (tração); ASTM D 2240 (dureza Shore D) e ASTM D 256 (tenacidade ao impacto). Foi utilizada a Impressora MakerBot Replicador 2X para imprimir os protótipos requeridos. Os parâmetros iniciais de impressão foram selecionados, de forma a criar duas opções de impressão (A e B), variando os seguintes itens: porcentagem de preenchimento, velocidade de impressão, orientação e espessura da camada. Para a fase 2 da metodologia, submeteu-se as peças impressas à ensaios de resistência à tração, dureza superficial e tenacidade ao impacto, para posterior análise e comparação dos dados encontrados.

De acordo com o autor Gil (2022) o tipo de pesquisa que se enquadra nesta situação é o planejamento experimental. Também chamado de delineamento experimental, este tipo de pesquisa se caracteriza pela determinação de uma ou mais variáveis capazes de influenciar o resultado final de um sistema ou processo.

Com a proposta de atingir os objetivos específicos desta pesquisa, tem-se um fluxograma com as etapas metodológicas seguidas para a conclusão do trabalho. O Fluxograma está descrito na Figura 4.1.

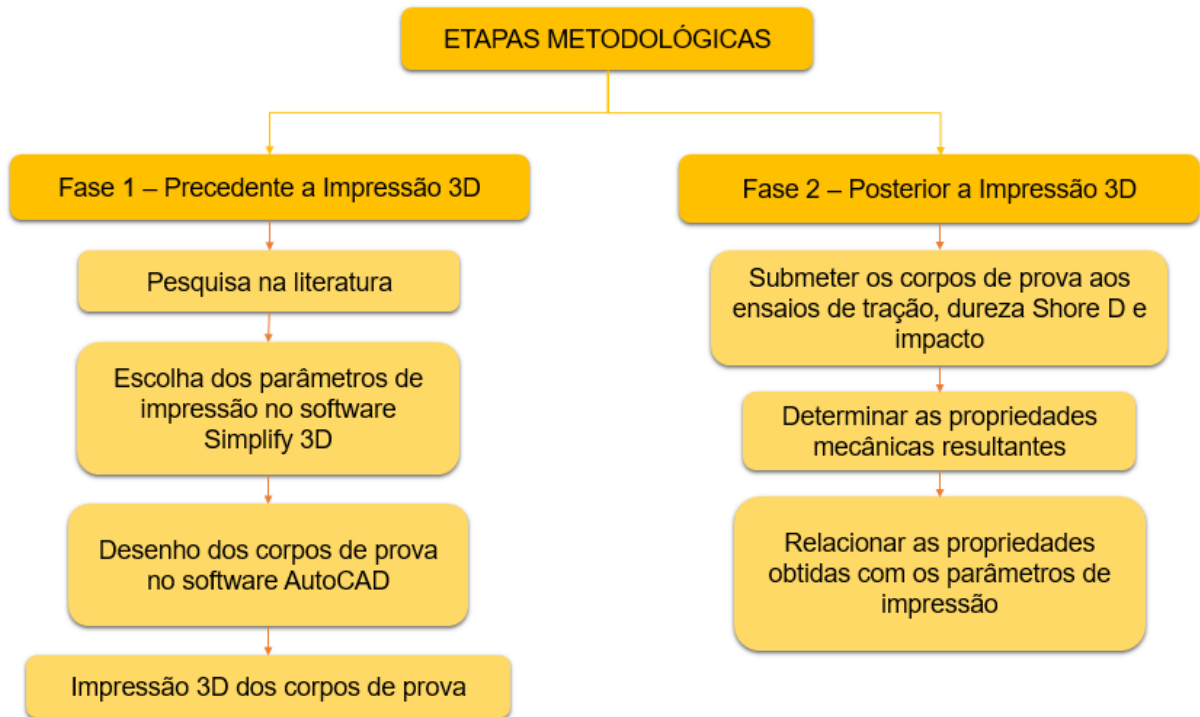


Figura 4.1 Fluxograma descrevendo as etapas metodológicas.

4.1. Parâmetros de Impressão

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros que foram investigados nas impressões dos corpos de prova em ABS e PLA.

Tabela 4.1 Parâmetros A e B para impressão

PARÂMETROS A SEREM ALTERNADOS	A	B
Porcentagem de preenchimento	10%	30%
Espessura da camada	0,15 mm	0,30 mm
Orientação de preenchimento	0° 90°	45° - 45°
Velocidade de impressão	80 mm/s	40 mm/s

A escolha dos parâmetros se deu através de dois fatores: pesquisas na literatura e conversas com os técnicos do laboratório da PUCRS, no espaço Aquarium. As pesquisas na literatura nortearam a seleção de parâmetros amplamente utilizados por outros pesquisadores e que poderiam, de alguma forma, influenciar o resultado final.

O espaço Aquarium é responsável pelo apoio à pesquisas multidisciplinares sobre projeto de produto, impressão 3D entre outros. Por se tratar de uma pesquisa acadêmica, foram utilizado valores de parâmetros propostos pelos técnicos e dentro dos padrões da universidade, aliado as pesquisas anteriormente realizadas e a proposta de encontrar resultados distintos.

Na coluna “B” optou-se por selecionar parâmetros mais significativos, um preenchimento maior e a espessura de camada correspondente ao dobro da coluna “A”. Para a orientação, a escolha foi de alternar a deposição do filamento a cada camada depositada, ou seja, em uma camada seria depositado a 45° e na seguinte, -45°. Para a coluna “A”, segue-se o mesmo princípio, 0° e depois 90° e assim, sucessivamente.

4.1.1. Simplify 3D

O Software utilizado para selecionar os parâmetros da impressora é o padrão utilizado pelo Lametro/Aquarium. A Figura 4.2 mostra a tela do Software em questão.

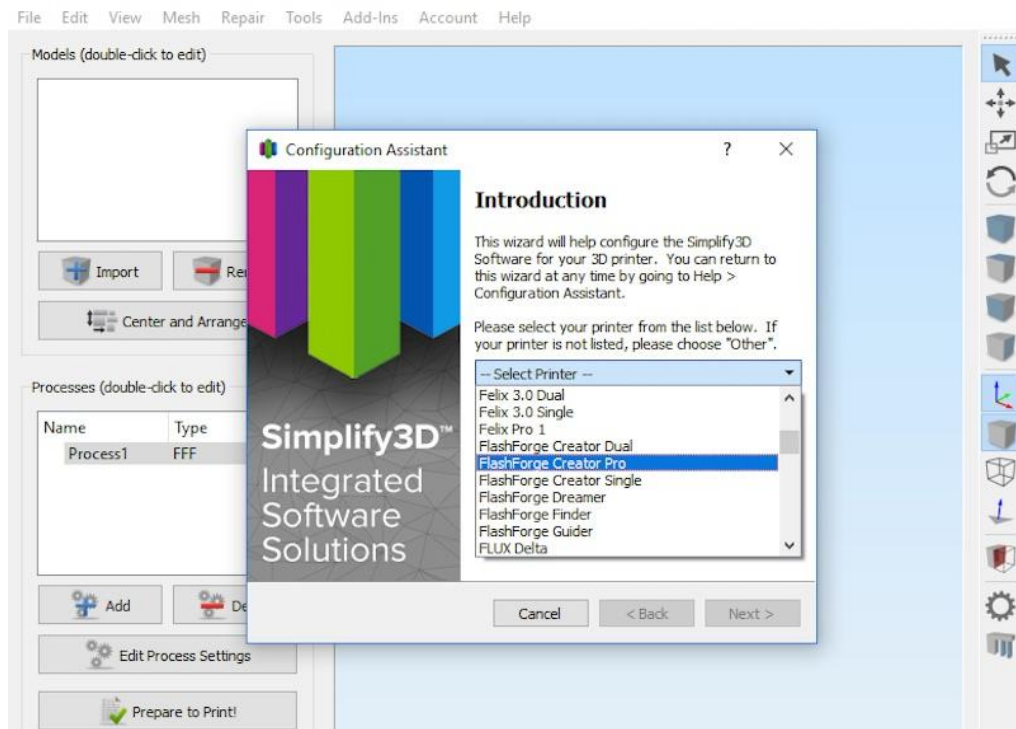


Figura 4.2 Tela do Software Simplify 3D (SIMPLIFY3D, 2021).

4.2. Impressora por FDM

A impressora utilizada nesta pesquisa foi a MakerBot Replicator 2X, a mesma está ilustrada na Figura 4.3 e Figura 4.4.

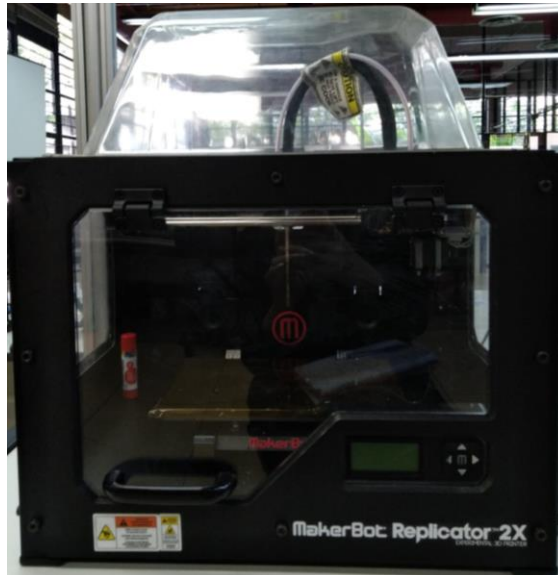


Figura 4.3 Impressora MakerBot Replicator 2X – vista frontal.

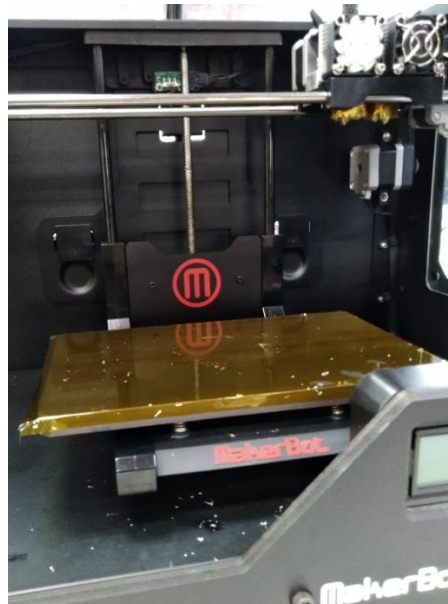


Figura 4.4 Impressora MakerBot Replicator 2X – vista parte interna.

De acordo com a MakerBot Store (2022), esta impressora é ideal para imprimir peças em ABS e PLA e foi projetada por especialistas, tratando-se da quarta geração

do equipamento. A impressora tem diâmetro do filamento de até 1,75 mm e faz parte da infraestrutura do espaço Aquarium.

4.3. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é realizado a partir da aplicação de uma carga de tração a um corpo de prova, até sua ruptura. A força que é aplicada ao material permite a obtenção de diversas propriedades, tais como: limite de escoamento, de resistência à tração, deformação até a ruptura, módulo de elasticidade, resiliência, tenacidade, entre outras. A norma ASTM D 638 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* determina as condições necessárias padronizadas para realização do teste em polímeros (Jesus, 2005; Garcia *et al.*, 2012). O corpo de prova deve apresentar as dimensões conforme a Figura 4.6 e Tabela 4.2.

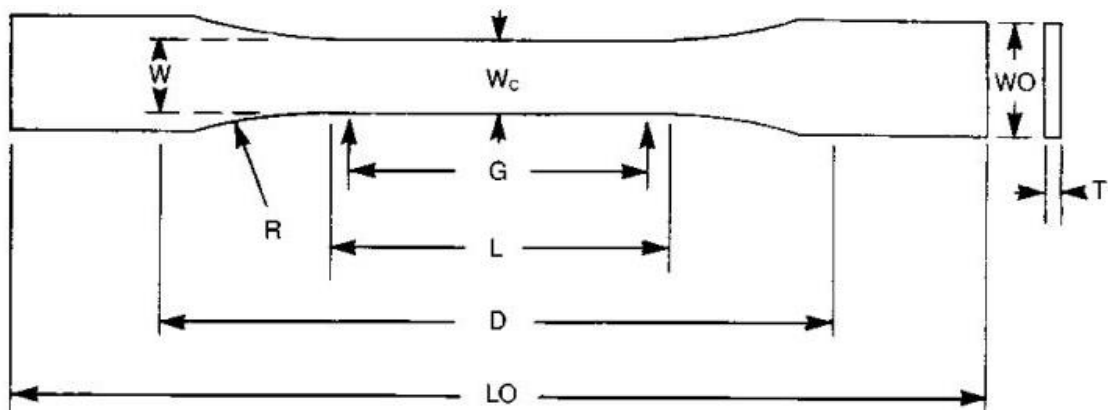


Figura 4.5 Dimensões padronizadas dos corpos de prova para ensaios de tração - tipo I, II e IV (ASTM D 638).

Tabela 4.2 Dimensões do corpo de prova para ensaios de tração - tipo II (ASTM D 638).

Dimensões	Tipo II
W- Largura da Seção Estreita	6 mm
L - Comprimento da Seção Estreita	57 mm
WO - Largura Total	19 mm
LO - Comprimento Total	183 mm
G - Comprimento do Calibre/Bitola	50 mm
D - Distância Entre as Garras	135 mm
R - Raio do Filete	76 mm

Com formato de haltere, a norma compreende corpos de prova de até 14 mm de espessura. Segundo a mesma, há cinco tipos possíveis de amostras. O tipo 1 e 2 é utilizado para situações onde o material tem espessura igual ou menor que 7 mm. A amostra tipo 3 deve ser usada para espessuras entre 7 e 14 mm. O tipo 4 é mais usual para comparações entre materiais rígidos e não rígidos. Por último, o tipo 5, que é utilizado para materiais limitados a 4 mm de espessura ou em casos de um grande número de amostras em um espaço limitado (Pelegriño *et al.*, 2019). A Tabela 4.3 apresenta as espessuras para cada tipo de amostra.

Tabela 4.3 Espessuras dos tipos de amostra para ensaios de tração (Adaptado de ASTM D 638).

Dimensões (mm)	Esp. <= 7 mm		Esp. 7 a 14 mm	Esp. <= 4 mm	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
W - Largura da seção estreita	13	6	19	6	3,18
L - Comprimento da seção estreita	57	57	57	33	9,53
WO - Largura total	19	19	29	19	9,53
LO - Comprimento total	165	183	246	115	63,5
G - Comprimento do Calibre/Bitola	50	50	50	25	7,62
D - Distância entre garras	115	135	115	65	25,4
R - Raio do Filete	76	76	76	14	12,7

Os ensaios de tração foram realizados com as seguintes condições operacionais: velocidade de ensaio de 10 mm/min e célula de carga de 20 kN. No total, foram ensaiados 20 corpos de prova que serviram para as análises, estes diferenciando materiais e parâmetros.

4.4. Ensaio de Dureza

O ensaio de Dureza Shore é utilizado para medir a resistência à penetração ou ao risco. Após a aplicação de uma carga localizada é analisada a resistência a indentação do polímero em questão (Jesus, 2005). Para medir a dureza em polímeros é recomendado o ensaio de dureza Shore, previsto na norma ASTM D 2240 - *Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*. Esta norma apresenta variações para cada material, sendo que para termoplásticos, borrachas e plásticos

mais duros, a escala amplamente utilizada é a D (Carneiro *et al.*, 2019). O dispositivo para ensaio de dureza Shore D está ilustrado na Figura 4.6.

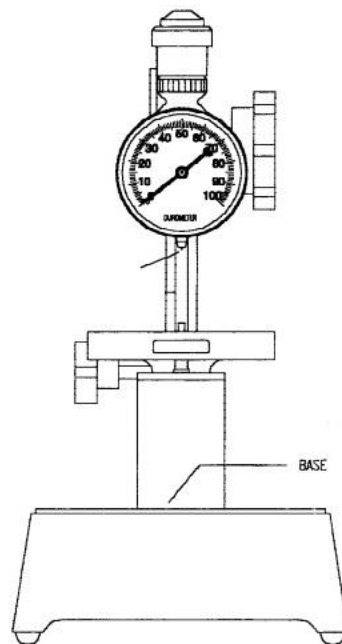


Figura 4.6 Esquema do durômetro de ensaio de Dureza Shore D (ASTM D 2240).

Segundo a norma ASTM D 2240, a dureza Shore D pode variar de 0 até 100, sendo os maiores valores para maiores durezas. As amostras devem ser planas e ter no mínimo 6 mm de espessura. Quanto ao ponto de medição, deve ficar no mínimo a 6 mm de distância das bordas da amostra e 6 mm de distância entre cada ponto de medição (é indicado no mínimo 5 medições). A carga utilizada é de 5 kgf.

Os corpos de prova, em forma de disco, foram impressos utilizando as seguintes dimensões: 70 mm de diâmetro e 6 mm de espessura. Foram realizadas 6 medições em cada amostra de PLA tipo A, PLA tipo B, ABS tipo A, ABS tipo B. O “tipo”, neste caso refere-se às variações de parâmetros descritas na Tabela 4.4.

4.5. Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto é utilizado para medir a tendência de um material a deformar-se a partir dos efeitos de cargas dinâmicas. O choque, ou também chamado impacto representa um esforço de natureza dinâmica pois a carga é aplicada de repente e de forma brusca. Outro fator determinante para o ensaio é a velocidade em que a força é aplicada (força associada com velocidade se traduz em energia)

(Callister, 2000). De forma resumida, o ensaio consiste na determinação da energia absorvida na deformação do corpo de prova até a fratura. Para ensaiar polímeros, utiliza-se a norma ASTM D 256 - *Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*.

No ensaio de impacto há duas possibilidades para serem feitas: Charpy e Izod. Para este trabalho, optou-se pela técnica de Ensaio de Impacto chamada Izod. A diferença entre eles está na posição em que o corpo de prova é apoiado. Enquanto que no ensaio Charpy, demonstrado na Figura 4.7a o corpo de prova é apoiado de forma horizontal, no tipo Izod (Figura 4.7b) o corpo de prova encontra-se na vertical.

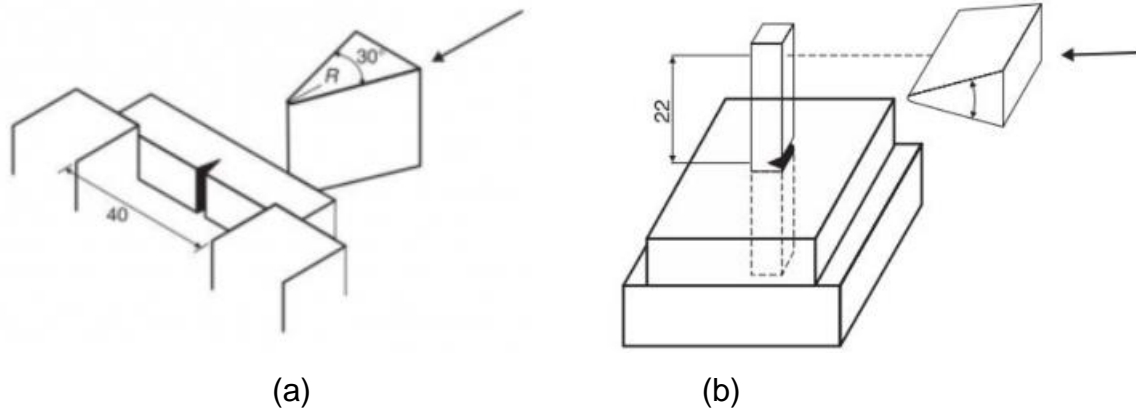


Figura 4.7 Ensaio de impacto tipo: (a) Charpy e (b) Izod (ASTM D 256).

O corpo de prova segue o padrão e as dimensões prescritas na norma vigente, descritos na Figura 4.8 e Tabela 4.5. Foram impressos 5 corpos de prova para cada parâmetro, de cada material (ABS e PLA).

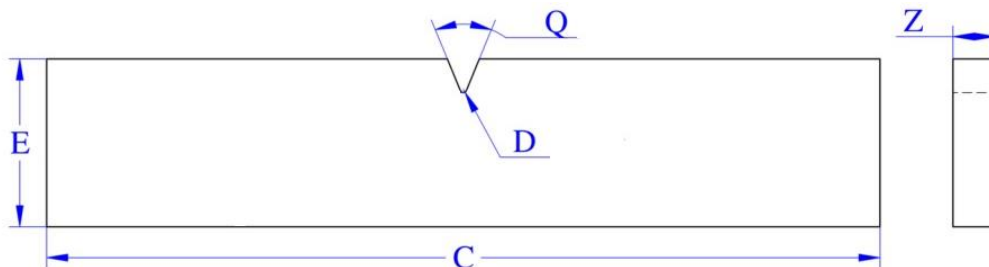


Figura 4.8 Padrão do corpo de prova para ensaios de impacto Izod (ASTM D 256).

Tabela 4.4 Dimensões dos corpos de prova para ensaios de impacto Izod (ASTM D 256).

DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA	
C	60 mm
Q	45 °
D	R = 0,25 mm
E	12,7 mm
Z	7 mm

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em seções para a melhor compreensão dos ensaios realizados e seus respectivos resultados. A primeira seção traz os dados obtidos dos ensaios de tração, a segunda seção traz os resultados do ensaio de dureza shore D e a terceira seção traz os dados do ensaio de impacto. Por último, a quarta seção traz as discussões e fluxogramas com os resultados obtidos.

5.1. Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração, os corpos de prova (CP) foram impressos de forma horizontal a fim de facilitar a fabricação, uma vez que horizontalmente, há uma maior área de contato com a mesa de impressão.

Uma forma clássica de se representar os resultados do ensaio de tração é por meio do gráfico ou curva tensão x deformação, medida por meio dos valores da força aplicada e da deformação sofrida pelo material a cada instante, até a ruptura da amostra. Ou seja, é uma descrição gráfica do comportamento do material durante o ensaio. As análises aqui apresentadas se basearam em diagramas tensão x deformação e gráficos tipo coluna. Os dados estão em MPa (tensão) e deformação, que é uma medida adimensional.

Dos 10 corpos de prova em ABS, 5 deles foram impressos a partir dos parâmetros de impressão "A", e os outros 5 utilizando-se dos parâmetros de impressão do tipo "B". A Figura 5.1 mostra as amostras prontas e com etiquetas de distinção para que não ocorresse nenhum tipo de equívoco.

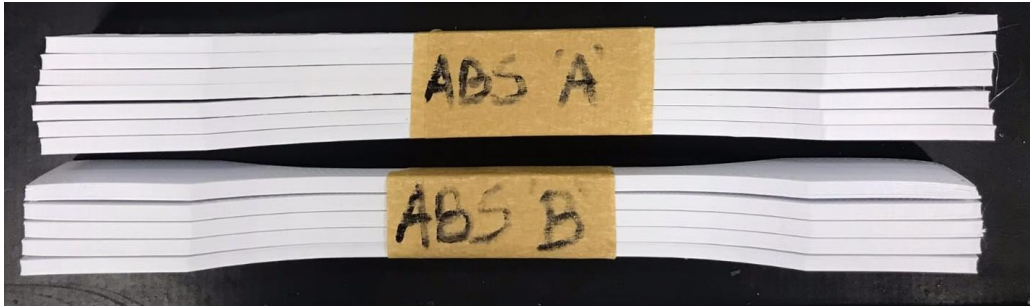


Figura 5.1 Corpos de prova em ABS para o ensaio de tração.

Para melhor visualização, os cinco corpos de prova iguais foram analisados de forma sobreposta no gráfico, uma vez que se espera que o material tenha comportamento semelhante, já que os corpos de prova são idênticos entre si. A Figura 5.2 mostra a curva tensão x deformação do ABS, quando impressos com os parâmetros “A”. Em seguida, a Figura 5.3 mostra também o ABS, este utilizando os parâmetros tipo “B”.

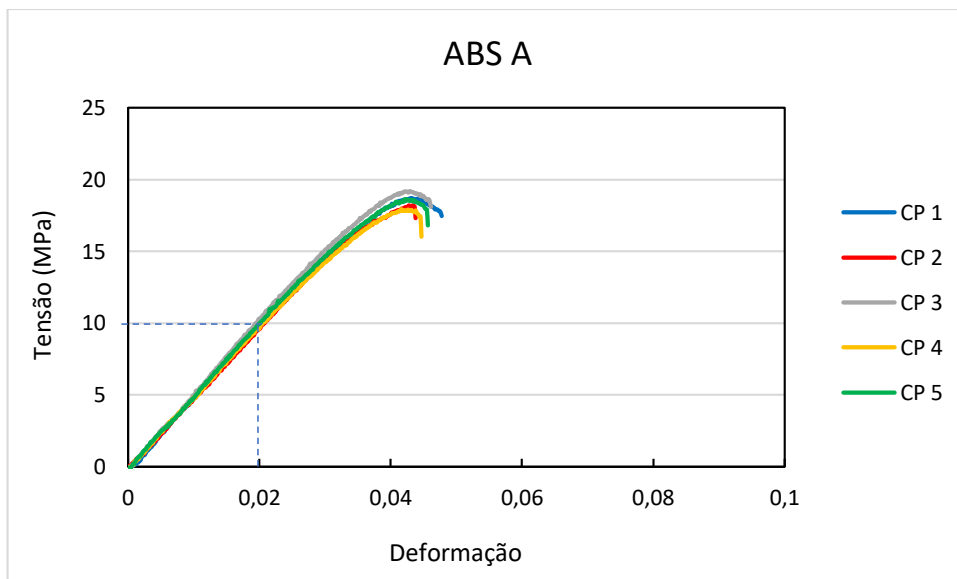


Figura 5.2 Gráfico tensão x deformação - ABS tipo “A”.

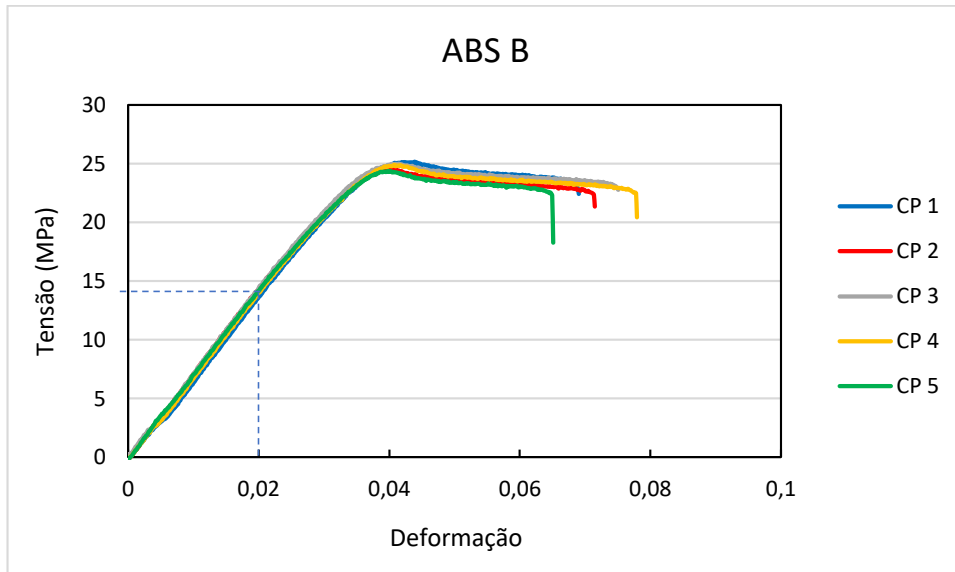


Figura 5.3 Gráfico tensão x deformação - ABS tipo "B".

Analisando os dois diagramas das Figuras 5.2 e 5.3, percebe-se que o mesmo material impresso utilizando parâmetros diferentes, geram curvas tensão x deformação distintas. Na Figura 5.2 é possível perceber que o limite de resistência tração - LRT (MPa) é precedido da tensão de ruptura - σ_r (MPa), isso significa que o ABS, impresso com o parâmetro tipo "A" apresenta pouca estrição, e tem uma deformação significativamente menor que o ABS impresso com o parâmetro "B", onde a curva (Figura 5.3) é característica de um material que apresenta maior deformação específica e diminuição da área da seção transversal (estricção) até seu rompimento. Em termos de valores de resistência à tração, observa-se que o ABS tipo B suportou maiores tensões quando comparado ao tipo A (aproximadamente 5 MPa a mais na tensão máxima). Também é notado uma pequena diferença em relação ao módulo de elasticidade do material nas duas condições, onde o ABS "A" apresentou uma menor inclinação na parte linear elástica da curva (detalhe nas linhas pontilhadas), demonstrando uma menor rigidez para esta condição de impressão quando comparado ao tipo "B".

Para o material PLA, foram impressos 10 corpos de prova, estes seguindo o mesmo procedimento realizado com o ABS, ou seja 5 foram impressas com os parâmetros do tipo "A", as outros 5, utilizando os parâmetros de impressão "B". A Figura 5.4 mostra os corpos de prova já impressos e utilizando de etiquetas para diferenciá-los.

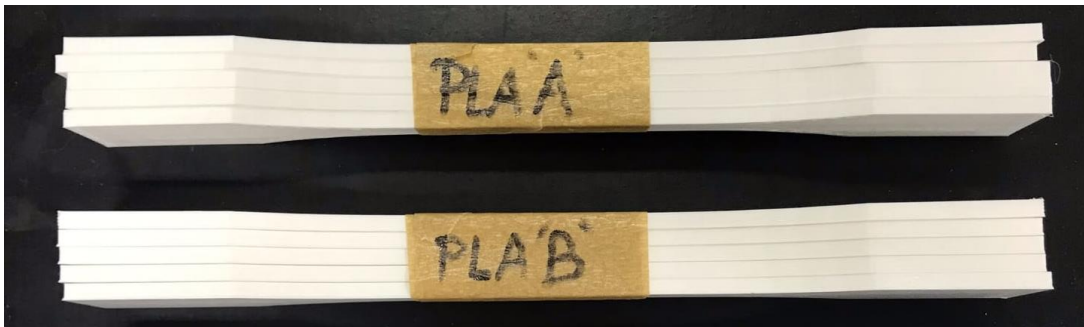


Figura 5.4 Corpos de prova em PLA para o ensaio de tração.

Por se tratar de 5 corpos de provas confeccionados da mesma forma, o gráfico tensão x deformação traz os resultados em uma plotagem só, de forma a fazer uma análise visual do comportamento dos mesmos. As Figuras 5.5 e 5.6 demonstram, portanto, o PLA “A” e o PLA “B” respectivamente, após o ensaio de tração.

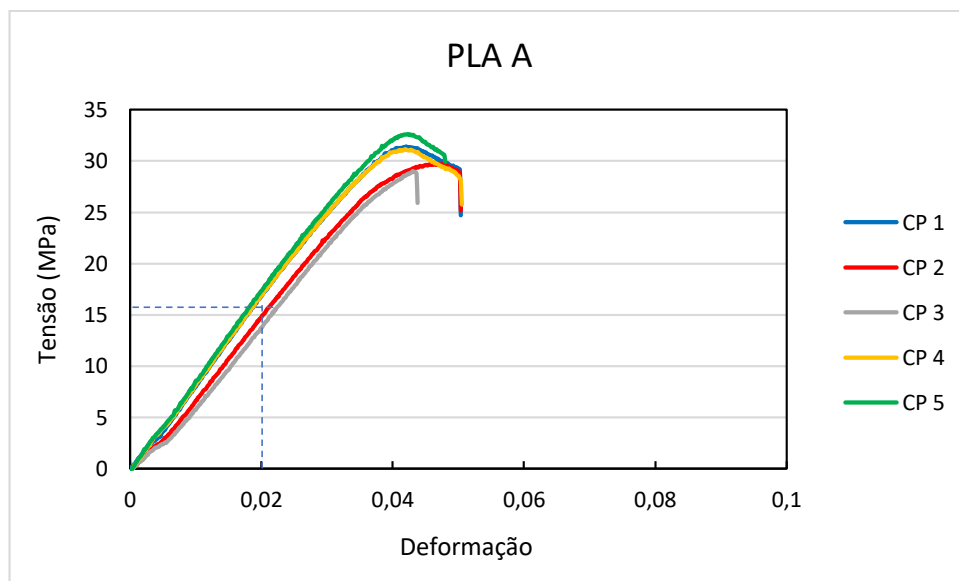


Figura 5.5 Gráfico tensão x deformação - PLA tipo “A”.

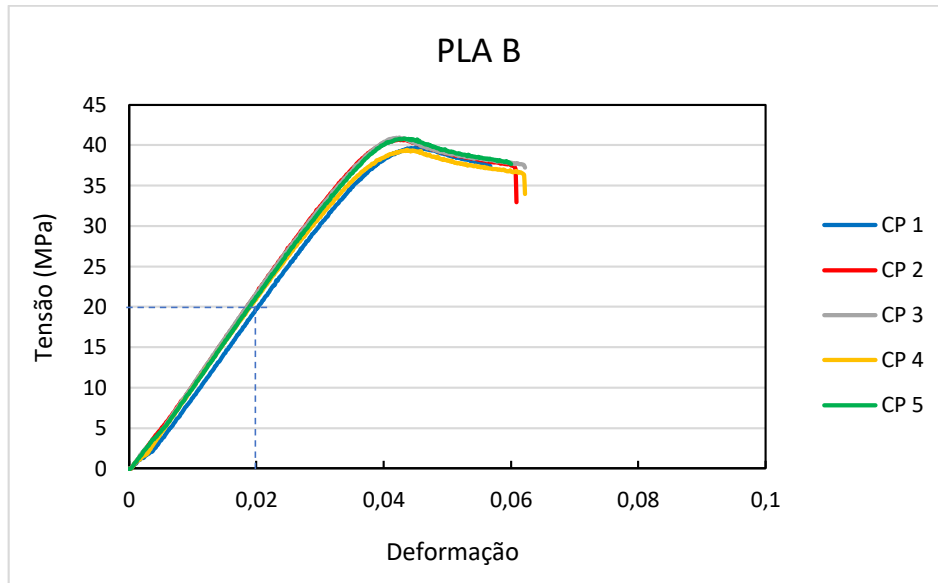


Figura 5.6 Gráfico tensão x deformação - PLA tipo "B".

Analisando ambas as curvas tensão x deformação das Figuras 5.5 e 5.6 é possível perceber que os corpos de prova impressos em PLA com parâmetros de impressão "A" sofrem menor deformação à medida que a tensão aumenta. Percebe-se também que a resistência do PLA "B" é maior, e que após atingir a máxima tensão suportada, há um processo de estricção. De modo geral, os cinco corpos de prova apresentados em cada gráfico demonstram comportamento semelhante, uma vez que foram impressos utilizando as mesmas orientações. Como no caso do ABS, o PLA "B" apresentou módulo de elasticidade ou rigidez maior quando comparado ao tipo "A". A Figura 5.7 mostra curvas características dos quatro gráficos juntos e posicionados de forma estratégica para serem avaliados.

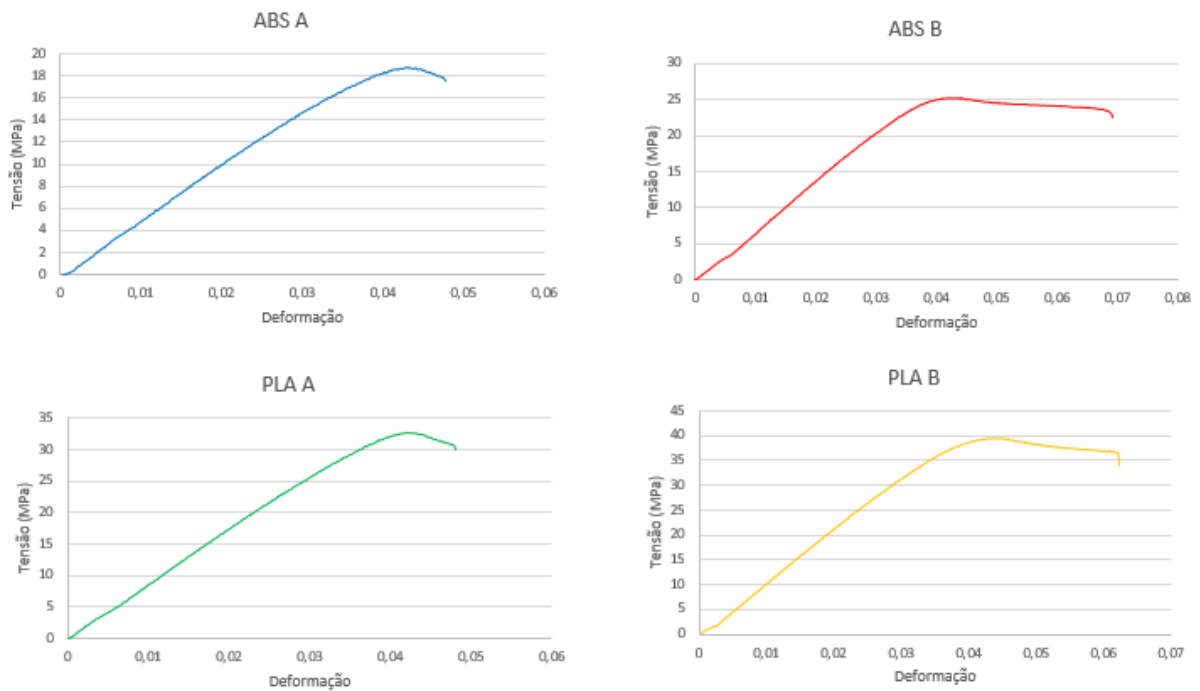


Figura 5.7 Curvas tensão x deformação características dos materiais.

Analisando os gráficos da Figura 5.7, é possível perceber que os materiais impressos com os mesmos parâmetros também mostraram uma curva tensão x deformação semelhante, ainda que o PLA, de forma geral, apresente maiores valores de limite de resistência a tração (LTR) e tensão de ruptura (σ_r) comparado ao ABS, isto está explícito na Figura 5.8. Os parâmetro “B” proporcionou a obtenção de peças com maior ductilidade, que é a propriedade que diz respeito a capacidade do material de se deformar (quando é aplicada uma força).

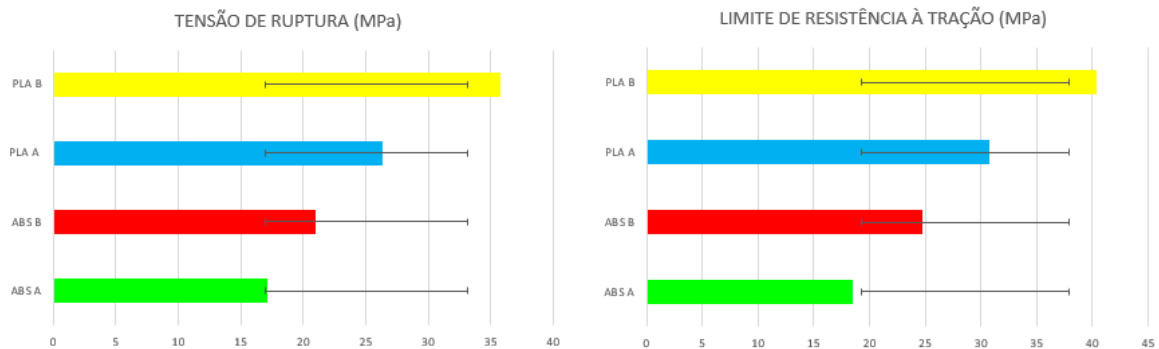


Figura 5.8 Médias das tensões: (a) tensão de ruptura, (b) limite de resistência à tração para o ABS e PLA.

Os gráficos de barras mostram que o ABS “A”, tem o pior desempenho frente a esforços de tração (19 MPa e 17 MPa para limite de resistência a tração e tensão de ruptura, respectivamente). Em contrapartida, o PLA “B”, é a opção mais resistente, apresentando um limite de resistência a tração de 40 MPa e 36 MPa de tensão de ruptura.

Outro dado importante fornecido pelo gráfico tensão x deformação é o limite de escoamento - σ_e (MPa). Quando o escoamento não fica visível na curva, foi convencionado que o procedimento para obter este dado é traçar uma linha paralela à região elástica, a partir de uma deformação específica de 0,2% (ou 0,002 mm de alongamento). Segundo Callister (2000), a tensão de escoamento (MPa) oferece confiabilidade na utilização dos materiais, uma vez que é de extrema importância conhecer o nível de tensão onde a deformação plástica se inicia. A Figura 5.9 mostra como encontrar o ponto de escoamento.

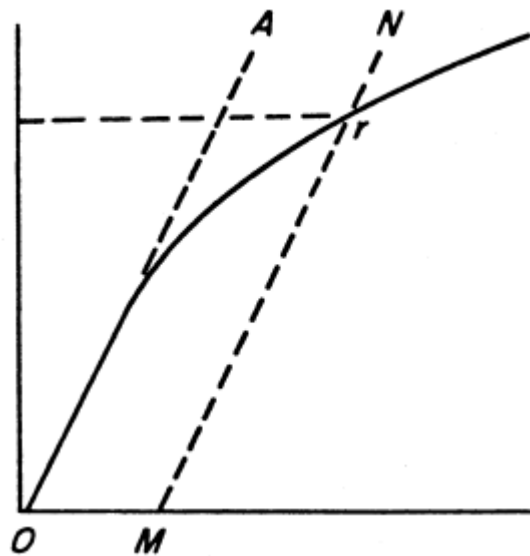


Figura 5.9 Tensão de Escoamento segundo a norma ASTM D 638.

Após traçar a reta na deformação 0,002 (ponto M), é traçada outra linha perpendicular ao eixo x (ponto r), a fim de determinar o valor da tensão de escoamento neste ponto. Este procedimento foi feito para todos os corpos de prova a fim de obter um valor da média, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Comparações da resistência à tração, de escoamento e de ruptura.

	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)
ABS A	19,0	16,0	17,0
ABS B	25,0	24,0	21,0
PLA A	31,0	30,0	27,0
PLA B	40,0	40,0	36,0

Analisando a Tabela 5.1 percebe-se que a tensão de escoamento dos materiais impressos com os parâmetros B é maior, ou seja, o material sofre maiores tensões sem que haja uma deformação irreversível. Ainda sobre o parâmetro B, tem-se a estrição, que resulta numa maior deformação plástica. De forma geral o ABS apresenta mais baixa resistência mecânica, quando comparado ao PLA.

Ainda sobre o gráfico de tensão x deformação, pode-se extrair os valores de deformação de cada material com as variações de parâmetros de impressão. Isto está demonstrado na Figura 5.10.

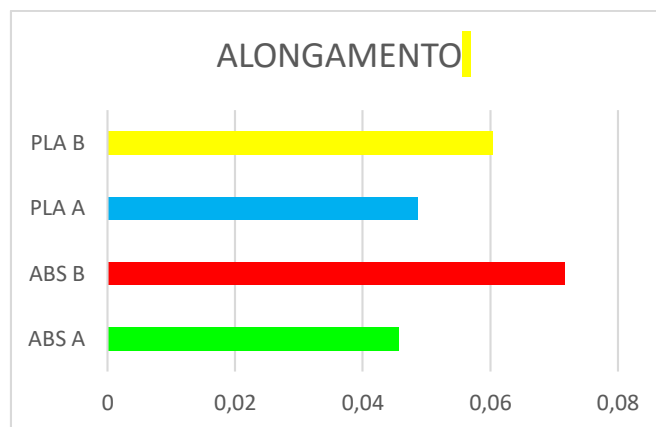


Figura 5.10 Deformação dos materiais.

Os corpos de prova em ABS impresso com os parâmetros estabelecidos em “B” alongaram mais que os demais, aproximadamente 0,072 mm, enquanto que o ABS tipo “A” foi o que menos apresentou alongamento, um total de 0,045 mm. Com esse gráfico do tipo barras é possível perceber a influência dos parâmetros de impressão nos resultados, uma vez que para um mesmo material temos dois extremos, maior e menor deformação.

5.2. Ensaio de Dureza Shore D

As peças para o ensaio de dureza Shore D foram impressas seguindo os parâmetros estabelecidos. Foram impressos 5 corpos de prova de cada material. A fim de assegurar a confiabilidade dos ensaios os corpos de prova foram identificados conforme material e parâmetro, ilustrado na Figura 5.11.

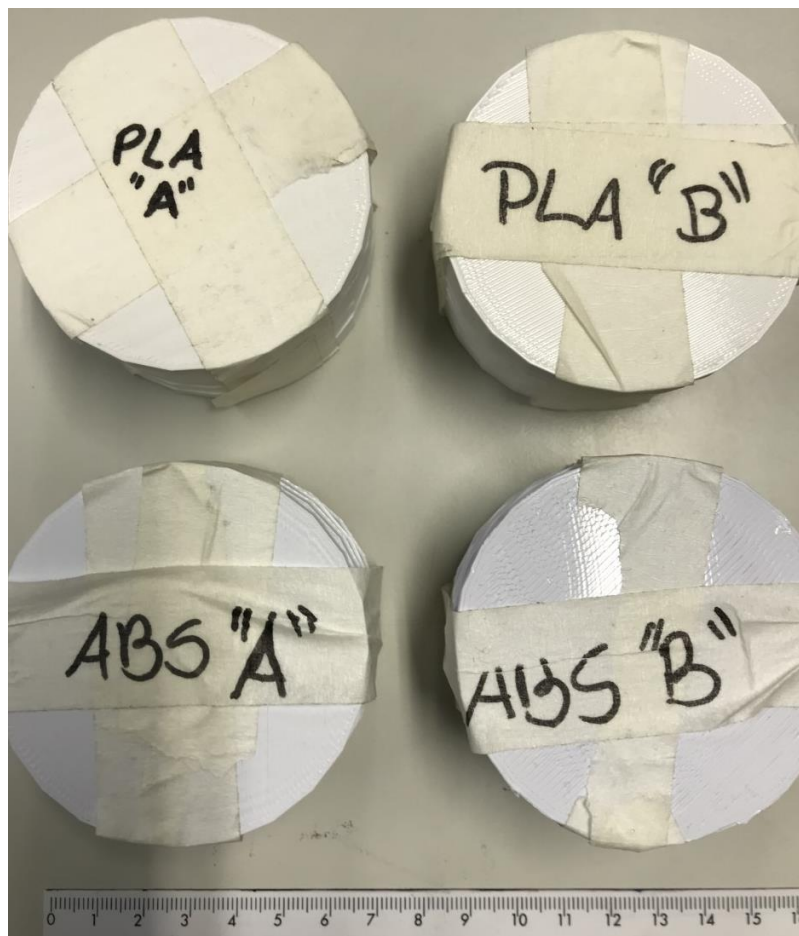


Figura 5.11 Corpos de prova para ensaio de Dureza.

Para as dimensões tem-se 70 mm de diâmetro e 6 mm de espessura. Foram feitas um total de 6 medidas em cada disco, sempre na superfície oposta àquela em contato com a plataforma da impressora. A carga utilizada foi de 5 kg. Os resultados encontrados para as medidas de dureza estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Medidas de dureza shore D.

PLA		ABS	
Parâmetros A	Parâmetros B	Parâmetros A	Parâmetros B
72,7	81,0	35,8	69,8
66,8	82,6	42,7	66,9
70,7	82,7	33,1	68,0
74,8	81,6	36,0	68,8
72,3	80,4	41,9	65,0
71,0	83,5	39,3	67,7

A Tabela 5.2 mostra os valores de dureza para cada material variando os parâmetros. O PLA com suas duas variações demonstrou ser mais duro que os demais, enquanto que o ABS A demonstrou valores indicando menor dureza, uma vez que a escala vai de 0 -100, sendo o maior, para maiores durezas.

Constataram-se valores de dureza discrepantes, como é o caso da terceira medida do ABS A que resultou em 33,1 Shore D. Este valor discrepante pode ser explicado pelo próprio momento em que os corpos de prova são impressos. Uma vez que o FDM (processo aqui utilizado) é realizado através da fusão e deposição dos filamentos e a viscosidade do termoplástico impede o preenchimento completo da amostra. Para Carneiro *et al*, (2019), para reduzir este efeito, uma alternativa é aumentar a temperatura do bico extrusor, diminuindo a viscosidade e resultando em camadas mais preenchidas.

Na sequência tem-se um gráfico de colunas representado pela Figura 5.12 que mostra a média das durezas de todos os corpos de prova impressos e ensaiados.

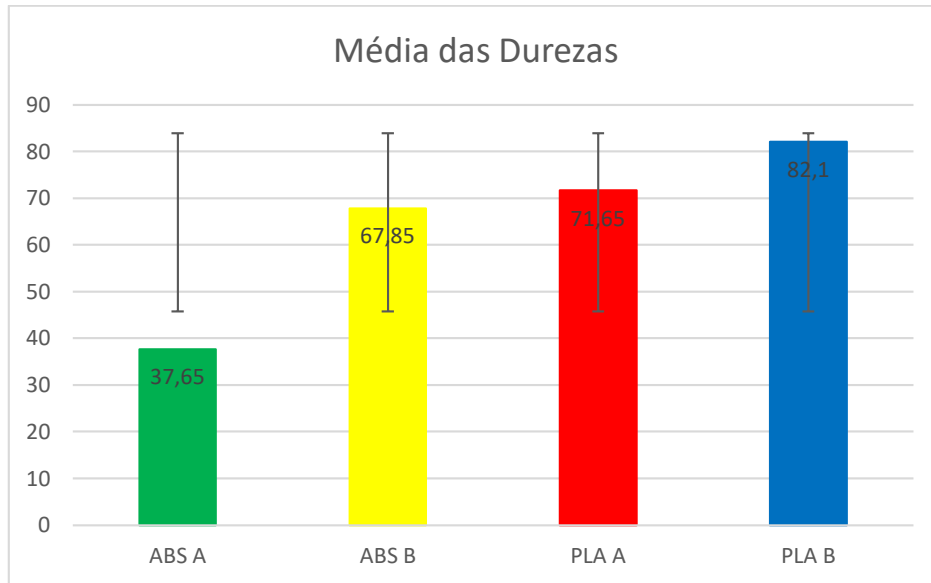


Figura 5.12 Médias das durezas shore D.

O gráfico de colunas representando as médias das durezas, repete o que foi anteriormente mostrado na Figura 5.8 (média das tensões), uma vez o PLA, com os parâmetros classificados como “B” foi o material que suportou maiores tensões (maior resistência à tração) e manteve seu desempenho no ensaio abordado neste tópico. Da mesma forma o material que menos suportou tensões, o ABS impresso com os parâmetros descritos em “A”, também foi o material com menor dureza. A dureza representa a resistência do material à deformação plástica localizada na sua superfície, por isso os resultados coincidem com os resultados obtidos pelo ensaio de tração.

5.3. Ensaio de Impacto

Para o ensaio de impacto tipo Izod, foram confeccionados 5 corpos de prova de cada material, utilizando a classificação dos parâmetros “A” e “B”, de modo a totalizar 20 amostras. Para que não houvesse confusão após o impacto (uma vez que o esperado seja que as peças se partem), as duas extremidades das peças foram devidamente nomeadas com o material e o parâmetro que ele foi impresso, isto está descrito na Figura 5.13.



Figura 5.13 Corpos de prova para o ensaio de Impacto.

Os ensaios de Impacto Izod foram realizados no Lapol – Laboratório de Materiais Poliméricos da UFRGS, localizado no Campus do Vale, utilizando o equipamento Impact Izod machine CEAST Impactor II e pêndulo de 2,75 J de acordo com a norma ASTM D 256. De acordo com a própria norma, os resultados dos ensaios de impacto Izod em polímeros, são relatados em forma de energia por unidade de espessura ou de energia por unidade de área, como é o caso dos dados mostrados na Figura 5.14.

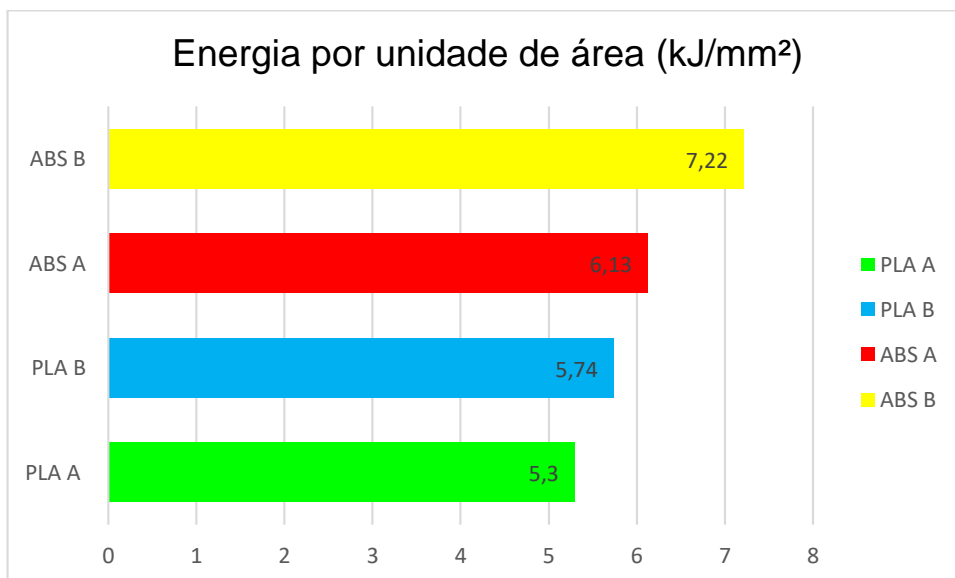


Figura 5.14 Gráfico com dados de energia absorvida no impacto.

A partir da Figura 5.14 percebe-se que o material ABS absorve mais energia que o PLA, isso significa que ele precisa de mais energia para se romper. Quanto menor a energia absorvida, mais frágil o material. Em relação aos parâmetros pode-se destacar que o parâmetro “A” torna o material impresso mais frágil, enquanto que o “B” faz com que o mesmo tenha uma característica mais dúctil, esta afirmação pode ser confirmada pela Figura 5.7, que traz os dados do ensaio de tração em forma de curva tensão x deformação. Claramente nos gráficos pode-se ver o comportamento menos e mais tenaz, quando o mesmo é impresso pelos parâmetros “A” e “B”.

O ensaio de impacto condiz com o que o autor Ferreira *et al.*, (1997) destaca: que o ABS é um polímero com grande resistência ao impacto, e também condiz com a Figura 3.16, de Alkaios (2017), que aborda o perfil do ABS.

5.4. Discussões

As pesquisas encontradas na literatura enaltecem o resultado de corpos de prova impressos com deposição de filamentos em 0° , mas, quando comparado aos resultados aqui apresentados, as peças impressas em $0^\circ/90^\circ$ tiveram um resultado inferior nas tensões que a alternância de $45^\circ/-45^\circ$. Inicialmente optou-se por essas variações exatamente porque conferem ao material mais resistência do que a deposição do filamento em uma orientação única. A Figura 5.15 mostra a deposição de filamentos desta pesquisa, a primeira imagem representa como foi a impressão do corpo de prova do parâmetro A e a segunda imagem a impressão utilizando os parâmetros tipo B.

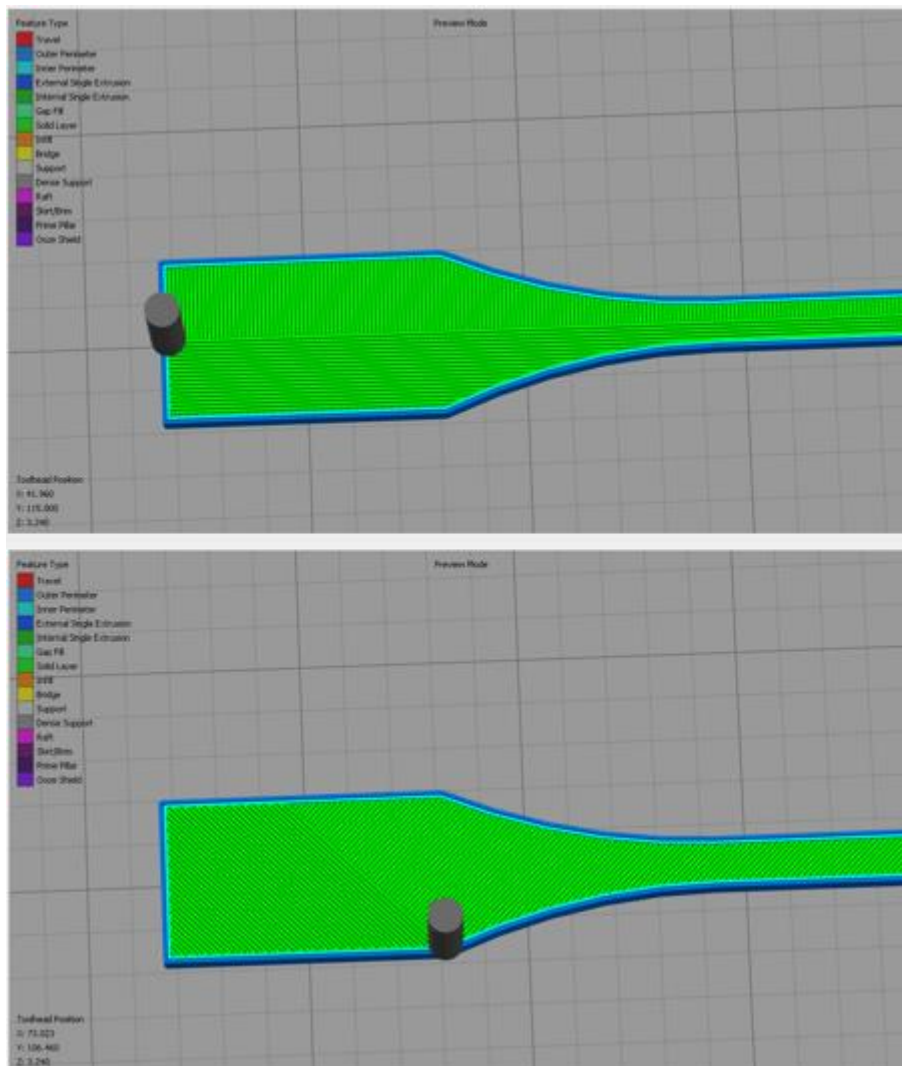


Figura 5.15 Deposição de filamentos em $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$.

Para o parâmetro de orientação de preenchimento foi elaborado um fluxograma, este demonstrado na Figura 5.16, para trazer informações resumidas sobre este parâmetro, sua relação com as propriedades mecânicas e o que os autores encontraram sobre este mesmo assunto.

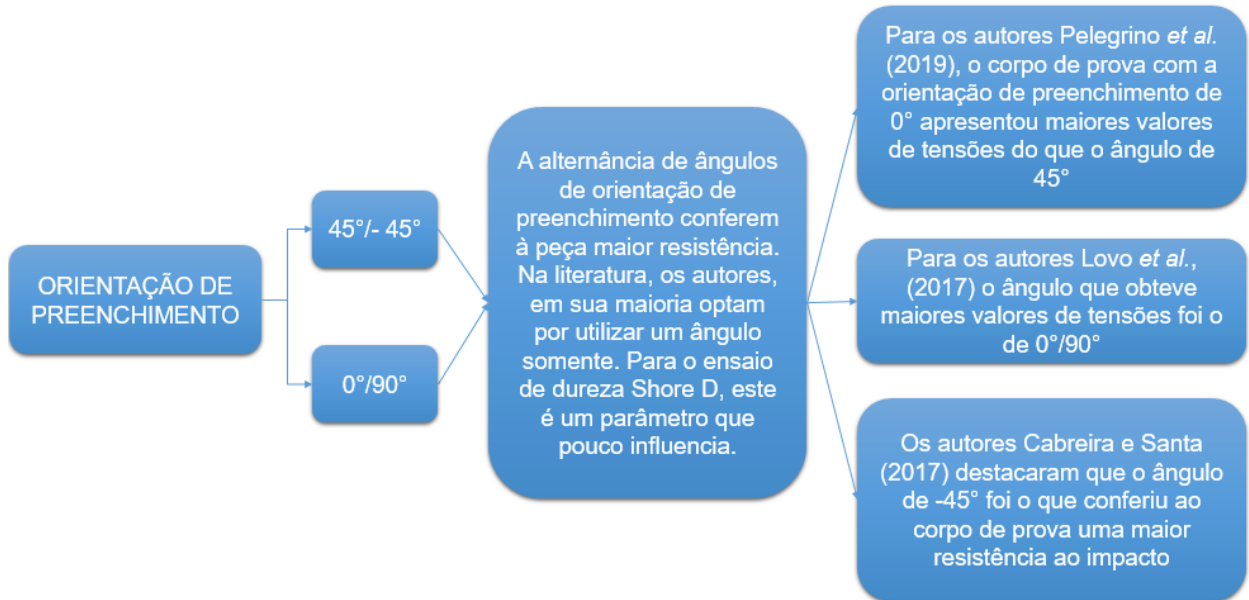


Figura 5.16 Fluxograma com informações sobre o parâmetro orientação de preenchimento.

As variações de parâmetros de densidade desta pesquisa foram de 10% e 30%, e foram de tamanha importância para os resultados no ensaio de tração, uma vez que a taxa menor conferiu aos materiais resistências às tensões mais baixas e menores deformações. Esta afirmação está de acordo com o que foi encontrado e anteriormente descrito no item 3.6. A Figura 5.17 representa as densidades de preenchimentos.

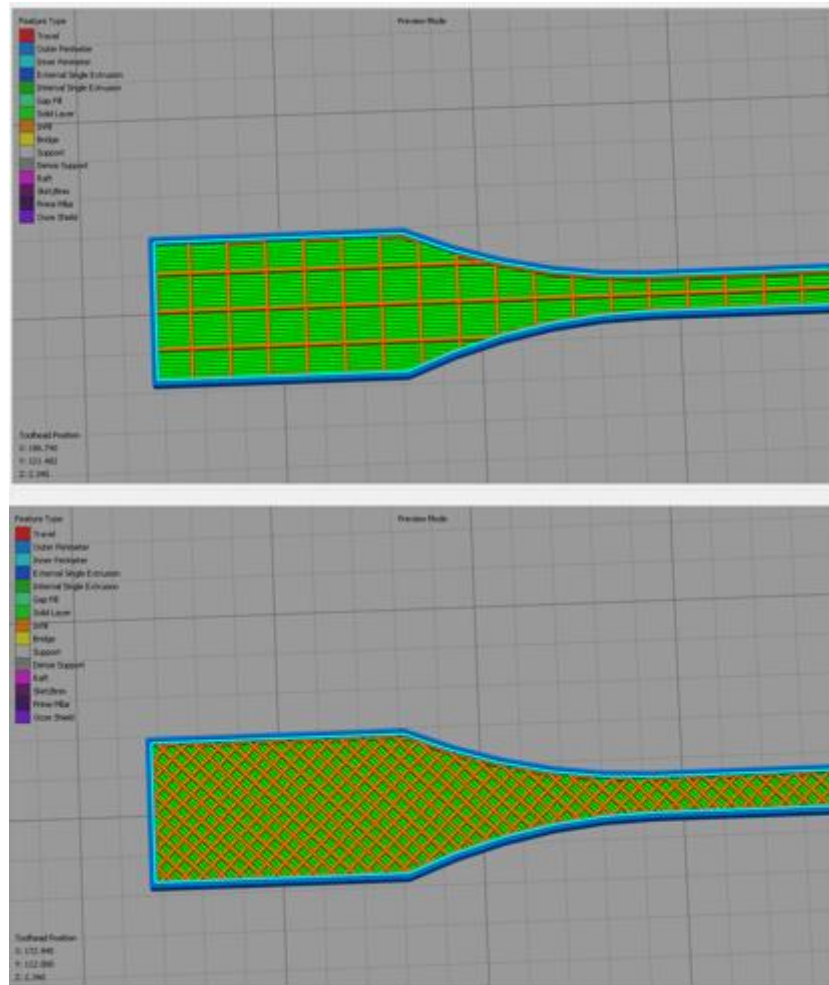


Figura 5.17 Densidades de preenchimento para os parâmetros A e B, respectivamente.

Ainda sobre a densidade de preenchimento, foi perceptível como ela é importante nos resultados finais de propriedades mecânicas, sendo bem presente nos materiais encontrados sobre variações de parâmetros nos corpos de prova para ensaios de tração e impacto. A Figura 5.18 mostra um fluxograma com informações deste parâmetro.

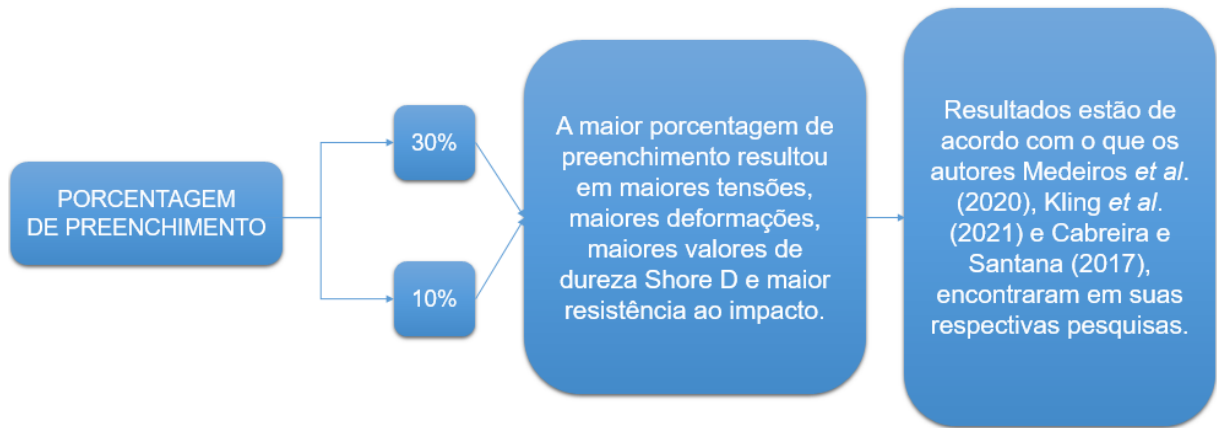


Figura 5.18 Fluxograma com informações do parâmetro de porcentagem de preenchimento.

Analisando exclusivamente o ensaio de impacto Izod dos autores Cabreira e Santana (2017), descrito no item 3.6, pode-se afirmar que a utilização de metade do preenchimento não necessariamente resulta na metade da energia absorvida pelos corpos de prova. Já que os autores variaram de 100% e 50% e não tiveram resultados proporcionais.

De forma geral, é possível destacar os parâmetros de impressão como grandes agentes capazes de alterar o desempenho mecânico dos materiais. Estes são capazes de potencializar e/ou minimizar, tensões e deformações, a fim de dar ao material as características pretendidas para determinadas demandas.

A Figura 5.19 demonstra um fluxograma para o parâmetro de espessura da camada. No presente estudo foi utilizado a variância de 0,10 mm e 0,30 mm.

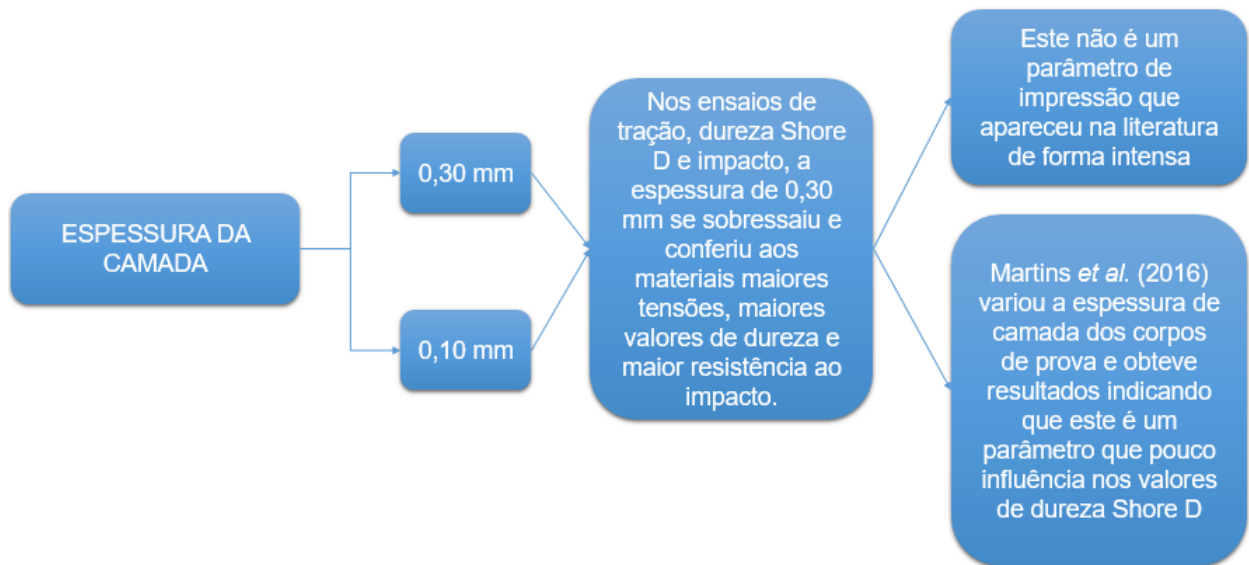


Figura 5.19 Fluxograma com informações sobre o parâmetro de espessura de camada.

Conforme o autor Araujo (2016), o parâmetro de velocidade de impressão tem mais influência na qualidade visual da peça, o tempo em que a impressão é realizado e sua resistência final. Na literatura, é um parâmetro que não é tão escolhido para variar em prol de obter resultados diferentes de resistência.

Para finalizar as discussões, tem-se um fluxograma abordando o resultado geral dos materiais ABS e PLA frente aos ensaios realizados nesta pesquisa. Os ensaios de tração, dureza Shore D e impacto tiveram valores distintos para cada material. A descrição teórica destes resultados estão descritos na Figura 5.20 (a) e (b).

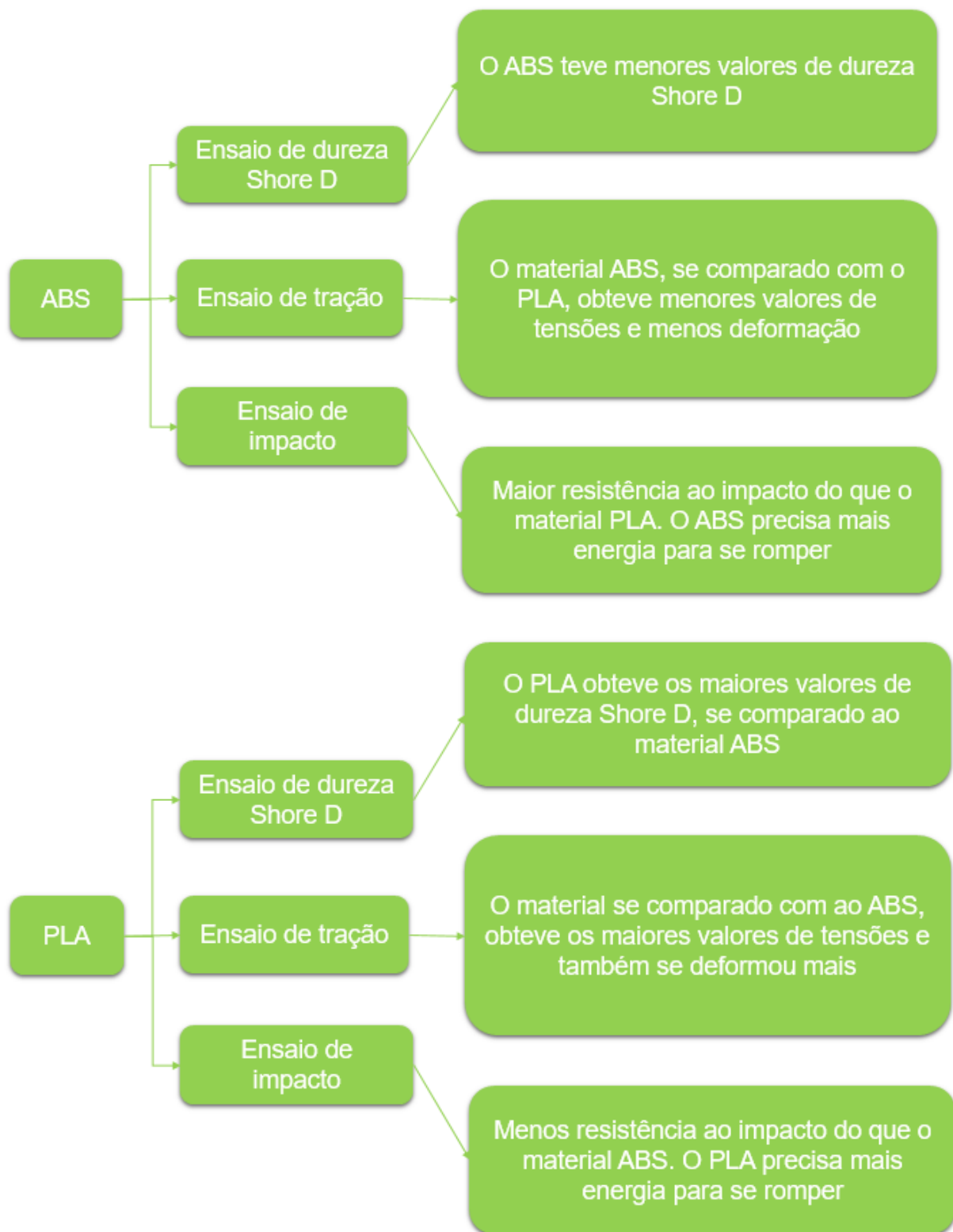


Figura 5.20 Fluxograma com os resultados gerais dos materiais (a) ABS (b) PLA.

6. CONCLUSÕES

O uso das impressoras 3D cresceu consideravelmente nos últimos anos, principalmente a técnica utilizada neste trabalho, a FDM – *Fused Deposition Modeling*. Com esta popularidade o que era apenas prototipagem rápida, tornou-se produção de componentes e peças com real utilidade. Por isso, o estudo dos parâmetros se mostra importante e crucial para entender o desempenho do que quer que seja impresso, quando submetidos a forças externas.

De modo geral, o PLA impresso com os parâmetros “B” mostrou mais maiores valores de tensões. O limite de resistência a tração, limite de escoamento e tensão de ruptura foram de, respectivamente, 40 MPa, 40 MPa e 36 MPa. Também para o ensaio de dureza Shore D, o PLA “B”, produziu valores maiores de dureza. Para o ensaio de impacto Izod, o destaque ficou com o ABS “B” que necessitou mais energia para sua ruptura. A partir dessas constatações e, analisando individualmente o parâmetro “B” ele forneceu aos materiais maiores valores de tensões, maiores valores de dureza e maior resistência ao impacto.

Pode-se ainda traçar uma relação dos parâmetros escolhidos com o desempenho individual de cada material. Pois os 4 parâmetros selecionados para o “A” tornaram tanto o ABS como o PLA, mais frágil, com pouca estrição, menor deformação e menos energia absorvida no impacto. Em contrapartida, a variação dos parâmetros selecionados para o tipo “B”, tornaram ambos os materiais mais dúcteis, com maior estrição e necessitando de mais energia para o impacto.

Ao trazer as análises do que já havia na literatura sobre ABS, PLA, propriedades mecânicas e parâmetros de impressão, nota-se uma lacuna quanto a pesquisas que abordem mais de um material e mais de um parâmetro variado, este foi inicialmente pontuado como o problema de pesquisa. Ainda que as variáveis sejam consideráveis nesse estudo, uma vez que se tem dois materiais e 8 tipos de parâmetros diferentes no total, os resultados foram bastante esclarecedores, quanto a diferentes possibilidades que o estudo dos parâmetros fornece.

É importante ressaltar que para determinar um parâmetro como mais influente ou menos influente nos resultados de propriedades mecânicas, o mesmo teria que ser avaliado de forma individual. No momento que criamos dois grupos de parâmetros “A” e “B”, tem se o resultado baseado nos resultados dos parâmetros de forma geral e não específica, o que acaba tornando as comparações com outros trabalhos encontrados na literatura mais complexas.

Por fim, destaca-se que para um resultado ser considerado bom ou ruim, é preciso avaliar qual será a finalidade da peça, para enfim definir os parâmetros e então validá-los como positivos ou negativos. Como conclusão desta pesquisa, os objetivos específicos foram todos alcançados.

7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros tem-se algumas opções que foram surgindo à medida que foi se aprofundando o tema de estudo:

- Avaliar a influência de outros parâmetros de impressão e de material;
- Utilizar os mesmos parâmetros investigados neste trabalho, variando os ranges para cada um;
- Avaliar o desempenho de diferentes materiais e parâmetros de impressão em condições de desgaste cíclico e por deslizamento;
- Analisar as superfícies de fratura com auxílio de MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)

REFERÊNCIAS

ABRE – Associação Brasileira de Embalagem. 2019. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/ano2019/>>. Acesso em: 15 agosto 2022.

ALBURQUERQUE, A.J. **Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas**. 2014. Vol. 65, pag. 24-38.

ALKAIOS, Bournias. **Introduction to FDM 3D printing**. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>>. Acesso em: 10 março 2021.

ALL3DP. 3D Slicer Settings for Beginners – 8 Things You Need to Know. 2019. Disponível em: <<https://m.all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>>. Acesso em: 14 de julho 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2240** - Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D256** - Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638** - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

ARAUJO, Gabriel Gazetta de. **A Impressão 3D e os Parâmetros que Influenciam o Produto Final**. 2016. 62 f. Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2016.

AZEVEDO, Fábio Mariotto. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. São Carlos, 2013. 48p. Universidade de São Paulo, Brasil.

Bai, X.; Wu, J.; Liu, Y.; Xu, Y.; Yang D. Exploring the characteristics of 3D printing global industry chain and value chain innovation network. 2020. Disponível em <<https://doi.org/10.1177/0266666919884348>>.

BARNATT, Christopher. **3D Printing: Second Edition**. Inglaterra: Explainingthefuture.com, 2014.

BOLELLI, Raquel Meirelles; LEBRÃO Guilherme Wolf. **Avaliação das Propriedades de Material Poduzido por FDM em Impressora 3D**. 2019. 10p. Instituto Mauá de Tecnologia, Brasil.

BRADSHAW, Simon; BOWYER, Adrian; HAUFE, Patrick. The Intellectual Property Implications of Low-Cost 3D Printing. **ScriptEd**, v. 7, n. 1, pp. 5-31, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.2966/scrip.070110.5>>. Acesso em: 03 março 2021.

BRITO, G.F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO E.M.; MELO, T. J. A. de. **Tenacificação do Poli (Ácido Lático) pela Adição do Terpolímero (Etileno/Acrilato de Metila/Metacrilato de Glicidila)**. Polímeros, 2012.

CABREIRA, Vinicius. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido lático**. Porto Alegre. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

CABREIRA, Vinicius; SANTANA, Ruth. Comparação das Propriedades de Peças de PLA Moldadas por Injeção e FDM. In: **XXIV Congresso Brasileiro de Polímeros, 2017**.

CARNEIRO, L.; *et al.* Influência da temperatura da mesa de impressão 3d na dureza e dimensões geométricas de amostras em abs. In: **XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2019**.

CARNEIRO, Luiz; BARBAR, George; SANTOS, Lara; GUARATO, Alexandre. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA MESA DE IMPRESSÃO 3D NA DUREZA E**

DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DE AMOSTRAS EM ABS.

10.26678/ABCM.CREEM2019.CRE2019-0046. 2019.

CARUSO, Juliana. Gutierrez. **Desenvolvimento numérico-experimental de corpos de prova aplicáveis a ensaios de tração, compressão e torção de polímeros**. 2015. 170 f. Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2015.

CASAGRANDE, Tiago. **Influência da pigmentação no ácido polilático (PLA) em peças obtidas pelo processo de modelagem por fusão e deposição (FDM)**. 2018. Universidade Federal de Santa Catarina.

Celentano CGJTD. "Caracterización mecánica de materiales termoplásticos de uso en componentes de refrigeradores". In: **3º Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales**. Argentina, p. 298-301, 2003.

CORREA, Carlos; YAMAKAWA, Roberto; JR, Elias Hage. Determinação de Temperatura de Transição Dúctil-frágil de Plásticos Através de Testes de Impacto Instrumentado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, p. 76–84, 1999.

CROWFORD, R. J. **Plastics Engineering**. 3. ed. Oxford: Elsevier Science, 1998. 505p.

CUMMINS, Kate. The Engineer. 2010. Disponível em: <<http://www.theengineer.co.uk/the-rise-of-additive-manufacturing/>>. Acesso em: 20 março 2021.

DIZON, John Ryan C. *et al.* Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**. 2018. [s.l.], Elsevier BV. v. 20, p. 44-67.

FERNANDES, João Francisco Miranda. **Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA**. Lisboa. 2016. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Técnico Lisboa, Portugal.

FERREIRA, Fyllipe Felix. **Estudo e desenvolvimento de filamento de PET reciclado para impressoras 3D FDM**. 84 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

FERREIRA, L. A. S.; PESSAN, L. A.; HAGE JR, E. Comportamento mecânico e termomecânico de blendas poliméricas PBT/ABS. *Polímeros* [online], v. 19, n. 3, p. 67-72, 1997.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos dos. **Ensaaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GARCIA, Luis Hilário Tobler. **Desenvolvimento e Fabricação de uma mini-empresa 3D para cerâmicas**. São Carlos. 2010. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, Brasil.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer 2010.

Gil, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2022

GONZALEZ, Sergio Gomez. **Impresión 3D**. 1 ed. Marcombo: 2016.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução à Prototipagem Rápida e Seus Processos. **Plástico Industrial**, 230-239, 2001.

GUACHAMBALA, Miguel; CARRIÓN, Javier; QUINTANILLA, Mesías. **Evaluación de la capacidad de absorción de energía de impacto y dureza en probetas impresas en 3D de PLA y ABS con estructura cúbica y tri hexagonal**. *ConcienciaDigital*. 3. 17-33. 10.33262/concienciadigital.v3i2.1204, 2020.

HEINZL, J; HERTZ, C.H. Ink-Jet printing. **Advances in Electronics and Electron Physics**, v.65, p. 91-171, 1985.

HOTZA Dechamir. Prototipagem rápida de Pilhas a Combustível de Óxido Sólido. **Revista Matéria**, v. 14, n. 4, pp. 1101 – 1113, 2009.

HUNT, Emily *et al.* Polymer Recycling Codes for Distributed Manufacturing with 3-D printers. **Resources, Conservation and Recycling**, v.97, p. 24-30, 2015.

JESUS, Marco Sousa. **Desenvolvimento de um compósito polímero-metal à base de resina epóxi para aplicações em moldes rápidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Florianópolis. 2005. 102p. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

KLING, Marcus Vinicius Machado, *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas em diferentes combinações de parâmetros de manufatura aditiva. 2021. **In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**.

KUHN, Renato; MINUZZI, Reinilda de Fátima. Panorama da Impressão 3D no Design de Moda. **In: 5º Seminário Moda Documenta/ 2º Congresso Internacional de Memória, Design e Moda**. São Paulo, 2015.

LINO, Vinícius Martins. **Impressão 3D**. Rio de Janeiro. 2014. 36p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

LIOU, Frank. **Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development**. Missouri: Taylor & Francis (CRC Press), 2007.

LIPSON, Hod; KURMAN, Melba. **Fabricated: The New World of 3D Printing**. Indianápolis: John Wiley & Sons, 2013.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. 2016. Disponível em: <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>>. Acesso em: 22 março 2021.

LOVO, João Fiore Parreira e FORTULAN, Carlos Alberto. **Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM**. 2017, Anais.. São Carlos, SP: EESC-USP, 2017.

MACEDO, Graciela Marcela Almeida. A Utilização de Tecnologias de Prototipagem Rápida no processo de Desenvolvimento de Produto: Um Estudo de Caso. In: **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. 2011.

MARTINS, D. *et al.* Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba abs confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3d. **En: Revista Iberoamericana de Polímeros**, 16(6), 303-309, 2016.

Marwah, OM; Shukri, MS; Mohamad, EJ; Johar, MA; Haq, RH; Khirotadin, RK. Direct investment casting for pattern developed by desktop 3D printer. **Matec Web of Conferences** 135. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/mateconf/201713500036>>.

Masood, SH; Song, WQ. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling. **Materials and Design** 25(7):587-594. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.009>.

MEDEIROS, Magno *et al.* (2020). Influência da Densidade de Preenchimento e do Número de Perímetros nas Propriedades Mecânicas de Peças Fabricadas em PLA a Partir de Impressão 3D. **CALIBRE - Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada**. 5. 33. 10.17648/calibre.v5.1478.

Medellin Castillo, HI; Zaragoza Siqueiros, J. Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 32. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s10033-019-0368-0>>.

MODEEN, Thomas. CADCAMing. The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture. **Automation in Construction**, v. 14, p. 215-224, 2005.

PELEGRINO, Andréia Neumann; *et al.* Comparação de direção de impressão 3d em abs e pla produzidos pelo método FDM. Memorial TCC – Caderno da Graduação – 2019. v. 5, n. 1, 2019.

Rajan, K.; Samykano, M.; Kadirgama, K.; Harun, W.S.W.; Rahman, M.M. Fused Deposition Modeling: Process, Materials, Parameters, Properties, and Applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 120(4). 2022. 120, 1531–1570. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08860-7>>.

SALINAS, Richard. **3D Printing with RepRap Cookbook**. Birmingham: Packt Publishing, 2014.

Santos, Frank. **Futuras Tecnologias Aplicadas à Arquitetura: Do Digital para o Material**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). 2018. 104p. Universidade de Coimbra, Portugal.

SILVA, Pedro; *et al.* IMPRESSÃO 3D: UM GUIA PRÁTICO/3D PRINTING: A PRACTICAL GUIDE. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 84478-84493, 2020.

SILVA, Ruthilene Catarina Lima da. **Desgaste de polímeros estruturais de engenharia em contato de deslizamento com cilindro metálico**. 2010. 183 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SIMPLIFY3D. Print Quality Troubleshooting Guide. 2019. Disponível em: <<https://www.simplify3d.com/software/features/>> Acesso em: 14 de Set. de 2021.

SOOD, A.K.; OHDAR, R.K.; MAHAPATRA, S.S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. **Journal of Advanced Research**, v. 3, n. 1, p. 81-90, 2011.

Subramaniam, SR; *et al.* 3D printing: overview of PLA progress. 2019 **AIP Conference Proceedings** 2059. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5085958>>.

TAKAGAKI, Luiz Koiti. Tecnologia de Impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, v. 2, n. 2, p. 28 - 40, 2012.

THRE3D. 3D Printing, Simplified. 2014. Disponível em: <<https://thre3d.com/>>. Acesso em: 17 abril 2021.

TOFFOLI, Henrique Tirolli. **Projeto, Melhoria e construção de uma máquina de prototipagem rápida: "Impressora 3D"**. Maringá. 2018. 40p. Trabalho de Final de Curso (Graduação em Engenharia em Controle e Automação). Faculdade Unicesumar, Brasil.

TUT, V. *et al.* Application of CAD/CAM/FEA, reverse engineering and rapid prototyping in manufacturing industry. **International Journal of Mechanics**, v. 4, n. 4, pp. 79-86, 2010.

UNWIN, J.; *et al.* Airborne emissions of carcinogens and respiratory sensitizers during thermal processing of plastics. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 57, p. 399-406, 2013.

VENTOLA, C Lee. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. **P&T**, v. 39, n. 10, p. 704- 711, out, 2014.

VOLPATO, Neri. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Blücher, 2007.

Vyavahare, S; Teraiya, S; Panghal, D; Kumar S. Fused deposition modelling: a review. **Rapid Prototyp.** 2020 J 26(1):176–201. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>>.

ZIEMAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMAN, S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling, **IntechOpen**, USA. 2012.159-180.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br