

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LEONARDO THIESEN BAUM

**DETERMINAÇÃO DO IMPACTO DO RESFRIAMENTO FORÇADO NA
ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA MANUFATURA ADITIVA**

São Leopoldo

2021

LEONARDO THIESEN BAUM

**DETERMINAÇÃO DO IMPACTO DO RESFRIAMENTO FORÇADO NA
ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, pelo Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti

São Leopoldo

2021

Dedico este trabalho aos meus pais, que graças ao constante apoio e ensinamentos me possibilitaram completar essa etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Daniela e Marcelo, que me incentivaram e apoiaram durante toda a graduação.

Agradeço a minha namorada, Yzadora, pelo apoio, motivação e ajuda para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a minha orientadora, Dra. Jacqueline Biancon Copetti, pelo apoio e mentoria, que permitiram que esse trabalho acontecesse.

Agradeço ao responsável pelo laboratório de ensaios mecânicos, Éder, que mesmo em um momento tão adverso prestou apoio e realizou os ensaios práticos.

“Superhuman effort isn't worth a damn unless it achieves results.”

— Ernest H. Shackleton

RESUMO

Com o uso cada vez mais difundido da fabricação por manufatura aditiva, é essencial ter total compreensão das propriedades mecânicas finais das peças fabricadas. De protótipos a partes funcionais, está se experienciando uma mudança no estilo de produção, a popularmente conhecida “Impressora 3D” vem adentrando indústrias e mudando conceitos enraizados. A manufatura aditiva oferece grandes vantagens para segmentos como a aviação, onde projetos duram décadas e o peso de um componente influencia diretamente na eficiência da aeronave. A possibilidade de produzir formas orgânicas com facilidade e de manter uma política de estoques zeros, guardando os arquivos das peças e uma impressora 3D funcionando, que produzirá peças sob demanda, é extremamente atrativa para esse segmento. Um dos componentes chave e presentes em praticamente todas as impressoras 3D, é o cooler de resfriamento da extrusão de material, que ajuda a garantir a acurácia dimensional, assim como melhorar o acabamento da peça, porém ele pode acabar impactando nas propriedades mecânicas da peça final. O estudo foi realizado com corpos de prova em PLA e PETG fabricados de acordo com a ASTM D636. Para cada grupo de corpos de prova, foi alterada a velocidade do cooler de resfriamento e foram realizados ensaios de tração para obter as propriedades mecânicas das peças produzidas. Foi possível determinar a diferença na tensão de ruptura das camadas nos corpos de prova e traçar curvas de velocidade do *cooler* vs tensão de escoamento. Por fim, foi testado se o comportamento se repete para matérias primas de outro fabricante. O impacto na adesão entre camadas chegou a ser superior a 40%, se comparado aos corpos de prova impressos com o *cooler* desligado e com o *cooler* na velocidade máxima. Esse resultado mostra que para peças fabricadas com o intuito de resistirem a tensões, o ideal é que se utilize o *cooler* de resfriamento desligado durante a impressão.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, adesão de camadas, parâmetros de processo, tensão de escoamento, impressão 3D.

ABSTRACT

With the increasingly widespread use of additive manufacturing, it is essential to have a full understanding of the final mechanical properties of the manufactured parts in order to obtain the full advantages of this technology. From prototypes to functional parts, we are experiencing a shift of the production style, the popularly called “3D Printer” is taking over industries and changing long-lasting concepts. Additive manufacturing offers a big advantage to segments like aviation, where projects last for decades and the weight of a part directly influences the performance of the plane. The possibility to produce organic shapes with ease and to maintain zero stock police, keeping the files and the 3D Printer ready to produce a part on demand, is extremely attractive to this segment. One of the key components present in practically all 3D printers is the material extrusion cooler, which helps to ensure dimensional accuracy as well as improving the finish aspect of the part, but it may end up impacting the mechanical properties of the final part. The study was carried out by making specimens, according to ASTM D636, in PLA and PETG and changing the rate of the cooler for each specimen. With the performance of tensile strength tests, the difference in the yield strength in the area where two layers bond together was determined. With the results, a graphic was elaborated showing the correlation between the cooler speed vs the yield strength. Finally, it was tested whether the behavior is repeated when utilizing materials from another manufacturer. The impact in the yield strength in the bond between layers suffered a reduction greater than 40%, when compared to printed specimens with the cooler turned off. This finding shows that for parts manufactured in order to resist stresses, the best practice is to use the cooler turned off during printing.

Keywords: Additive Manufacture, interlayer adhesion, process parameters, yield strength, 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dobradiça do AirBus A320	15
Figura 2 - Exemplos da resolução de camada em um objeto.....	19
Figura 3 - Sistema de extrusão de uma impressora 3D FDM	20
Figura 4 - Funcionamento de uma impressora 3D SLA	22
Figura 5 - Exemplo de peça sendo fabricada onde toda a lateral direita da peça é uma região de <i>over-hang</i>	25
Figura 6 - Exemplo de tensão residual térmica nula	26
Figura 7 - Demonstração do espaço em vazio ao longo das camadas de uma impressão 3D	27
Figura 8 - Diagrama tensão vs deformação	28
Figura 9 - Diagrama tensão vs deformação para PLA	28
Figura 10 - Diagrama tensão vs deformação para PETG	29
Figura 11 - Exemplo de um dispositivo de ensaio de tração	29
Figura 12 - Geometria para o corpo de prova de ensaio de tração segundo ASTM: a) tipos I, II, III e V; b) Tipo IV	31
Figura 13 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	32
Figura 14 - Propriedades mecânicas do PLA da Slim 3D segundo o fabricante	34
Figura 15 - Impressora 3D utilizada na fabricação dos corpos de prova.....	35
Figura 16 - Placa SKR 1.4 Turbo e Drivers TMC 2209	36
Figura 17 - Barras estabilizadoras do eixo Z.....	36
Figura 18 - Amortecedores dos acoplamentos dos motores dos eixos X e Y	37
Figura 19 - Modelo do cubo de teste	38
Figura 20 - Modelo da torre de temperatura.....	40
Figura 21 - Projeto do corpo de prova no Solidworks.....	41
Figura 22 - Teste de impressão com espessura de 3,2 mm	42
Figura 23 - Técnicas de <i>raft</i> e <i>skirt</i> para melhorar adesão da impressão na mesa aquecida.....	43
Figura 24 – Tentativas de imprimir o corpo de prova com 3,2 mm de espessura	43
Figura 25 – Falha no terceiro corpo de prova de teste.....	44
Figura 26 – Fabricação de um dos corpos de prova	45
Figura 27 - Cubo de teste impresso em PETG.....	45
Figura 28 - Cubo de teste impresso em PLA.....	46

Figura 29 – Torre de temperatura para PETG.....	46
Figura 30 - Torre de temperatura para PLA	47
Figura 31 - Exemplo do corpo de prova com preenchimento configurado em 100%	49
Figura 32 - Resultado da configuração de um número de camadas de base superior ao total de camadas da peça	49
Figura 33 – Alguns dos corpos de prova do ensaio de tração para PLA 3D Fila	52
Figura 34 – Corpo de prova onde ocorreu quebra fora da região desejada.....	52
Figura 35 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do <i>cooler</i> para PLA 3D Fila fabricado na vertical	54
Figura 36 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do <i>cooler</i> para PLA 3D Fila fabricado na horizontal	55
Figura 37 - Alongamento resultante nos corpos de prova fabricados na horizontal ..	55
Figura 38 - Alguns dos corpos de prova do ensaio de tração para PLA Slim 3D	56
Figura 39 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do cooler para PLA Slim 3D fabricado na vertical.....	59
Figura 40 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do cooler para PLA Slim 3D fabricado na horizontal.....	59
Figura 41 - Alongamento resultante nos corpos de prova fabricados na horizontal ..	60
Figura 42 - Alguns dos corpos de prova do ensaio de tração para PETG 3D Fila	61
Figura 43 - Tensão de escoamento vs velocidade do cooler para PETG 3D Fila fabricado na vertical	63
Figura 44 - Tensão de escoamento vs velocidade do cooler para PLA Slim 3D fabricado na horizontal	64
Figura 45 - Alongamento resultante nos corpos de prova fabricados na horizontal ..	64
Figura 46 - Tensão vs deslocamento para PETG com o <i>cooler</i> em 100%.....	65
Figura 47 - Tensão vs deslocamento para PETG com o <i>cooler</i> em 0%.....	66
Figura 48 - Curva tensão-deformação clássica para um polímero semicristalino	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões do corpo de prova	30
Tabela 2 - Parâmetros recomendados pelos fabricantes para PLA	33
Tabela 3 - Parâmetros recomendados pelos fabricantes para PETG	33
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do PLA da 3D Fila segundo o fabricante	34
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do PETG da 3D Fila segundo o fabricante.....	34
Tabela 6 - Parâmetros utilizados para imprimir o cubo de teste em PETG	38
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para imprimir o cubo de teste em PLA.....	39
Tabela 8 - Dimensões do corpo de prova	41
Tabela 9 - Parâmetros utilizados para imprimir os corpos de prova em PETG	47
Tabela 10 - Parâmetros utilizados para imprimir os corpos de prova em PLA.....	48
Tabela 11 - Total de ensaios de tração a serem realizados no sentido vertical	50
Tabela 12 - Total de ensaios de tração a serem realizados no sentido horizontal....	50
Tabela 13 - Velocidades recomendadas para o ensaio de tração pela ASTM D638	50
Tabela 14 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PLA 3D Fila na vertical.....	53
Tabela 15 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PLA 3D Fila na horizontal	53
Tabela 16 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PLA Slim 3D na vertical	57
Tabela 17 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento do PLA Slim 3D na horizontal	57
Tabela 18 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de ruptura do PLA Slim 3D na horizontal.....	58
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PETG 3D Fila na vertical.....	61
Tabela 21 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento do PETG 3D Fila na horizontal	62
Tabela 22 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de ruptura do PETG 3D Fila na horizontal	62

LISTA DE SIGLAS

FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por deposição de fundido)
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> (Fabricação com filamento fundido)
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i> (Fusão em cama de pó)
PLA	Poliácido láctico
PET	Polietileno tereftalato
PETG	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação	[–]
L	Largura	[m]
E	Módulo de elasticidade	[MPa]
U	Módulo de Resiliência	[J/m ³]
T	Temperatura	[K]
σ	Tensão	[MPa]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Tema	16
1.2	Delimitação do Tema	17
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	Justificativa	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Manufatura Aditiva	19
2.1.1	FDM	20
2.1.2	SLA	22
2.2	Polímeros utilizados nas impressoras FDM	23
2.2.1	PLA	23
2.2.2	PETG	23
2.3	Sistema de resfriamento do plástico extrusão	24
2.4	Tensão térmica residual	25
2.5	Espaços em vazio	26
2.6	Ensaio mecânicos	27
3	METODOLOGIA	32
3.1	Fabricação	33
3.1.1	Materiais	33
3.1.2	Impressora 3D	35
3.1.3	Parâmetros de impressão	37
3.2	Modelagem do corpo de prova	40
3.2.1	Projeto	41
3.2.2	Determinação da espessura	41
3.3	Determinação dos parâmetros de impressão utilizados	45
3.3.1	Cubo de teste	45
3.3.2	Torre de temperatura	46
3.3.3	Parâmetros finais adotados	47
3.4	Ensaio de tração	49
3.5	Sentido de impressão	51

4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4.1	Ensaio de tração	52
4.1.1	PLA 3D Fila	52
4.1.2	PLA Slim 3D	56
4.1.3	PETG 3D Fila	60
5	CONCLUSÃO	67
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de manufatura aditiva, popularmente chamados de impressoras 3D, estão sendo cada vez mais adotados na indústria, desde a fabricação de protótipos até a produção de peças funcionais. O mercado vivencia uma mudança no estilo de produção existente com a disseminação dos sistemas de manufatura aditiva de baixo custo, caseiros e dos sistemas industriais. Para ilustrar, um setor que está investindo nessas tecnologias é o aeroespacial. A Figura 1 ilustra a dobradiça do AirBus A320, que originalmente havia sido projetada para ser fabricada via fundição tradicional, mas foi alterada para ser fabricada via tecnologia de fusão em cama de pó ou PBF, utilizando uma liga de titânio. Isso resultou em uma redução de 10 kg no peso da dobradiça, graças a possibilidade de realizar uma geometria orgânica complexa e que é fabricada em uma única etapa. (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2016).

Figura 1 - Dobradiça do AirBus A320



Fonte: Gibson *et al.* (2016, p.472)

Outra vantagem proporcionada pelo sistema de manufatura aditiva é que os fabricantes não precisam manter estoques de peças ou sistemas inteiros de produção funcionando para fornecer peças de substituição a seus produtos. Basta guardar os arquivos digitais e realizar a fabricação conforme surgir a demanda (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2016).

De acordo com Upcraft e Fletcher (2003), o sistema de manufatura aditivo mais difundido atualmente para a fabricação de geometrias complexas é o FFF ou fabricação com filamento fundido, conhecido popularmente como impressoras 3D

peçoais, que utilizam um rolo de polímero em forma de fio, extrusado por um sistema de engrenagem até um bico aquecido que derrete o material na forma da peça desejada. Essa grande popularidade se deve ao baixo custo das máquinas, derivadas de modelos *open-source* como o RepRap, ao baixo custo de produção e a possibilidade de produção de qualquer geometria complexa.

Conforme demonstrado por Walsh (2017), as impressoras 3D FFF são extremamente dependentes dos parâmetros configurados no momento de gerar o arquivo a ser impresso. Alguns parâmetros são: velocidade de impressão, altura de camada, temperatura do extrusor, largura de camada, velocidade de rotação do *cooler* de resfriamento. As variações de temperatura e velocidade de impressão alteram as propriedades mecânicas dos polímeros, como pode ser visto no trabalho, que determinou que a alteração da temperatura de impressão de 190 °C para 220 °C ocasionou um aumento de 8,2% na resistência à tração do PLA e o aumento da velocidade de 30 mm/s para 90 mm/s ocasionou uma redução de 3,5% na resistência a tração.

A tensão térmica residual pode ser determinada via métodos de elementos finitos e analiticamente, como apresentado no trabalho de Macedo *et al.* (2019). Os autores alteraram a velocidade de impressão para entender seu impacto nas propriedades mecânicas e no pior caso, a 96 mm/s, obtiveram uma redução de 3,8% no módulo de elasticidade devido à tensão residual e uma redução de 9% na resistência à tração da peça devido aos espaços em vazios gerados entre cada linha.

Sendo assim, esse trabalho apresenta um estudo experimental para verificar a influência do resfriamento forçado na adesão entre camadas, na resistência à tração e no alongamento máximo de corpos de provas fabricados em PETG e PLA.

1.1 Tema

O foco principal desse trabalho é o estudo do sistema de resfriamento do plástico extrusado pelas impressoras 3D FDM, visando determinar o impacto do resfriamento do material extrusado na resistência mecânica da peça final.

1.2 Delimitação do Tema

O presente trabalho limita-se ao estudo de um sistema de resfriamento para uma impressora 3D FDM. O trabalho será realizado sobre uma impressora 3D já existente, do modelo CR-10S da Creality, que não está enclausurada. Os corpos de provas serão fabricados na própria impressora. Os materiais utilizados para os testes foram PLA e PETG. Os ensaios mecânicos foram realizados nos laboratórios da Unisinos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar o impacto do sistema de resfriamento do plástico extrusado nas propriedades mecânicas de peças fabricadas via manufatura aditiva.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Determinar o impacto do sistema de resfriamento na tensão de escoamento das peças feitas em PLA e PETG;
- b) Comparar os resultados de materiais de fabricantes diferentes;
- c) Analisar a deformação em relação à tensão em corpos de prova fabricados com diferentes velocidades de rotação do *cooler* de resfriamento do material extrusado;
- d) Analisar a diferença de alongamento máximo em corpos de prova fabricados com diferentes velocidades de rotação do *cooler* de resfriamento do material extrusado.

1.4 Justificativa

Saber os reais impactos que o resfriamento forçado ocasiona sobre as peças fabricadas via manufatura aditiva é de extrema importância para poder avançar cada vez mais esse método de manufatura. Determinar a real influência da velocidade de rotação do *cooler* e a tensão de escoamento do material extrusado permitirá ter um maior controle sobre a resistência mecânica das peças fabricadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manufatura Aditiva

Manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressora 3D, é o termo dado para os meios de fabricação onde camadas de um material são progressivamente sobrepostas umas às outras para formar o objeto desejado. Utiliza-se um modelo projetado digitalmente como base, que então é processado em softwares específicos para realizar o “fatiamento”, processo no qual o arquivo digital é transformado nos comandos numéricos executados pela impressora. Por fim, esse arquivo com os comandos numéricos é executado pela impressora 3D, que irá formar o objeto final (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2016).

O objeto final gerado pela impressora é uma aproximação do objeto que foi projetado. Como ela realiza o trabalho por camadas, a altura de camada utilizada determina o acabamento superficial da peça, quanto menores as alturas de camada, melhor é o acabamento resultante. Pode-se ver na Figura 2 esse efeito.

Figura 2 - Exemplos da resolução de camada em um objeto



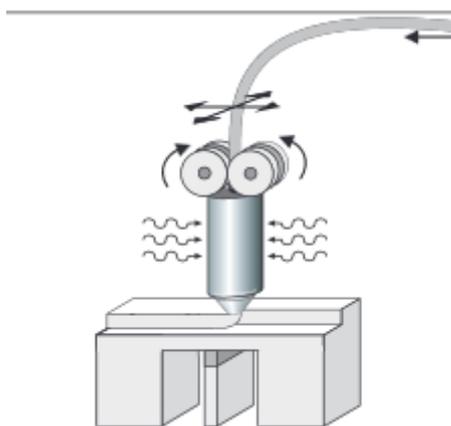
Fonte: Gibson *et al.* (2015, p.3)

As tecnologias de manufatura aditiva mais comumente encontradas são as de FDM e SLA.

2.1.1 FDM

FDM significa modelagem por deposição de fundido. As impressoras 3D desse tipo funcionam através da extrusão de um rolo de filamento, movido através de um sistema de engrenagem que traciona o fio, até chegar no *heat-block*, onde o material é derretido e depositado nas camadas da peça, esse sistema pode ser visto na Figura 3. Essa tecnologia surgiu em 1988, desenvolvido pela companhia Stratasys. No início da década de 2010, impulsionado pelo vencimento de algumas patentes chaves do processo, ocorreu uma grande popularização da tecnologia, derrubando os custos das impressoras 3D. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

Figura 3 - Sistema de extrusão de uma impressora 3D FDM



Fonte: Gebhardt e Hötter (2016, p.233)

Segundo Gibson *et al.* (2016), o processo genérico para fabricar uma peça via FDM pode ser descrito nas seguintes etapas:

- **Modelagem da geometria:** O primeiro passo é realizar a modelagem 3D do objeto que se deseja fabricar. Pode-se utilizar outros recursos, como escanear um objeto real em 3D, porém o resultado precisa ser a geometria externa sólida do objeto.
- **Conversão para STL:** Após ter a geometria 3D construída, é necessário transformá-la no formato padrão adotado pelas impressoras 3D e softwares de fatiamento. Praticamente todos os programas de modelagem já tem uma função de exportar a geometria em STL.
- **Fatiamento:** Essa etapa consta em abrir o arquivo da geometria gerado na extensão STL em um software que irá “fatiar” a peça e gerar o arquivo

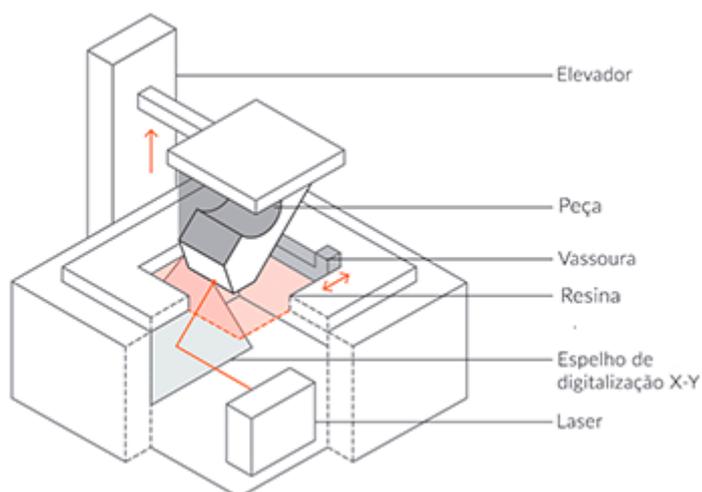
.gcode, responsável por ter todos os comandos numéricos utilizados pela impressora. Nessa etapa, são definidos todos os parâmetros de impressão que serão adotados na fabricação da peça, como altura de camada, temperatura de impressão, velocidade de impressão, utilização de suportes, números de paredes, preenchimento interno etc. Essa etapa é o ponto crucial da fabricação.

- **Transferência para a impressora 3D:** Após a criação do arquivo .gcode, ele deve ser transferido para a impressora 3D. Cada impressora 3D trabalha com uma ou mais formas de realizar essa transferência, as mais comuns são: via cartão micro SD, *pendrive* USB e rede de internet.
- **Configuração da máquina:** As impressoras 3D de baixo custo geralmente não tem sistemas de nivelamento de mesa e alimentação automática de filamentos, sendo necessário realizar essas etapas antes do início da impressão.
- **Fabricação da peça:** Essa é a etapa mais longa do processo, onde a impressora 3D irá executar os comandos numéricos do arquivo criado anteriormente, fabricando a peça. É um processo autônomo que não precisa de um extenso monitoramento. A maior incidência de falhas está logo no início da impressão, devido a problemas de adesão na mesa.
- **Remoção da peça:** Para evitar danificar a mesa de impressão ou a peça final, é recomendado esperar que a mesa aquecida esfrie até a temperatura ambiente para realizar a remoção da peça.
- **Tratamento final:** Após a peça ser removida da mesa, é necessário realizar os acabamentos, como a remoção dos suportes utilizados na impressão e, em caso de aprimoramento estético da peça, ela pode ser lixada e pintada.
- **Aplicação:** Pode-se por fim utilizar a peça fabricada via manufatura aditiva, realizando a montagem com outros componentes ou aplicando-a diretamente na sua finalidade. Sua vida útil e resistência vão depender do material utilizado, parâmetros definidos e condições do ambiente em que ela se encontra.

2.1.2 SLA

As impressoras SLA funcionam através da cura de resina utilizando um laser ou projetor. As resinas utilizadas são fotossensíveis, solidificando em contato com o laser/feixe de luz utilizado. Esse tipo de impressora 3D consegue obter uma precisão dimensional e acabamentos superiores se comparada às impressoras 3D FDM, porém também possui algumas desvantagens. As principais delas são: elevado custo de material (resinas), área de impressão geralmente pequena, elevado tempo de impressão e processo de cura é irreversível. Os materiais utilizados pelas impressoras 3D FDM são termoplásticos e podem ser reciclados, já as resinas são termo endurecidas e não podem ser derretidas posteriormente para reutilização. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

Figura 4 - Funcionamento de uma impressora 3D SLA



Fonte: 3DLab (2020)

Outra diferença fundamental dessas impressoras 3D para as FDM é que após a finalização da impressão, a peça ainda não está pronta. Ela precisa passar pelo processo de limpeza, que consiste em retirar toda a resina não solidificada que está em contato com a peça. Após isso, ela precisa passar por um dispositivo que irá terminar a cura da resina. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

2.2 Polímeros utilizados nas impressoras FDM

Existe uma grande gama de materiais que podem ser utilizados nas impressoras 3D FDM, os mais comuns sendo PLA, ABS, PETG, TPU e Nylon.

2.2.1 PLA

PLA ou ácido poliláctico é um plástico biodegradável produzido a partir de fontes renováveis que contém açúcares, como milho, aipim, cana-de-açúcar etc.

Suas propriedades geralmente variam entre:

- Temperatura de transição vítrea: 50–80 °C;
- Ponto de fusão: 170-180 °C;
- Módulo de elasticidade: 2,7–16 GPa.

O PLA apresenta algumas características que o faz ser o material mais utilizado pelas impressoras 3D FDM, são elas:

- Possibilidade de imprimir em impressoras 3D não enclausuradas;
- Temperaturas de transição vítrea e ponto de fusão não muito elevadas;
- Alta variedade de ligas e cores;
- Resulta em um bom acabamento superficial;
- Não gera *stringing*, que são as teias residuais de quando o bico aquecido viaja de um ponto a outro com o extrusor desligado.

A reciclagem do PLA é completa. Passando pelos processos de reciclagem mecânica ou química, o PLA pode ser convertido na matéria prima virgem novamente, sem perdas de propriedades. Além dessas opções, o PLA é um plástico biodegradável, sua degradação leva em torno de seis meses a dois anos, e quando é descartado corretamente se transforma em substâncias inofensivas. (ANDRADE *et al.*, 2016; NAMPOOTHIRI *et al.*, 2010; PIEMONTE *et al.*, 2013)

2.2.2 PETG

PETG é a combinação do polímero PET, Polietileno tereftalato, com glicol. A adição de glicol ocorre para evitar o problema que o PET tem com o sobreaquecimento, onde este acaba ficando nebuloso e fragilizado. Outras propriedades também sofrem alterações, como a redução da temperatura de fusão, o

aumento da flexibilidade e o aumento da resistência ao impacto, se comparado ao PET. O PETG é fabricado da mesma maneira que o PET, sendo um derivado de petróleo e só ocorre uma etapa da adição do glicol.

Suas propriedades geralmente variam entre:

- Temperatura de transição vítrea: 80 °C;
- Ponto de fusão: 220-260 °C;
- Módulo de elasticidade: 1,5-2,5 GPa

O PETG apresenta algumas características que o faz uma boa opção de material para impressoras 3D FDM, são elas:

- Possibilidade de imprimir em impressoras 3D não enclausuradas;
- Não gera fumaça ou odores durante a impressão;
- Apresenta uma maior flexibilidade que o PLA;
- É extremamente durável;

O PETG apresenta uma grande desvantagem sobre o PLA, que é a sua maior dificuldade de impressão. Por se tratar de um plástico mais “pegajoso”, ele acaba aderindo às superfícies e tende a gerar uma elevada quantidade de “teias”, *stringing*, na peça final.

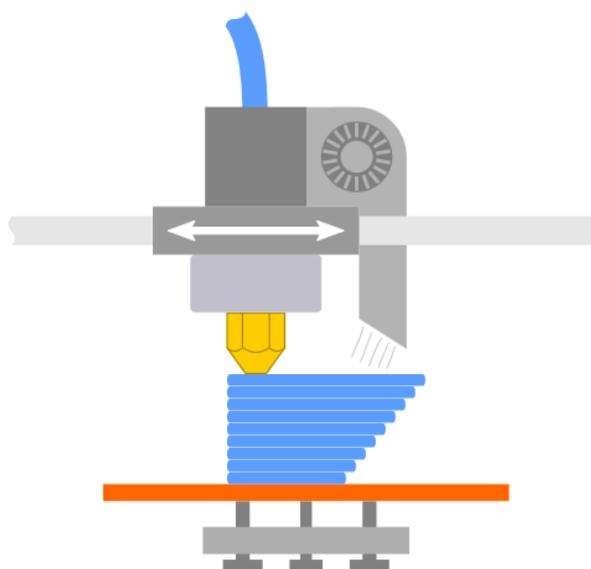
A reciclagem do PETG é similar à do PET, porém não é recomendado o uso para fabricações de fibras. Uma desvantagem é que ele não é biodegradável, podendo durar até 800 anos na natureza ao ser descartado. (DUPAIX; BOYCE, 2005; FRANCISZCZAK *et al.*, 2018; LACROIX *et al.*, 1996)

2.3 Sistema de resfriamento do plástico extrusão

De acordo com Grames (2019), as impressoras 3D FDM, na configuração desktop, possuem um sistema de resfriamento a ar ou *cooler* atrelado à extrusora, denominado de *part cooling fan*. O objetivo desse *cooler* é resfriar o material que está sendo depositado na peça, melhorando a qualidade das partes impressas no vazio, denominadas *over-hangs*. A Figura 5 apresenta um esquema de uma impressão sendo realizada onde toda a lateral direita da peça é uma região de *over-hang*.

A utilização desse *cooler* não é recomendada para todos os materiais. Plásticos como ABS e TPU devem ser utilizados com o *cooler* desligado devido aos problemas ocasionados pelo mesmo, que são o empenamento ou *warping* e a fraca adesão entre camadas.

Figura 5 - Exemplo de peça sendo fabricada onde toda a lateral direita da peça é uma região de *over-hang*

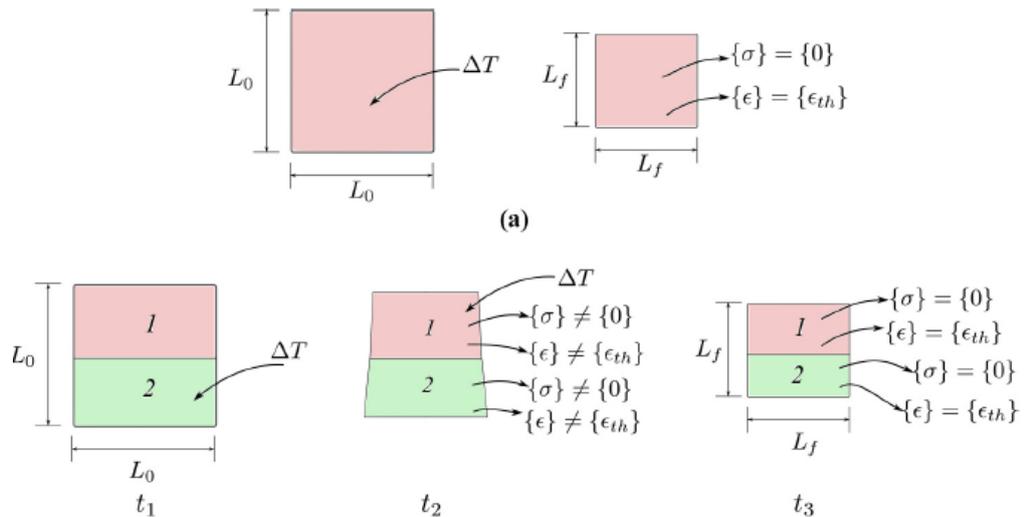


Fonte: All3dp (2019)

2.4 Tensão térmica residual

De acordo com Macedo *et al.* (2019), as impressoras 3D FDM sofrem com a transferência de calor durante o processo, resultando em uma expansão e contração do material impresso. Considerando que o material utilizado seja linearmente elástico, sem nenhuma restrição para a expansão e contração térmica, mesmo duas camadas com velocidades de resfriamento diferentes não sofreriam com tensões térmicas residuais após a equalização da temperatura final.

Figura 6 - Exemplo de tensão residual térmica nula



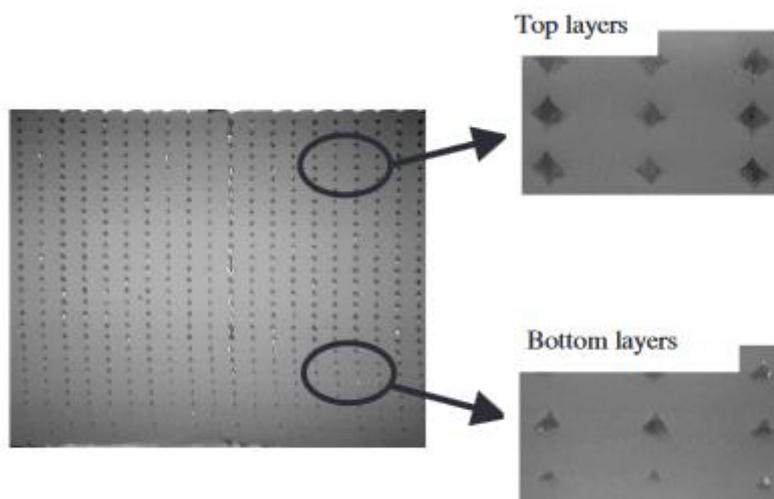
Fonte: Macedo *et al.* (2019, p.1666)

Porém, na prática, as linhas perpendiculares depositadas em uma mesma camada pela impressora 3D atuam como restrições de movimento para a expansão e contração térmica umas das outras. Isso faz com que a tensão residual térmica não seja nula, sendo possível concluir que, por mais que todas as partes da impressão final sofram a mesma variação térmica, existe uma tensão residual final.

2.5 Espaços em vazio

Além da tensão térmica residual, a temperatura impacta nos espaços em vazio gerados nas peças. De acordo com Sun *et al.* (2008), nas camadas iniciais da impressão a temperatura da peça está mais elevada e, conseqüentemente acaba ficando mais tempo na faixa de transição vítrea, resultando em um volume de espaços vazios menores que nas camadas superiores. Pode-se ver na Figura 7 o impacto ao longo das camadas de uma mesma peça.

Figura 7 - Demonstração do espaço em vazio ao longo das camadas de uma impressão 3D



Fonte: Sun *et al.* (2008)

De acordo com Bellehumeur *et al.* (2004), quanto mais tempo o material permanecer acima da temperatura de transição vítrea, menor será o volume dos espaços vazios resultantes. Por fim, quanto maior for o volume em vazio, menor será a resistência mecânica da peça final, já que haverá uma área menor para distribuir as cargas aplicadas sobre a peça.

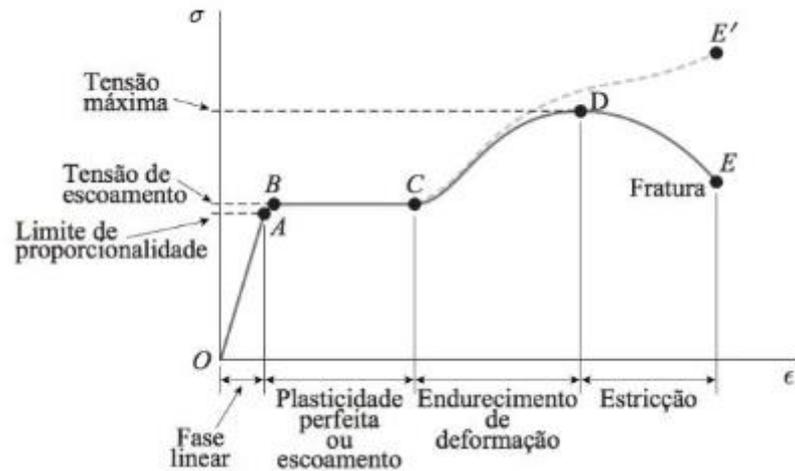
Para Macedo *et al.* (2019), é fundamental escolher os parâmetros de impressão adequados para minimizar os efeitos dos espaços em vazio. Também é importante lembrar que, quanto menor for o percentual de espaços vazios, maior será a massa da peça final.

2.6 Ensaios mecânicos

De acordo com Wright e Askeland (2014), o ensaio mecânico de tração é extremamente importante para se obter as propriedades da peça final. Ele fornece as propriedades de limite de escoamento, limite de resistência mecânica à tração, módulo de Young e ductibilidade.

O ensaio gera um gráfico de deformação vs tensão, que pode ser visto na Figura 8. Esse gráfico fornece informações como os valores de tensão máxima de escoamento, regime elástico de operação do material, tensão máxima e o ponto de fratura do material (GOODNO; GERE, 2018).

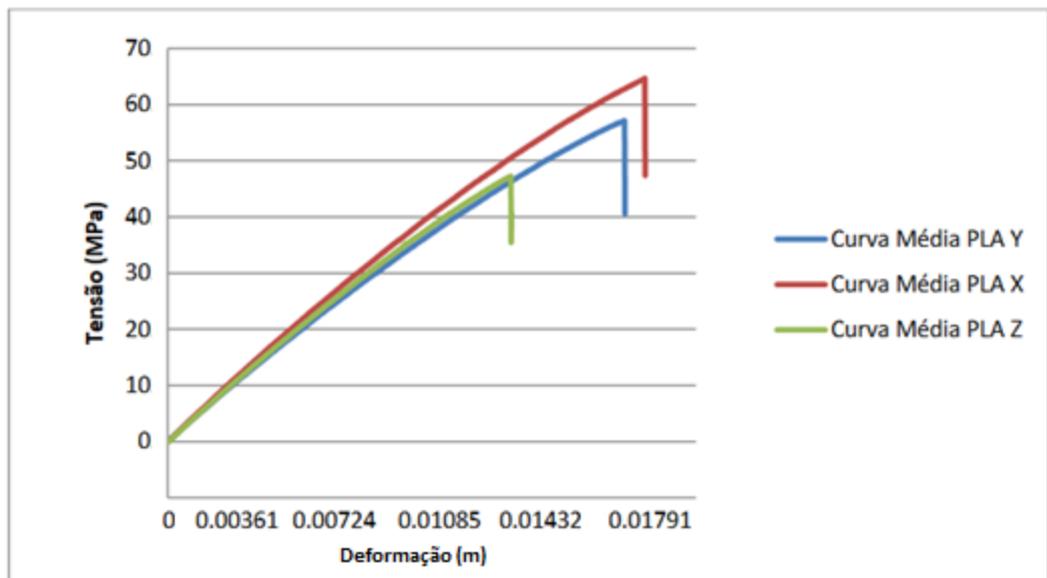
Figura 8 - Diagrama tensão vs deformação



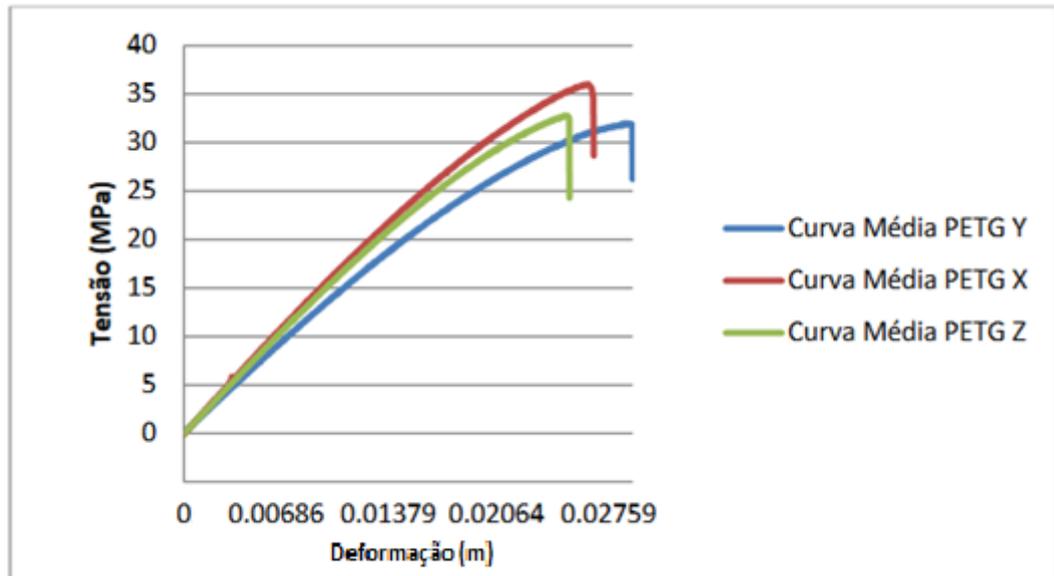
Fonte: Goodno e Gere (2010)

Cada material apresenta seu estilo de curva característico para o diagrama tensão vs deformação. No caso dos plásticos, a curva característica pode ser vista na Figura 9. Em ensaios realizados por Silva e Barcelos (2018), as curvas obtidas para os materiais PLA e PETG podem ser vistas nas Figura 9 e Figura 10, respectivamente, onde mostram as curvas resultantes de um ensaio tensão vs deformação normal.

Figura 9 - Diagrama tensão vs deformação para PLA



Fonte: Adaptado de Silva e Barcelos (2018)

Figura 10 - Diagrama tensão vs deformação para PETG

Fonte: Adaptado de Silva e Barcelos (2018)

Segundo Goodno e Gere (2014), em um ensaio de tração normal, o material a ser testado é instalado entre os dois pontos de fixação do dispositivo, que pode ser visto na Figura 11. Após a fixação, a tensão é aplicada no material, que é medida através de sensores do dispositivo.

Figura 11 - Exemplo de um dispositivo de ensaio de tração

Fonte: Goodno e Gere (2014)

Ainda de acordo com Goodno e Gere (2014), o objeto utilizado para realizar o ensaio de tração deve ter seu diâmetro alongado nas regiões que estão presas nos pontos de fixação do dispositivo, para evitar que a falha ocorra nessas regiões e invalide o teste realizado. Para garantir que os resultados sejam comparáveis e mensuráveis, uma padronização do corpo de prova deve ocorrer. Uma entidade responsável por elaborar normativas sobre os padrões de ensaio de tração é a ASTM.

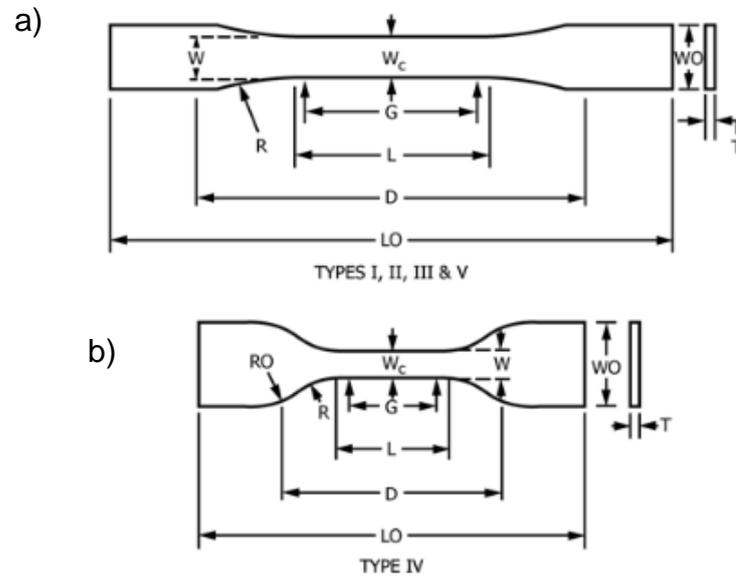
De acordo com a norma ASTM D638 (2014), que determina o ensaio de tração para materiais plásticos, o corpo de prova para o ensaio de tração deve ter a geometria apresentada na Figura 12, com dimensões de acordo com os tipos I, II, III, IV e V, apresentadas na Tabela 1. A norma recomenda utilizar o corpo de prova de Tipo I quando possível, e precisa atingir os seguintes critérios: o material utilizado deve ser categorizado como rígido ou semirrígido e existir a possibilidade de ser fabricado com 7 mm de espessura.

Tabela 1 - Dimensões do corpo de prova

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, <i>T</i> , mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
<i>W</i> —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
<i>L</i> —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
<i>WO</i> —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
<i>WO</i> —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
<i>LO</i> —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
<i>G</i> —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
<i>G</i> —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
<i>D</i> —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
<i>R</i> —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
<i>RO</i> —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Fonte: ASTM

Figura 12 - Geometria para o corpo de prova de ensaio de tração segundo ASTM: a) tipos I, II, III e V; b) Tipo IV



Fonte: ASTM

A norma ainda determina que para materiais anisotrópicos devem ser testados 5 peças transversais e 5 peças longitudinais com o eixo principal da anisotropia e descartar todos que quebrarem durante o teste por alguma falha.

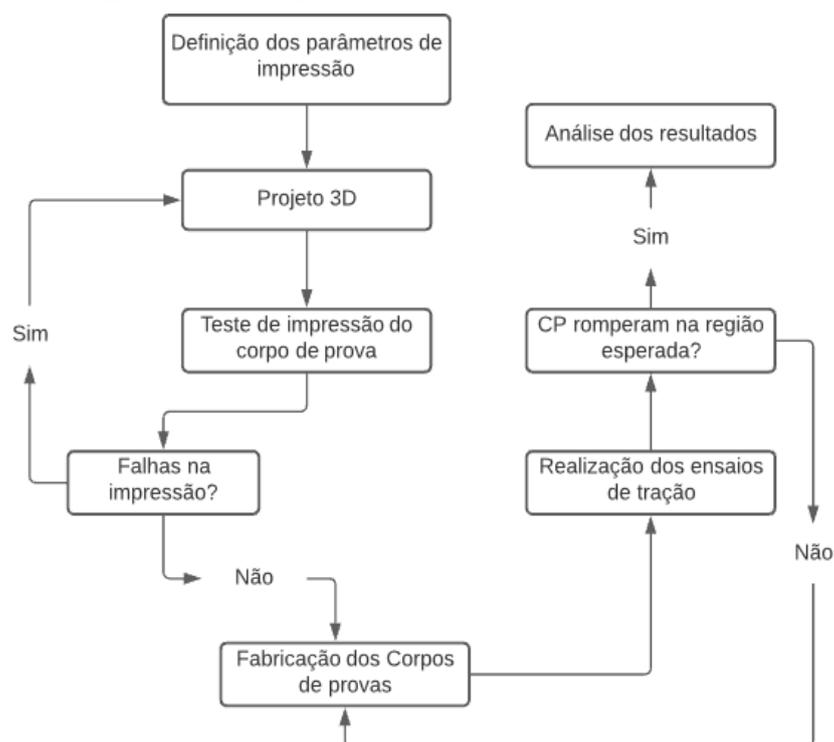
3 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em determinar o impacto da velocidade de rotação do *cooler* de resfriamento nas propriedades mecânicas das peças fabricadas via manufatura aditiva e, para isso, foram realizados ensaios mecânicos de tração de acordo com a ASTM D638 (2014), que é uma norma para testes padrões para propriedades de tração de polímeros. O corpo de prova utilizado foi o de Tipo I, para plásticos rígidos e semirrígidos com até 7mm de espessura.

Os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova fabricados na horizontal e na vertical, que são os dois principais eixos de anisotropia das peças fabricadas em uma impressora 3D, já que no eixo vertical é verificado a força de adesão das camadas e no eixo horizontal é verificado o esforço para romper as linhas de impressão.

Foram testadas as velocidades de rotação do *cooler* de 0%, 10%, 25%, 50% e 100% para os corpos de prova fabricados na vertical e as velocidades de 0% e 100% para os que foram fabricados na horizontal. Para cada velocidade do *cooler*, foram fabricados 5 corpos de prova e foram testados os materiais PLA e PETG. Na Figura 13 está exposto o fluxograma das etapas do trabalho.

Figura 13 - Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: O autor

3.1 Fabricação

3.1.1 Materiais

Os filamentos utilizados foram adquiridos dos fabricantes Slim 3D e 3D Fila, com as amostras de PLA sendo fabricadas com material de cada um dos fabricantes e as de PETG sendo fabricadas somente com o material da 3D Fila. As Tabela 2 e Tabela 3 apresentam os parâmetros recomendados por cada fabricante de PLA e PETG, respectivamente, para serem utilizados nas configurações das impressões.

Nas Tabela 4 e Tabela 5 e na Figura 14 estão as propriedades mecânicas estipuladas pelos fabricantes dos materiais, que foram usadas como valor de referência para comparação.

Tabela 2 - Parâmetros recomendados pelos fabricantes para PLA

PLA				
Fabricante	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	Temperatura Mesa (°C)	Ventilação
3D Fila PLA Basic	195-230	40-150	60	100% a partir da segunda camada
Slim 3D PLA Standard	180-210	Sem recomendação	0 - 60	Sem recomendação

Fonte: O autor

Tabela 3 - Parâmetros recomendados pelos fabricantes para PETG

PETG				
Fabricante	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	Temperatura Mesa (°C)	Ventilação
3D Fila PETG XT	230 - 260	40 - 100	70 - 80	Sem recomendação

Fonte: O autor

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do PLA da 3D Fila segundo o fabricante

Mecânicas

Propriedade	Método de Teste		Unidade	Valor
Resistência à tração na Ruptura	ISO 527		MPa	26,5 / 21
Alongamento na Ruptura	ISO 527		%	56 / 39
Módulo elástico por tração	ISO 527		MPa	2650 / 2140
Resistência ao Impacto IZOD	D256		J/m	0,3

Fonte: 3D Fila

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do PETG da 3D Fila segundo o fabricante

Mecânicas

Propriedade	Método de Teste		Unidade	Valor
Resistência à tração na Ruptura	D 638		MPa	28
Alongamento na Ruptura	D 638		%	130
Módulo de flexão	D 790		MPa	2160
Dureza	D 785			106
Resistência ao Impacto IZOD	D 256	Em 23 °C	J/m	105

Fonte: 3D Fila

Figura 14 - Propriedades mecânicas do PLA da Slim 3D segundo o fabricante

Características

Peso: 01 kg (embalagem selada a vácuo)

Diâmetro Nominal: 1.75mm

Tolerância dimensional: +/- 0.05mm

Temperatura do bico de impressão: 180-210 °C

Temperatura da mesa de impressão : 0-60 °C

Temperatura de transição vítrea: 51~53 °C

Densidade: 1,27 g/cm³ (ISO 1183)

Resistência à tração: 55~65 MPa (ISO 527 5mm/min)

Deformação até a ruptura: 3~5% (ISO 527 5mm/min)

Resistência à flexão: 65~75 MPa (ISO 178:2001)

Módulo de flexão: 2100~2300 MPa (ISO 178:2001)

Resistência a impacto: 13~17 KJ/m² (ISO 180)

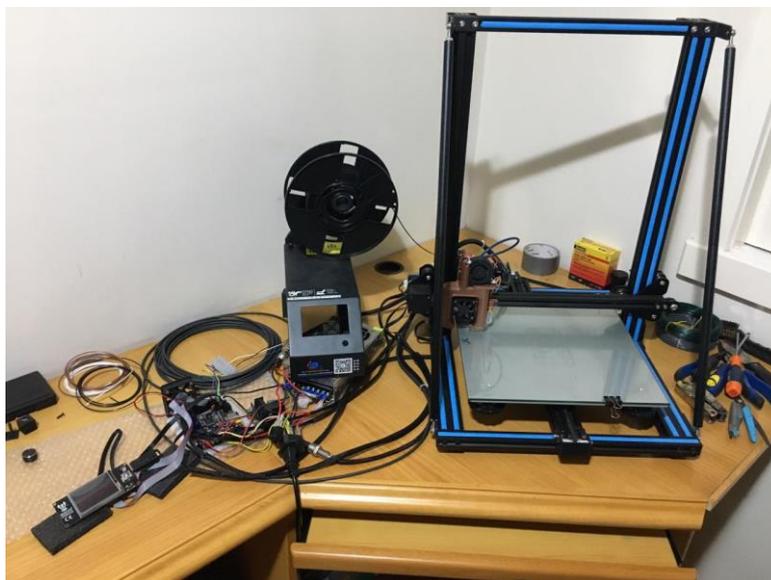
Escala de dureza Shore D: 80~82 (ISO 7619)

Fonte: Slim 3D

3.1.2 Impressora 3D

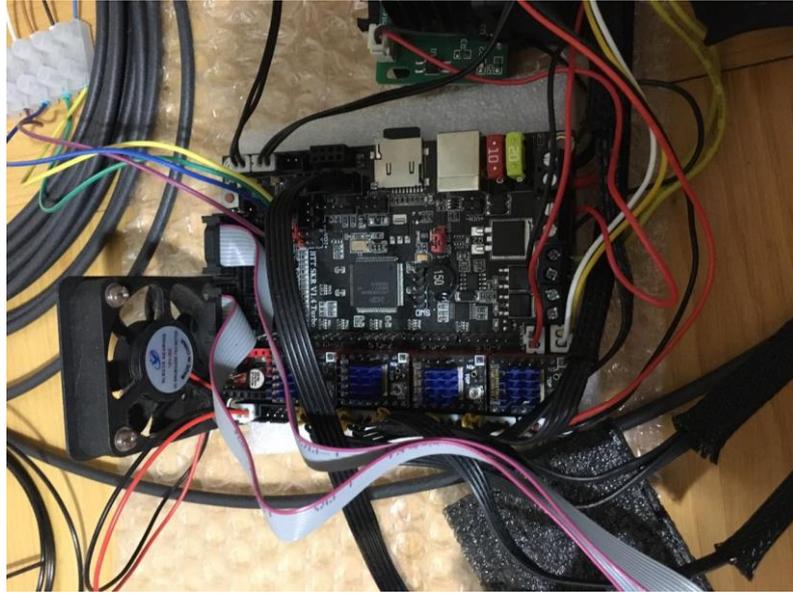
A impressora 3D que foi utilizada para realizar a fabricação dos protótipos envolvidos neste trabalho é uma CR-10S, da Creality, que pode ser vista na Figura 15. A placa de controle da impressora foi substituída por uma SKR 1.4 Turbo de 32 bits da *Big Tree Tech* e os drivers de controle dos motores de passo foram substituídos pelos TMC 2209, conforme Figura 16. As principais vantagens desse *upgrade* foram o ganho de processamento para cálculos de uma placa 32 bits vs uma de 8 bits, a possibilidade de instalar uma versão customizada do Marlin *firmware*, software que controla o hardware da impressora 3D, e a instalação dos drivers TMC 2209, que permitem habilitar o modo silencioso de funcionamento com *Stealthchop*, que consiste na eliminação do ruído gerado pelo motor de passo através da aplicação de corrente sincronizada nas bobinas dos motores e removendo ruídos dos pulsos PWN. O *firmware* também foi alterado, sendo utilizado uma versão base do Marlin 2.0, que foi customizada para controlar todos os recursos adicionados na impressora.

Figura 15 - Impressora 3D utilizada na fabricação dos corpos de prova



Fonte: O autor

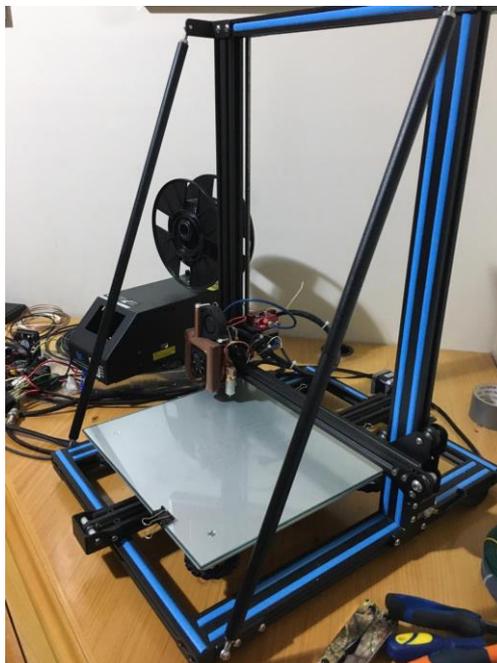
Figura 16 - Placa SKR 1.4 Turbo e Drivers TMC 2209



Fonte: O autor

Além dessas alterações, foram adicionadas duas barras estabilizadoras para o eixo z, com o intuito de reduzir as vibrações, conforme indicado na Figura 17.

Figura 17 - Barras estabilizadoras do eixo Z



Fonte: O autor

O tubo de alimentação do filamento foi substituído por um tubo *Capricorn* de baixa fricção, tendo como vantagens a redução da fricção das paredes dos tubos e

uma tolerância dimensional menor, evitando perdas no transporte do filamento. Outra alteração feita na impressora foi a instalação de dois amortecedores no acoplamento dos motores de passo dos eixos x e y, mostrados na Figura 18, com o intuito de reduzir as vibrações transferidas para a estrutura da impressora.

Figura 18 - Amortecedores dos acoplamentos dos motores dos eixos X e Y



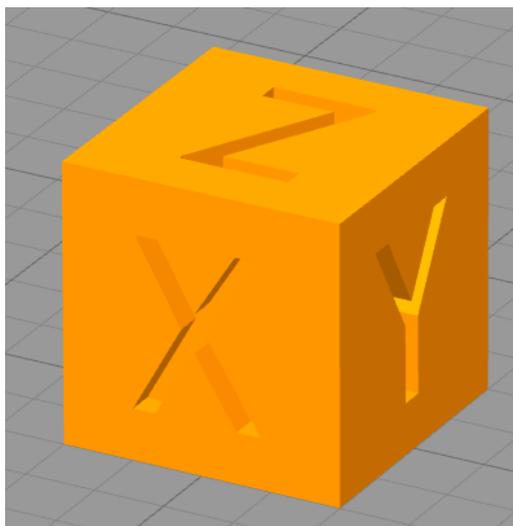
Fonte: O autor

3.1.3 Parâmetros de impressão

Existem variações de materiais entre cada fabricante, até mesmo entre lotes do mesmo fabricante, por esse motivo, para determinar os parâmetros ideais de impressão foram realizados alguns testes.

O primeiro teste é imprimir um cubo de 20 mm, que pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Modelo do cubo de teste



Fonte: Thingiverse (2016)

Nele foram utilizados os parâmetros recomendados pelo fabricante, resultando nos parâmetros da Tabela 6 para o PETG e da Tabela 7 para o PLA, onde é possível ver que os únicos parâmetros variantes são a temperatura do bico de extrusão e a temperatura da mesa aquecida.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados para imprimir o cubo de teste em PETG

Cubo em PETG	
Parâmetro	3D Fila
Bico	Latão de 0,4mm
Altura de camada (mm)	0,2
Largura da camada (mm)	0,4
Camadas sólidas de base	4
Camadas sólidas de topo	4
Paredes	3
Preenchimento (%)	5
Forma de preenchimento	Grade
Distância de retração (mm)	9
Velocidade de retração (mm/s)	75
Suportes	Desabilitado
Temperatura do bico (°C)	245
Temperatura da mesa (°C)	75
Ventilação forçada	100% a partir da segunda camada
Velocidade movimentações (mm/s)	60
Velocidade parede externa (mm/s)	30

Fonte: O autor.

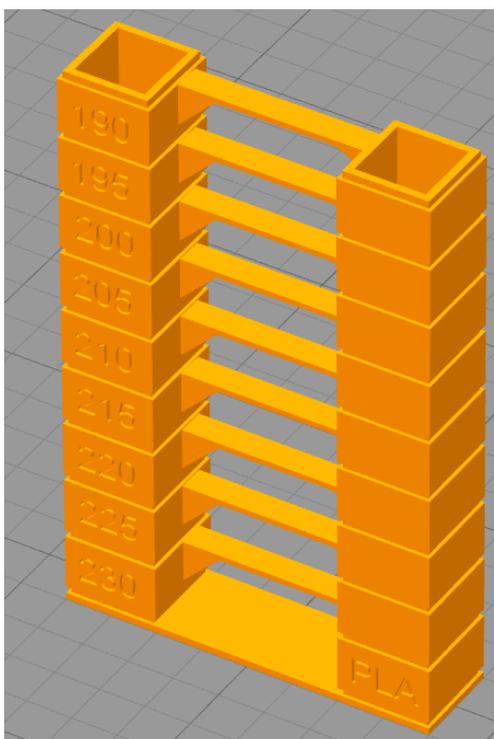
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para imprimir o cubo de teste em PLA

Cubo em PLA		
Parâmetro	3D Fila	Slim 3D
Bico	Latão de 0,4mm	
Altura de camada (mm)	0,2	0,2
Largura da camada (mm)	0,4	0,4
Camadas sólidas de base	4	4
Camadas sólidas de topo	4	4
Paredes	3	3
Preenchimento (%)	5	5
Forma de preenchimento	Grade	
Distância de retração (mm)	9	9
Velocidade de retração (mm/s)	75	75
Suportes	Desabilitado	
Temperatura do bico (°C)	215	220
Temperatura da mesa (°C)	60	65
Ventilação forçada	100% a partir da segunda camada	
Velocidade movimentações (mm/s)	60	60
Velocidade parede externa (mm/s)	30	30

Fonte: O autor.

Após a impressão do cubo, foi impressa uma torre de temperatura, que pode ser vista na Figura 20. A impressão é configurada para alterar a temperatura em cada ponto da torre, permitindo analisar e definir a faixa de temperatura ideal para o material, que resulte no melhor acabamento, adesão entre camadas e o menor *stringing*, que são finos fios residuais que ficam na impressão. Eles ocorrem quando a extrusora se move de um ponto a outro com uma área em vazio no meio, por exemplo, de uma torre a outra da Figura 20.

Figura 20 - Modelo da torre de temperatura



Fonte: STOEMPIE, Thingiverse (2017)

Com a torre de temperatura impressa, é definida então a temperatura do bico que será utilizada para a fabricação dos protótipos.

3.2 Modelagem do corpo de prova

Conforme determinado pela ASTM D638, o corpo de prova utilizado é o de Tipo I. A Figura 12a apresenta o desenho em 2D do corpo de prova utilizado, com suas respectivas dimensões descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dimensões do corpo de prova

Dimensão	Símbolo	Valor (mm)	Tolerância
Largura	w	13	$\pm 0,5$
Comprimento da seção estreita	L	57	$\pm 0,5$
Largura de aperto	WO	19	$\pm 6,4$
Comprimento total	LO	165	-
Comprimento de via	G	50	$\pm 0,25$
Distância entre apertos	D	115	± 5
Raio de arredondamento	R	76	± 1

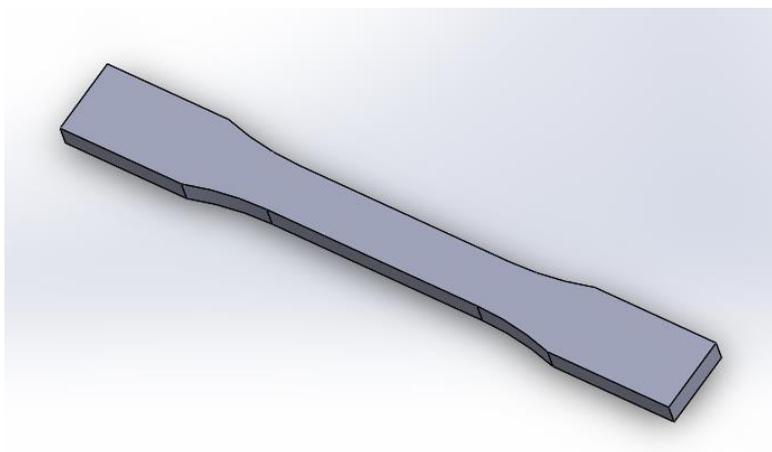
Fonte: ASTM

Para a espessura t , a norma determina que corpos de prova do Tipo I possam ter até 7 mm de espessura, mas recomenda utilizar $3,2 \pm 0,4$ mm.

3.2.1 Projeto

O corpo de prova foi modelado no Solidworks, de acordo com as dimensões especificadas na Tabela 8. O resultado pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 - Projeto do corpo de prova no Solidworks



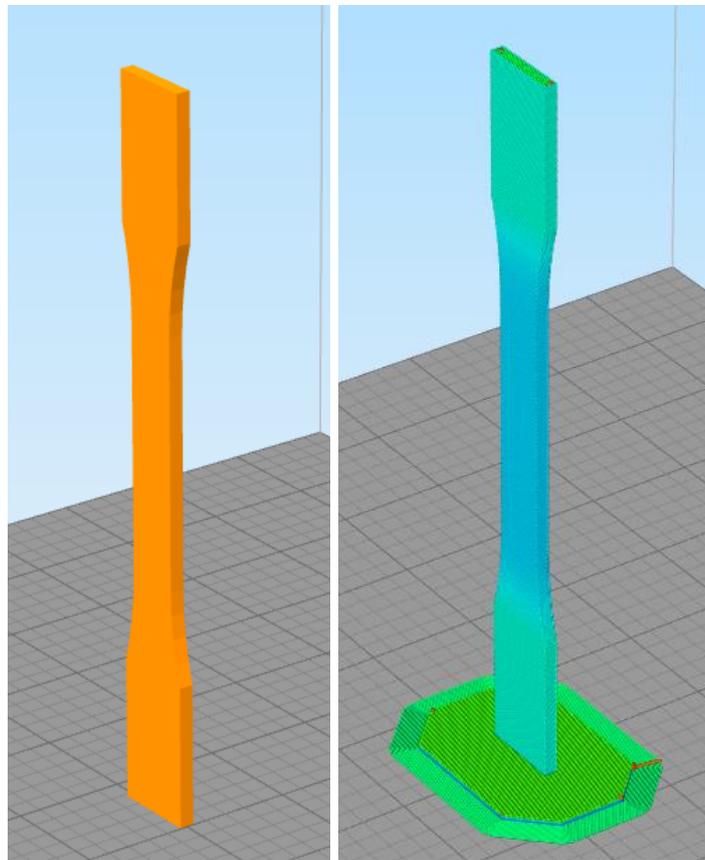
Fonte: O Autor

3.2.2 Determinação da espessura

Conforme dito no item 3.2, a espessura do corpo de prova de Tipo I deve ser inferior a 7 mm, sendo recomendado, caso seja possível, utilizar 3,2 mm de espessura. Para determinar se seria possível realizar a impressão vertical com uma espessura

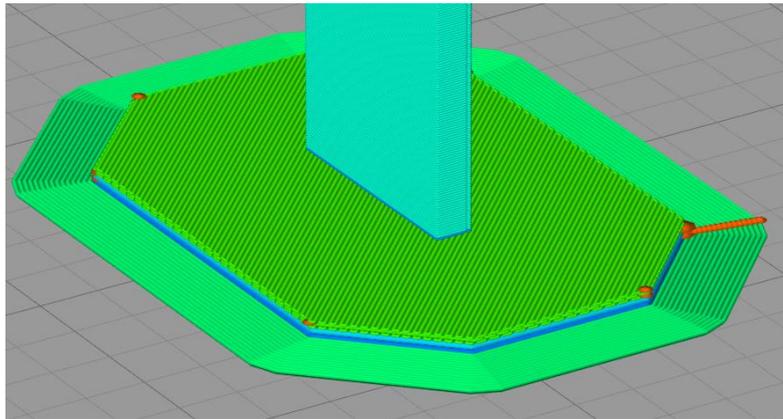
tão fina, foram realizados alguns testes. Na Figura 22 pode-se ver o resultado da pré-visualização do software de fatiamento do sólido. Conforme explicado por Horvath e Cameron (2014), para ajudar na aderência com a mesa aquecida, foram utilizadas as técnicas de *raft* e *skirt*, que podem ser vistas na Figura 23. *Skirt* é a área fina, de uma única camada, impressa ao redor do *raft*. Ela serve para limpar o bico aquecido da impressora e normalizar o fluxo de material. *Raft* é um “colchão” de material impresso abaixo do modelo, com o intuito de aumentar a área de contato da impressão com a mesa, evitando que as peças se soltem no meio da impressão.

Figura 22 - Teste de impressão com espessura de 3,2 mm



Fonte: O autor

Figura 23 - Técnicas de *raft* e *skirt* para melhorar adesão da impressão na mesa aquecida



Fonte: O autor

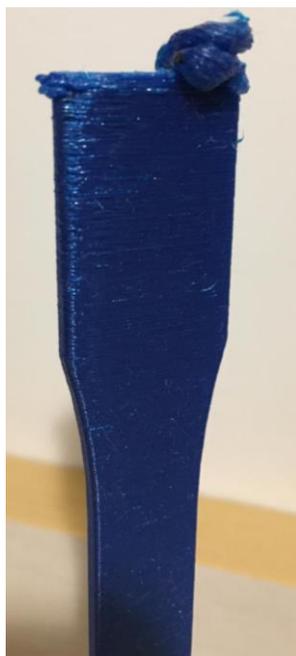
Foram realizadas 3 tentativas de imprimir o modelo, utilizando PETG, já que ele é o material mais flexível que será utilizado e só foi obtido sucesso em uma das impressões. Na Figura 24 é possível ver os 3 corpos de provas impressos, onde no primeiro ocorreu uma falha por descolamento da mesa de impressão na parte final da peça. A impressão do segundo ocorreu sem nenhuma falha e no terceiro, ao chegar na parte final da peça, o corpo de prova começou a flexionar com o movimento do bico, que pode ser visto com detalhes na Figura 25, até o ponto onde não conseguiu mais imprimir a peça.

Figura 24 – Tentativas de imprimir o corpo de prova com 3,2 mm de espessura



Fonte : O autor

Figura 25 – Falha no terceiro corpo de prova de teste

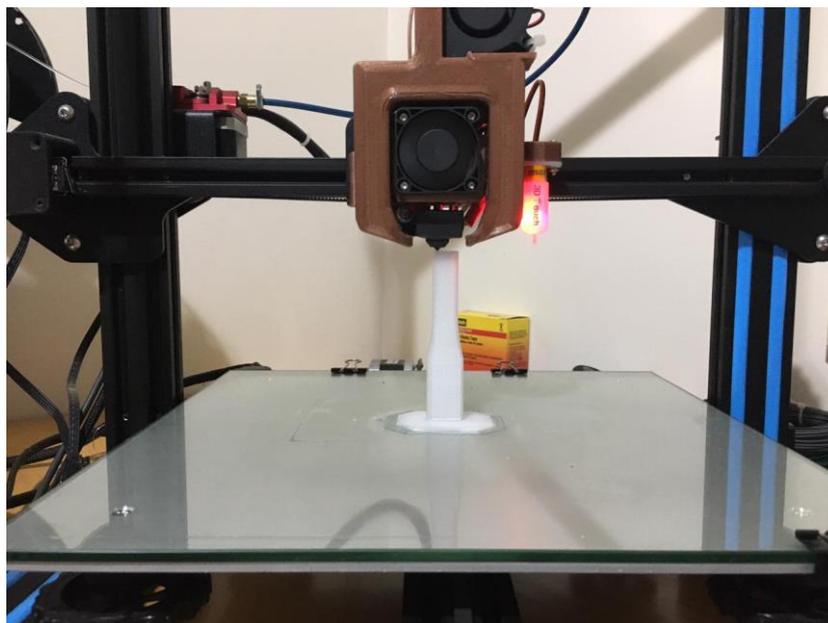


Fonte : O autor

Considerando uma taxa de sucesso de 33% para a impressão dos corpos de prova na vertical e que o tempo total para cada impressão é de 4 horas, seria inviável prosseguir utilizando uma espessura de 3,2 mm.

O corpo de prova foi remodelado para a nova espessura de 6 mm, que ainda é inferior a máxima estipulada pela norma para corpos de prova de Tipo I (7 mm). Os testes de impressão foram refeitos e os resultados foram satisfatórios, nenhum modelo foi descartado por falhas na impressão. Pode-se ver na Figura 26 a fabricação de um dos corpos de prova.

Figura 26 – Fabricação de um dos corpos de prova



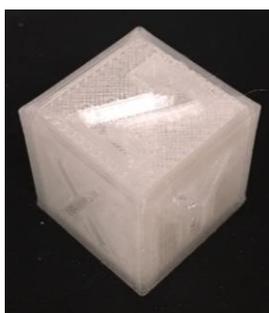
Fonte : O autor

3.3 Determinação dos parâmetros de impressão utilizados

3.3.1 Cubo de teste

Conforme explicado no item 3.1.3, os parâmetros de impressão utilizados foram determinados a partir de alguns testes realizados com cada material. Primeiramente foi impresso um cubo com os parâmetros recomendados pelo fabricante, 3D Fila. Para PETG, os valores podem ser vistos na Tabela 6 e para PLA, os valores podem ser vistos na Tabela 7. Os resultados das impressões do cubo podem ser vistos nas Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 - Cubo de teste impresso em PETG



Fonte: O autor

Figura 28 - Cubo de teste impresso em PLA

Fonte: O autor

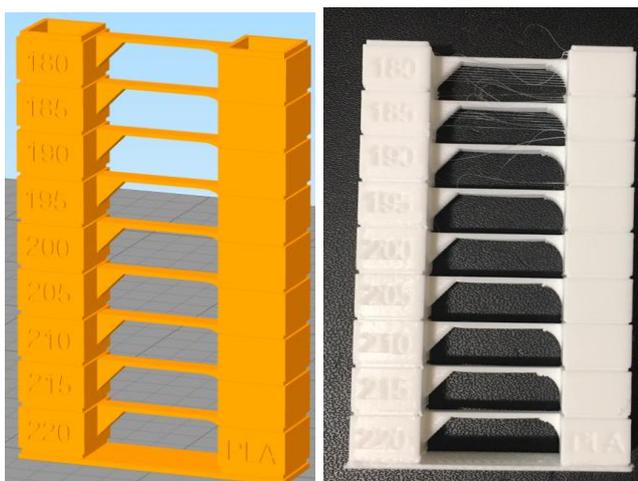
3.3.2 Torre de temperatura

Após a validação dos parâmetros iniciais, foi determinada a temperatura ideal de impressão para cada material através da impressão de uma torre de temperaturas. A temperatura do bico aquecido é alterada várias vezes durante a impressão, de acordo com os valores demarcados na Figura 20, permitindo que seja escolhida a melhor temperatura. Pode-se ver na Figura 29 que a temperatura ideal para o PETG ficou por volta dos 250°C, já que foi a região com a menor geração de *stringing*. Já na Figura 30 é possível ver que a temperatura ideal para o PLA foi em torno de 210°C, sendo a que resultou no melhor acabamento dos *overhangs* e menor *stringing*,

Figura 29 – Torre de temperatura para PETG

Fonte: O autor

Figura 30 - Torre de temperatura para PLA



Fonte: O autor

3.3.3 Parâmetros finais adotados

Com isso, os parâmetros que foram utilizados nas impressões dos corpos de prova podem ser vistos na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para imprimir os corpos de prova em PETG

Cubo em PETG	
Parâmetro	3D Fila
Bico	Latão de 0,4mm
Altura de camada (mm)	0,2
Largura da camada (mm)	0,4
Camadas sólidas de base	999
Camadas sólidas de topo	0
Paredes	3
Preenchimento (%)	Sólido
Forma de preenchimento	-
Distância de retração (mm)	9
Velocidade de retração (mm/s)	75
Suportes	Desabilitado
Temperatura do bico (°C)	250
Temperatura da mesa (°C)	70
Ventilação forçada	De 0% até 100% a partir da segunda camada
Velocidade movimentações (mm/s)	60
Velocidade parede externa (mm/s)	30

Fonte: O autor.

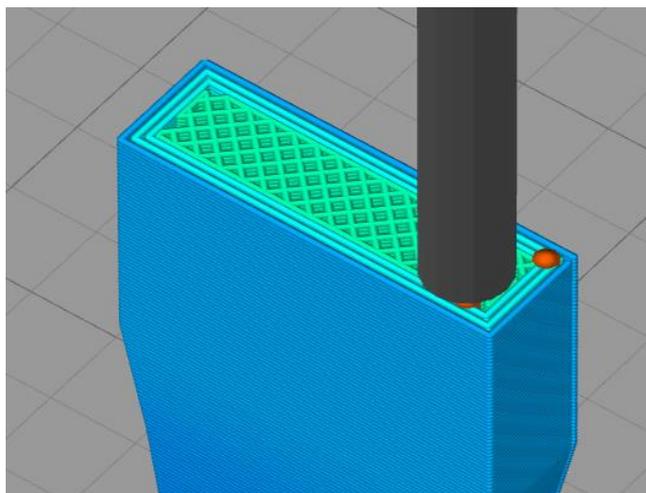
Tabela 10 - Parâmetros utilizados para imprimir os corpos de prova em PLA

Cubo em PLA	
Parâmetro	3D Fila e Slim 3D
Bico	Latão de 0,4mm
Altura de camada (mm)	0,2
Largura da camada (mm)	0,4
Camadas sólidas de base	999
Camadas sólidas de topo	0
Paredes	3
Preenchimento (%)	Sólido
Forma de preenchimento	-
Distância de retração (mm)	9
Velocidade de retração (mm/s)	75
Suportes	Desabilitado
Temperatura do bico (°C)	210
Temperatura da mesa (°C)	60
Ventilação forçada	De 0% até 100% a partir da segunda camada
Velocidade movimentações (mm/s)	60
Velocidade parede externa (mm/s)	30

Fonte: O autor.

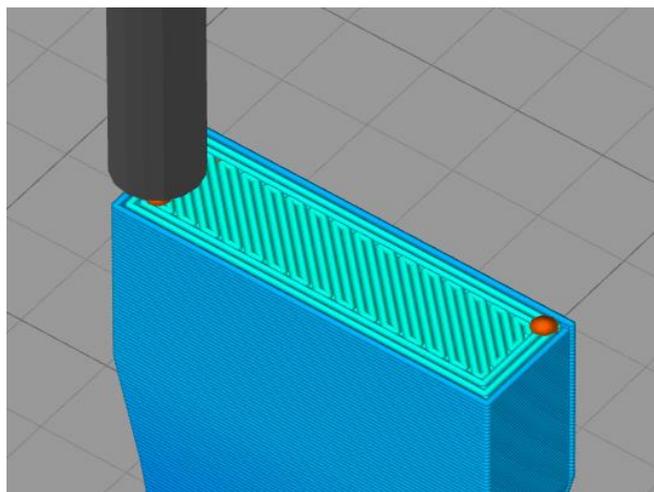
Para conseguir obter o preenchimento sólido da peça, foi adotada a estratégia de utilizar um número de camadas de base total superior ao número máximo de camadas da peça. O corpo de prova, com uma altura de camada de 0,2 mm e sendo impresso na vertical, possui um total de 825 camadas, tendo sido programadas um total de 999 camadas de base, com 0 camadas de topo. Caso fosse mantido o padrão de 4 camadas de base e 4 camadas de topo, mesmo com o preenchimento configurado a 100%, o resultado da peça final não seria um objeto sólido, conforme pode ser visto na Figura 31. A Figura 32 mostra o resultado de utilizar um número de camadas de base superior ao total de camadas da peça, sendo um objeto final realmente maciço.

Figura 31 - Exemplo do corpo de prova com preenchimento configurado em 100%



Fonte: O autor.

Figura 32 - Resultado da configuração de um número de camadas de base superior ao total de camadas da peça



Fonte: O autor.

3.4 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado nos laboratórios da Unisinos, na máquina MTS 370. Os parâmetros utilizados para realizar o ensaio estão de acordo com a ASTM D638 (2014). Foram testadas um total de 5 amostras para cada variação de velocidade de rotação do *cooler*, conforme mostrado nas Tabela 11 e Tabela 12. De acordo com o fabricante do *cooler*, a vazão máxima obtida é de aproximadamente 17 m³/h, que corresponde ao valor de 100% da tabela.

Tabela 11 - Total de ensaios de tração a serem realizados no sentido vertical

Velocidade (%)		Quantidade de ensaios				
		0	10	25	50	100
PLA	3D Fila	5	5	5	5	5
	3D Prime	5	5	5	5	5
PETG	3D Fila	5	5	5	5	5

Fonte: O autor

Tabela 12 - Total de ensaios de tração a serem realizados no sentido horizontal

Velocidade (%)		Quantidade de ensaios	
		0	100
PLA	3D Fila	5	5
	3D Prime	5	5
PETG	3D Fila	5	5

Fonte: O autor

Na Tabela 13, se apresentam as velocidades de ensaio indicadas para os diferentes tipos de corpos de prova de acordo com a ASTM D638. Para materiais rígidos e semirrígidos com corpo de prova de Tipo I, a velocidade do ensaio é de 5 mm/min.

Tabela 13 - Velocidades recomendadas para o ensaio de tração pela ASTM D638

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
	IV	500 (20) ± 10 %	10
		5 (0.2) ± 25 %	0.15
	V	50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
1 (0.05) ± 25 %		0.1	
Nonrigid	III	10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
		50 (2) ± 10 %	1
	IV	500 (20) ± 10 %	10
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

Fonte: ASTM (2014)

Segundo Garcia, Alvares e Santos (2012), é possível calcular o módulo de tenacidade e elasticidade do material após o ensaio. Para determinar o módulo de elasticidade, deve ser realizado o somatório de elementos de área na curva tensão-deformação, utilizando os valores de tensão e deformação de cada momento verificado pelo equipamento de ensaio e aplicados nas Equações 1 e 2.

Para o módulo de elasticidade, é necessário primeiro realizar uma aproximação da curva tensão-deformação para uma reta através da regressão linear. Após isso, o módulo de elasticidade é calculado de forma simples com os novos valores de deformação encontrados, conforme a Equação 3.

$$\Delta U_t = \left(\frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{2} \right) \cdot (\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i) \quad (1)$$

$$U_t = \sum_i^N \Delta U_{t_i} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Com isso, foram construídos os gráficos tensão vs deformação para todos os ensaios realizados, que foram analisados visando determinar qual é a melhor relação entre a velocidade de rotação do *cooler* de resfriamento e a resistência mecânica da peça final.

3.5 Sentido de impressão

Para analisar os dois principais eixos de anisotropia das peças fabricadas via manufatura aditiva, foram impressos corpos de prova na horizontal e na vertical. Assim, durante os ensaios de tração, os corpos de prova fabricados na horizontal sofrerão as forças do ensaio em um sentido perpendicular as linhas de impressão e os corpos de prova fabricados na vertical sofrerão as forças no mesmo sentido das camadas de impressão.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Ensaios de tração

4.1.1 PLA 3D Fila

Iniciou-se realizando os ensaios de tração para 5 corpos de prova impressos na vertical (para cada variação de velocidade e material), onde foram demarcadas a região central das peças para realizar a medição de alongamento, assim como foram realizadas as medidas de largura e espessura da região onde ocorreu a ruptura.

Na Figura 33 estão expostos alguns dos corpos de prova feitos em PLA da 3D Fila após os ensaios, onde se pode ver que os corpos de prova de número 33 e 37 acabaram sofrendo a ruptura fora da região desejada, conforme evidenciado na Figura 34. Esses dois corpos de prova foram rejeitados.

Figura 33 – Alguns dos corpos de prova do ensaio de tração para PLA 3D Fila



Fonte : O autor

Figura 34 – Corpo de prova onde ocorreu quebra fora da região desejada



Fonte : O autor

Na Tabela 14 estão os valores da tensão de escoamento e de ruptura obtidos durante os ensaios de tração para os corpos de prova impressos na vertical. Não ocorreu variação da tensão de escoamento para a tensão de ruptura nos ensaios realizados.

Tabela 14 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PLA 3D Fila na vertical

PLA 3D Fila - Vertical					
Tensão de escoamento e de ruptura (MPa)					
Velocidade (%)	0	10	25	50	100
CP 1	39,7	35,4	28,53	25	24,17
CP 2	39,4	36,1	28,79	25,7	25,3
CP 3	39,9	35,7	29,62	26,5	-
CP 4	39,8	36,97	29,2	24,7	24,3
CP 5	39,5	37	30,6	-	26
Média	39,66	36,234	29,348	25,475	24,943
Desvio P	±0,207364	±0,729232	±0,813001	±0, 8016	±0, 8671

Fonte : O autor

Na Tabela 15 estão os valores da tensão de escoamento e de ruptura obtidos durante os ensaios de tração para os corpos de prova impressos na horizontal. Não ocorreu variação da tensão de escoamento para a tensão de ruptura nos ensaios realizados.

Tabela 15 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PLA 3D Fila na horizontal

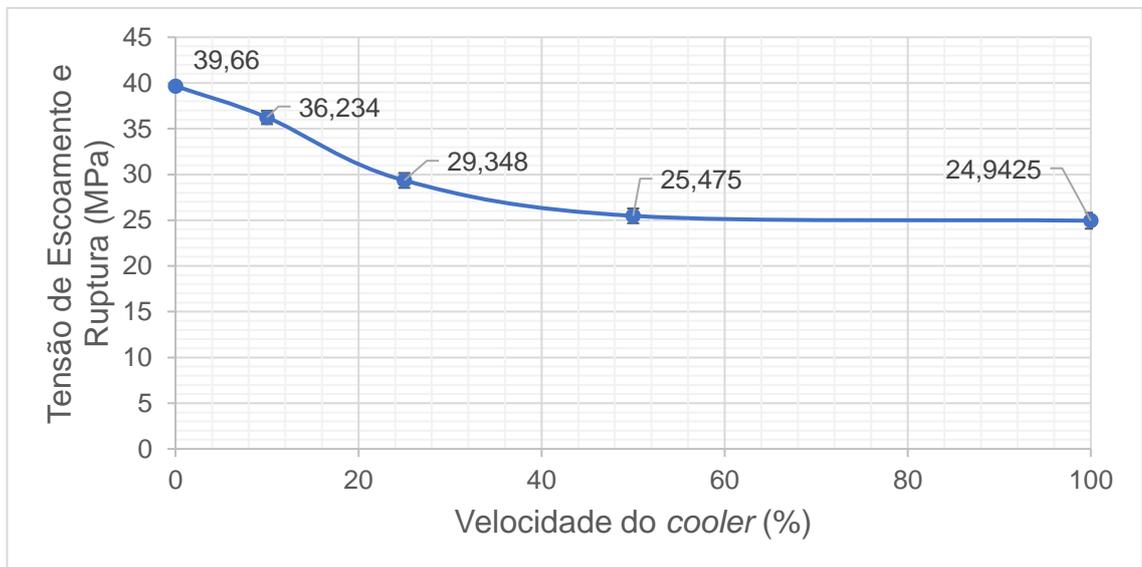
PLA 3D Fila - Horizontal		
Tensão de escoamento e de ruptura (MPa)		
Velocidade (%)	0	100
CP 1	45,9	42,2
CP 2	45,2	41,9
CP 3	44,7	40,7
CP 4	44,7	41,4
CP 5	45,9	40,9
Média	45,28	41,42
Desvio P	±0,601664	±0,637966

Fonte : O autor

Comparando esses resultados com os valores fornecidos pelo fabricante, que podem ser vistos na Tabela 4, os valores obtidos são similares com os resultados dos testes realizados com o *cooler* ligado acima de 50%. Considerando que uma das recomendações do fabricante é a refrigeração forçada a 100% a partir da segunda camada, conforme mostrado na Tabela 2, é possível assumir que esse parâmetro realmente foi utilizado, ficando condizente com os valores obtidos no ensaio. Analisando o cenário com o *cooler* desligado, ou nas impressões na horizontal, os valores obtidos foram superiores aos fornecidos pelo fabricante.

Já nas Figura 35 e Figura 36, podem-se observar os gráficos gerados com a relação entre a velocidade do *cooler* e os valores de tensão de escoamento e ruptura obtidos. Na Figura 35, se tem o gráfico para os materiais impressos na vertical, sendo possível ver que o *cooler* ligado afeta drasticamente a força de adesão entre as camadas, resultando em uma diminuição de até 40% na tensão de escoamento e ruptura na região com a velocidade do *cooler* entre 0 e 40%.

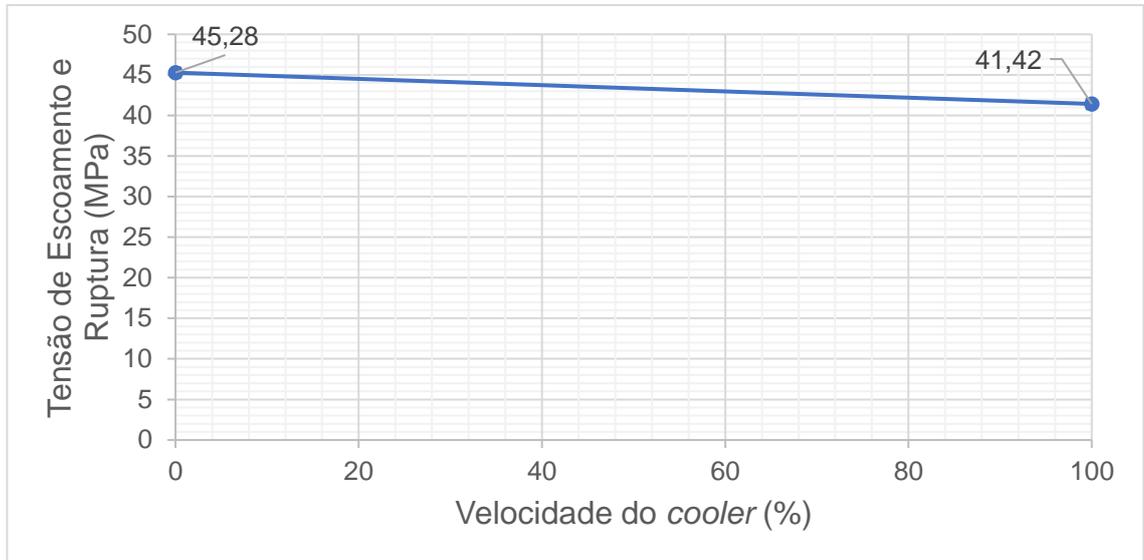
Figura 35 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do *cooler* para PLA 3D Fila fabricado na vertical



Fonte : O autor

Pode-se ver na Figura 36 o gráfico referente aos corpos de prova que foram impressos na horizontal, onde o resfriamento forçado não teve um impacto significativo, sofrendo uma redução máxima de aproximadamente 8,5% na tensão de escoamento e ruptura.

Figura 36 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do cooler para PLA 3D Fila fabricado na horizontal



Fonte : O autor

Comparando os resultados obtidos entre as peças fabricadas na horizontal vs na vertical, com o cooler desligado as peças fabricadas na horizontal têm uma tensão de escoamento e ruptura aproximadamente 12% superior as peças fabricadas na vertical. Já quando o cooler está em 100%, as peças fabricadas na horizontal têm a tensão de escoamento e ruptura cerca de 40% superior as fabricadas na horizontal.

Além da diferença na tensão de escoamento, não ocorreram diferenças no alongamento máximo dos corpos de prova. Todos os que foram fabricados na vertical quebraram nas regiões entre as camadas, conforme pode ser visto na Figura 33. Para os corpos de prova fabricados na horizontal, também não ocorreram diferenças no alongamento máximo, conforme Figura 37.

Figura 37 - Alongamento resultante nos corpos de prova fabricados na horizontal



Fonte : O autor

4.1.2 PLA Slim 3D

Os ensaios de tração foram realizados conforme o estipulado nas Tabela 11 e Tabela 12. Iniciou-se com os ensaios para 5 corpos de provas impressos na vertical (para cada variação de velocidade e material), onde foram demarcadas as regiões centrais das peças para realizar a medição de alongamento, assim como foram realizadas as medidas de largura e espessura das regiões onde ocorram as rupturas. Na Figura 38 estão expostos alguns dos corpos de prova feitos em PLA da Slim 3D após os ensaios.

Figura 38 - Alguns dos corpos de prova do ensaio de tração para PLA Slim 3D



Fonte : O autor

Ao todo, ocorreram 3 quebras fora da região determinada, uma para os corpos de prova fabricado com o *cooler* em 0%, outra para o *cooler* em 10% a e última com o *cooler* a 50%. Esses três ensaios foram descartados dos resultados analisados.

Na Tabela 16 estão os valores da tensão de escoamento e de ruptura obtidos durante os ensaios de tração para os corpos de prova impressos na vertical. Não ocorreu variação da tensão de escoamento para a tensão de ruptura nos ensaios realizados.

Tabela 16 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PLA Slim 3D na vertical

		PLA Slim 3d - Vertical				
		Tensão de escoamento e de Ruptura (MPa)				
Velocidade (%)		0	10	25	50	100
CP 1		-	35	22,5	21	20,7
CP 2		36,4	28,1	22,1	-	20,3
CP 3		37,8	31,5	23,2	21,8	18,7
CP 4		36,3	-	22,4	21,9	21,2
CP 5		38,9	31,6	23,1	22,5	21,2
Média		37,35	31,55	22,66	21,8	20,42
Desvio P		±1,2396	±2,8172	±0,4722	±0,6164	±1,033

Fonte : O autor

Na Tabela 17 estão os valores da tensão de escoamento para os corpos de provas impressos na horizontal e na Tabela 18 estão os valores de tensão de ruptura. Pode-se ver que ocorreu uma pequena variação na tensão de ruptura para os corpos de prova fabricados com o *cooler* desligado, onde iniciou a ocorrer uma zona de deformação plástica e logo ocorreu a ruptura. Para os corpos fabricados com o *cooler* ligado no máximo, a tensão de ruptura ficou igual a de escoamento.

Tabela 17 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento do PLA Slim 3D na horizontal

		PLA Slim 3D - Horizontal	
		Tensão de escoamento (MPa)	
Velocidade (%)		0	100
CP 1		51,9	44,9
CP 2		48,8	45,9
CP 3		47	44,4
CP 4		48,6	44,1
CP 5		48,9	45,9
Média		49,04	45,04
Desvio P		±1,7757	±0,8355

Fonte : O autor

Tabela 18 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de ruptura do PLA Slim 3D na horizontal

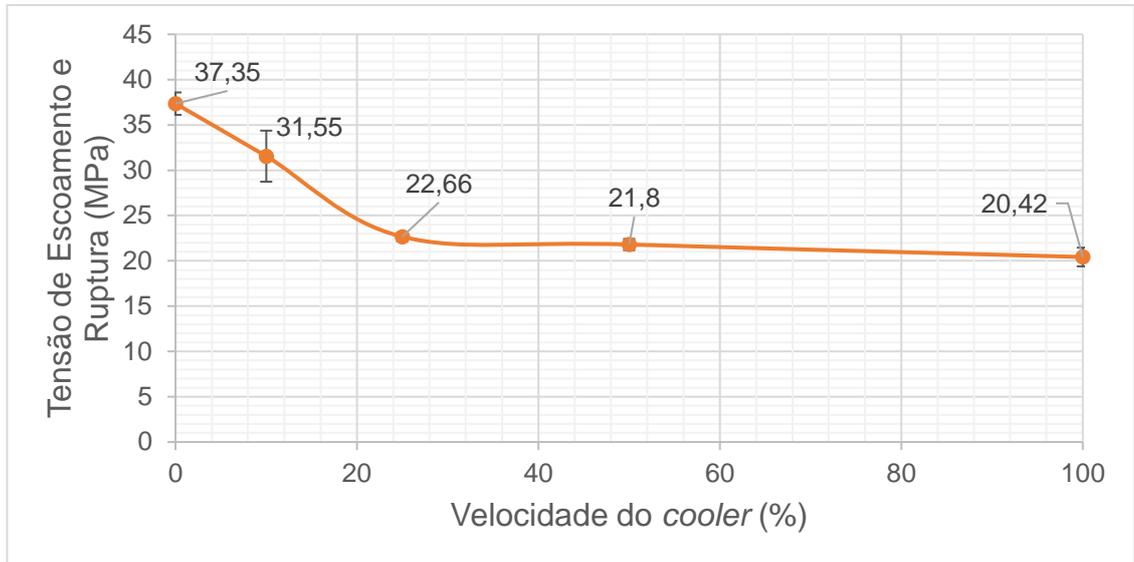
	PLA Slim 3D - Horizontal	
	Tensão de ruptura (MPa)	
Velocidade (%)	0	100
CP 1	51,9	44,9
CP 2	46,6	45,9
CP 3	42	44,4
CP 4	45,8	44,1
CP 5	44,5	45,9
Média	46,16	45,04
Desvio P	±3,65	±0,84

Fonte : O autor

O valor de tensão de ruptura fornecido pelo fabricante, que pode ser visto na Figura 14, é bem diferente do valor obtido nos ensaios. Um dos motivos para isso pode ser a diferença da norma base utilizada para os ensaios. O fabricante seguiu a norma ISO 527. Portanto, esses valores não podem ser comparados com os resultados obtidos nos testes realizados.

Já nas Figura 39 e Figura 40, podem-se observar os gráficos gerados com a relação entre a velocidade do *cooler* e os valores de tensão de escoamento obtidos para o PLA Slim 3D. O gráfico para os materiais impressos na vertical, Figura 39, mostra que o *cooler* ligado afeta drasticamente a força de adesão entre as camadas, resultando em uma diminuição de até 40% na tensão de escoamento na região com a velocidade do *cooler* entre 0 e 25%. A diminuição da tensão nessa região é praticamente linear, até praticamente estabilizar para as velocidades do *cooler* entre 25% e 100%.

Figura 39 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do cooler para PLA Slim 3D fabricado na vertical



Fonte : O autor

Na Figura 40, pode-se ver o gráfico para os corpos de prova que foram impressos na horizontal, onde o resfriamento forçado não teve um impacto significativo sofrendo uma redução máxima de aproximadamente 8,2% na tensão de escoamento e de 2,5% na tensão de ruptura.

Figura 40 - Tensão de escoamento e ruptura vs velocidade do cooler para PLA Slim 3D fabricado na horizontal

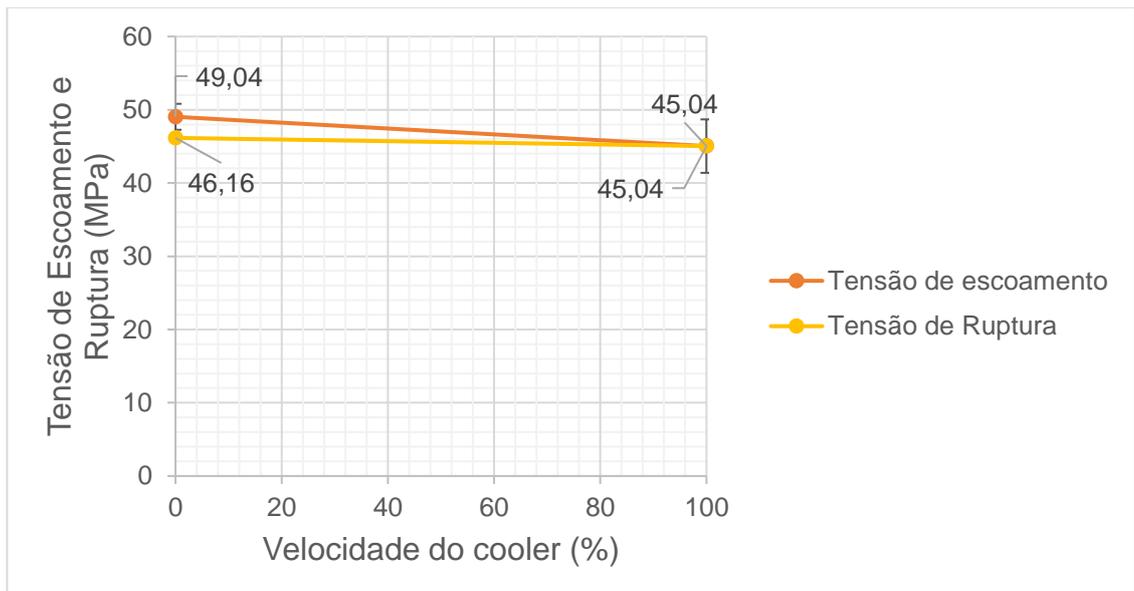
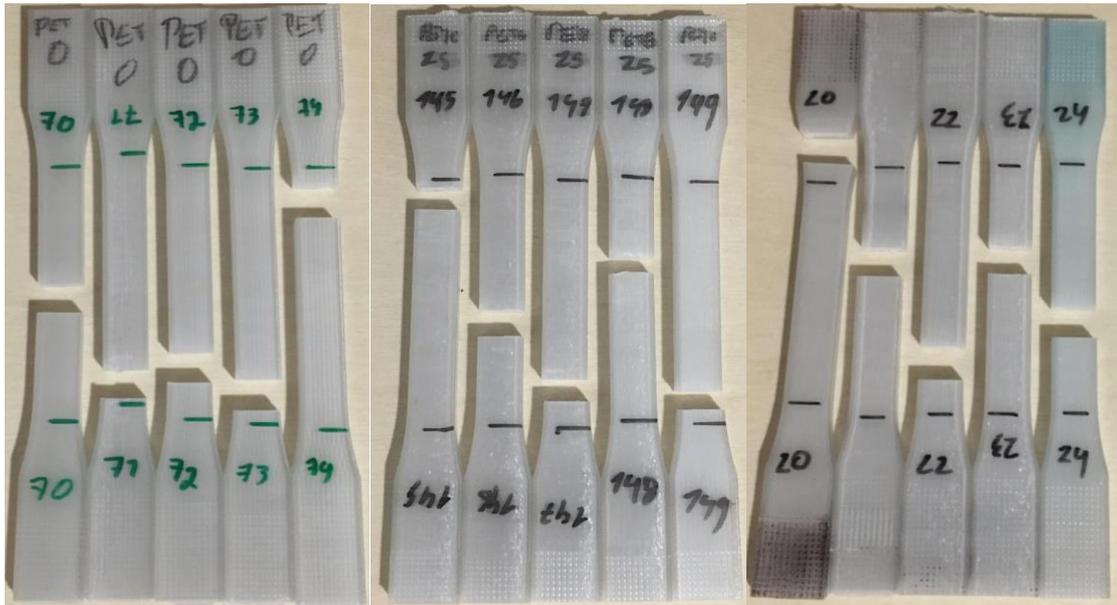


Figura 42 - Alguns dos corpos de prova do ensaio de tração para PETG 3D Fila



Fonte : O autor

Ao todo, ocorreram 4 quebras fora da região determinada, duas para os corpos de prova fabricado com o *cooler* em 10%, outra para o *cooler* em 50% a e última com o *cooler* a 100%. Esses três ensaios foram descartados dos resultados analisados.

Na Tabela 19 estão os valores da tensão de escoamento e de ruptura obtidos durante os ensaios de tração para os corpos de prova impressos na vertical. Não ocorreu variação da tensão de escoamento para a tensão de ruptura nos ensaios realizados.

Tabela 19 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento e de ruptura do PETG 3D Fila na vertical

Velocidade (%)	PETG 3D Fila - Vertical				
	Tensão de escoamento e de ruptura (MPa)				
	0	10	25	50	100
CP 1	29,3	28	25,2	22,3	19,3
CP 2	31,5	29,5	24,1	-	20,8
CP 3	32,7	-	26,6	22,5	18,4
CP 4	35	-	24,5	21,6	21,5
CP 5	34,5	27,9	27,8	22,7	-
Média	32,6	28,467	25,64	22,275	20
Desvio P	±2,3173	±0,8963	±1,5372	±0,4787	±1,4071

Fonte : O autor

Na Tabela 20 estão os valores da tensão de escoamento para os corpos de provas impressos na horizontal e na Tabela 21 estão os valores de tensão de ruptura. Pode-se ver que ocorreu uma grande variação na tensão de ruptura para os corpos de prova fabricados com o *cooler* desligado, a maioria dos corpos de prova ensaiados não chegaram a romper, tendo o ensaio interrompido pelos limites de afastamento da máquina de ensaios. Para os corpos fabricados com o *cooler* ligado no máximo, a tensão de ruptura também ficou bem abaixo da tensão de escoamento, mas ocorreu a ruptura de todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 20 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de escoamento do PETG 3D Fila na horizontal

	PETG 3D Fila - Horizontal	
	Tensão de escoamento (MPa)	
Velocidade (%)	0	100
CP 1	47,2	43,2
CP 2	48,2	42
CP 3	48,7	41,6
CP 4	47,3	41,4
CP 5	47,8	41,4
Média	47,84	41,92
Desvio P	±0,6269	±0,7563

Fonte : O autor

Tabela 21 - Resultado dos ensaios de tração para tensão de ruptura do PETG 3D Fila na horizontal

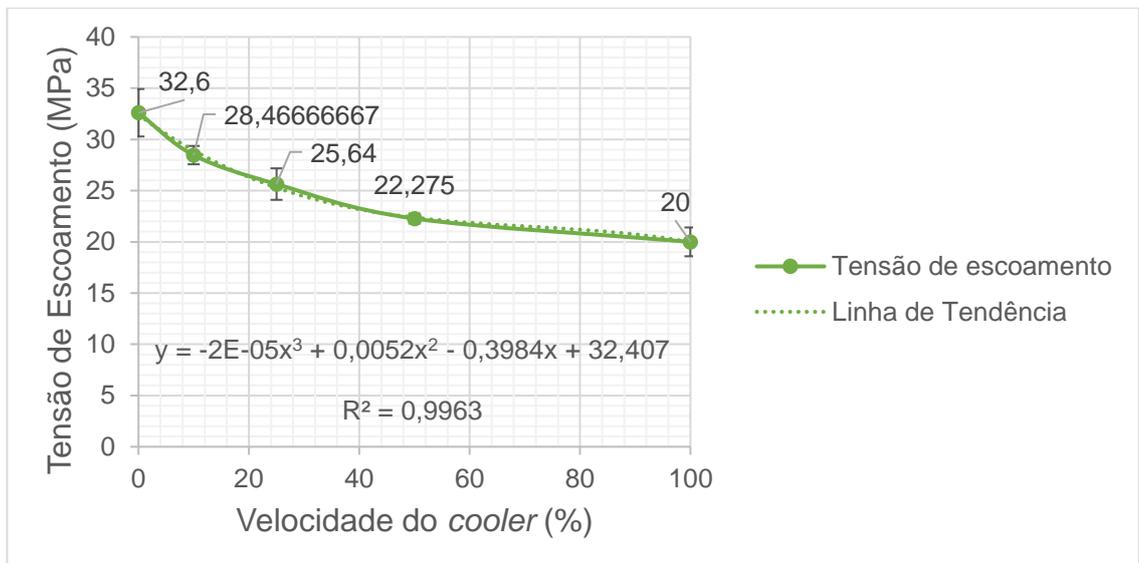
	PETG 3D Fila - Horizontal	
	Tensão de ruptura (MPa)	
Velocidade (%)	0	100
CP 1	4,8	33,5
CP 2	-	35,1
CP 3	-	26,4
CP 4	4,9	28,23
CP 5	-	32
Média	4,85	31,05
Desvio P	0,07	3,64

Fonte : O autor

Comparando esses resultados com os valores fornecidos pelo fabricante, que podem ser vistos na Tabela 5, os valores obtidos são similares com os resultados da tensão de ruptura dos corpos de prova fabricados na horizontal com o *cooler* a 100%.

Já nas Figura 43 e Figura 44, pode ser observado o comportamento da tensão de escoamento e ruptura em relação à variação da velocidade do *cooler*. Para os materiais impressos na vertical, Figura 43, se verifica que o *cooler* ligado afeta drasticamente a força de adesão entre as camadas, resultando em uma queda na tensão de escoamento e na tensão de ruptura na região com a velocidade do *cooler* entre 0 e 50%, de quase 33%. O comportamento da tensão de escoamento média ficou dentro de um padrão previsto pela equação da linha de tendência média.

Figura 43 - Tensão de escoamento vs velocidade do cooler para PETG 3D Fila fabricado na vertical

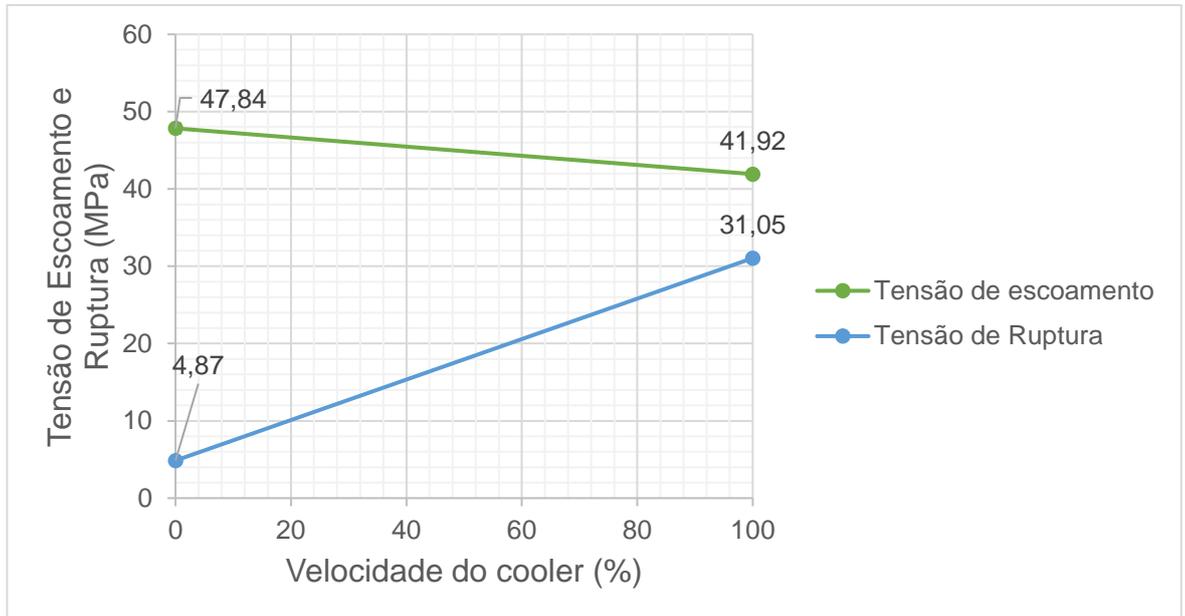


Fonte : O autor

Pode-se ver na Figura 44, que para os corpos de prova que foram impressos na horizontal o resfriamento forçado teve um impacto maior na tensão de escoamento, sofrendo uma redução máxima de aproximadamente 13%.

Já na tensão de ruptura, a maioria dos corpos de prova fabricados com o *cooler* desligados não chegaram nem a romper, com o ensaio parando pelos limites de afastamento da máquina de ensaios e para os corpos de prova fabricados com o *cooler* ligado a 100%, os valores da tensão de ruptura ficaram 26% abaixo da tensão de escoamento dos mesmos.

Figura 44 - Tensão de escoamento vs velocidade do cooler para PLA Slim 3D fabricado na horizontal



Fonte : O autor

Comparando os resultados obtidos entre as peças fabricadas na horizontal vs na vertical, com o cooler desligado as peças fabricadas na horizontal têm uma tensão de escoamento aproximadamente 32% superior as peças fabricadas na vertical. Já quando o cooler está em 100%, as peças fabricadas na horizontal têm a tensão de escoamento cerca de 52% superior as fabricadas na horizontal.

Além da diferença na tensão de escoamento, não ocorreram diferenças no alongamento máximo para os corpos de prova que foram fabricados na vertical, quebraram nas regiões entre as camadas, conforme pode ser visto na Figura 42. Já para os corpos de prova fabricados na horizontal, ocorreram diferenças significativas no alongamento máximo, conforme Figura 45.

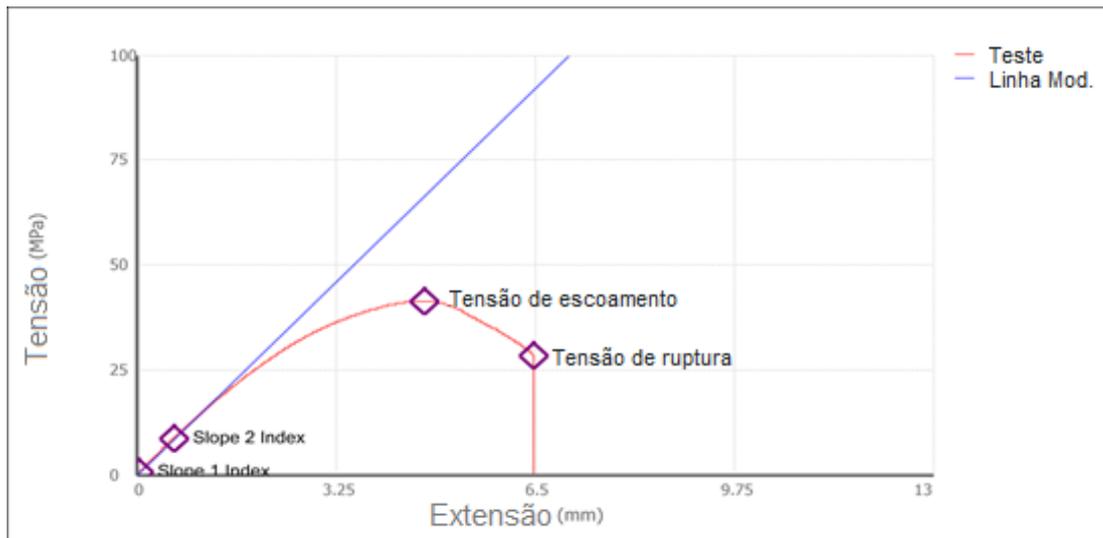
Figura 45 - Alongamento resultante nos corpos de prova fabricados na horizontal



Fonte : O autor

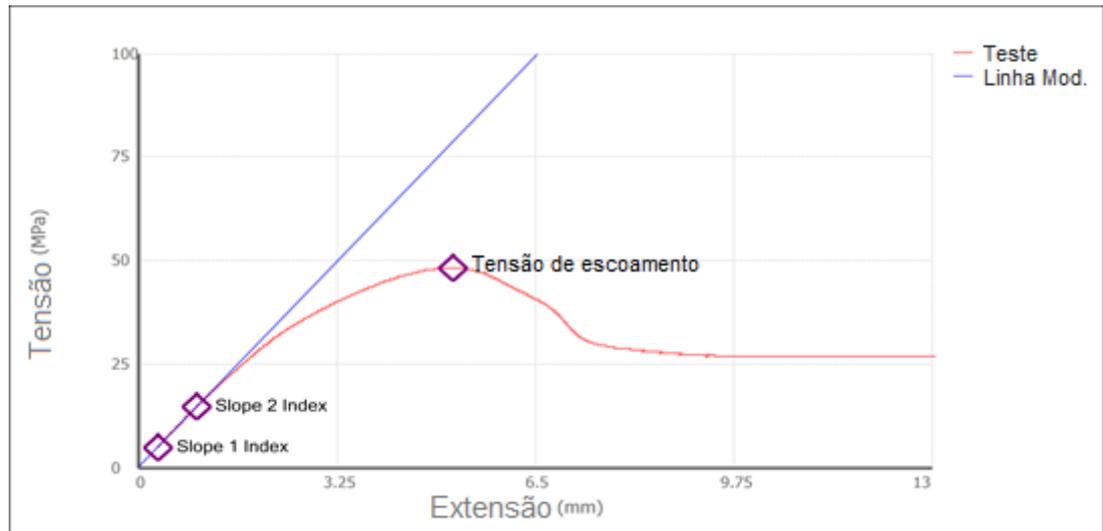
Comparando a tensão de escoamento com o deslocamento resultante do ensaio, o resultado fica ainda mais expressivo. A Figura 46 mostra o resultado comum para todos os ensaios realizados para o PETG com o *cooler* a 100% em peças fabricadas na horizontal, onde ocorreu uma pequena região de deformação plástica e então a falha e ruptura total do corpo de prova. Já na Figura 47 é possível ver os resultados para todos os ensaios realizados para o PETG com o *cooler* a 0% em peças fabricadas na horizontal, onde a maioria dos corpos de prova ensaiados não foi rompido. Comparando estes resultados com a curva tensão-deformação clássica para um polímero semicristalino, conforme Figura 48, pode-se ver que o comportamento encontrado segue exatamente o mesmo padrão de deformação e formação do “pescoço”, assim comportando-se como um corpo de prova sólido e não impresso em 3D.

Figura 46 - Tensão vs deslocamento para PETG com o *cooler* em 100%



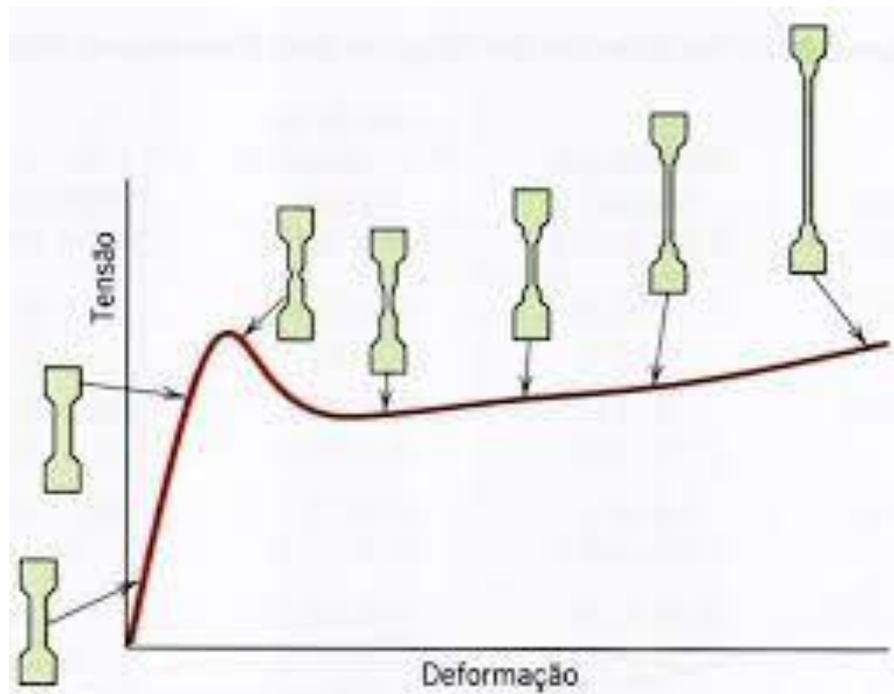
Fonte : O autor

Figura 47 - Tensão vs deslocamento para PETG com o cooler em 0%



Fonte : O autor

Figura 48 - Curva tensão-deformação clássica para um polímero semicristalino



Fonte : Callister e Rethwisch (2008)

5 CONCLUSÃO

A crescente utilização da manufatura aditiva justifica a busca pela compreensão do comportamento de peças fabricadas com esta tecnologia. Neste trabalho, buscou-se caracterizar o comportamento de diferentes materiais poliméricos, PETG e PLA, variando a velocidade do *cooler* de resfriamento da peça, permitindo assim obter uma maior compreensão do seu impacto nas peças.

O estudo foi realizado utilizando corpos de prova fabricados de acordo com a ASTM D638 (2014) e foram testadas as velocidades de rotação do *cooler* de 0%, 10%, 25%, 50% e 100% para os corpos de prova fabricados na vertical e as velocidades de 0% e 100% para os que foram fabricados na horizontal.

A partir dos ensaios de tração que foram realizados e dos resultados obtidos, foi observado que em todos os ensaios, para PETG e PLA, a tensão de escoamento máxima foi obtida para os corpos de prova fabricados com o *cooler* de resfriamento desligado. Foi analisado o material PLA de dois fabricantes diferentes, que apresentaram resultados e uma diminuição na tensão de escoamento diferentes, porém a redução máxima percentual foi muito próxima. Ficou em torno de 40% de redução entre o *cooler* desligado e ligado em velocidade máxima para as peças fabricadas na vertical e ficando perto de 9% para as peças fabricadas na horizontal. Não foi possível perceber uma diferença no alongamento entre os ensaios, já que todos sofreram a ruptura.

Para o PETG, os resultados de redução na tensão de escoamento foram de aproximadamente 33% de redução entre o *cooler* desligado e ligado em velocidade máxima para as peças fabricadas na vertical e em torno de 13% para as peças fabricadas na horizontal. Para as peças fabricadas na vertical, não foi possível perceber uma diferença no alongamento, já que todas romperam nas linhas de adesão entre as camadas. Já para as peças fabricadas na horizontal, houve uma variação significativa do alongamento. As peças fabricadas com *cooler* desligado comportam-se de acordo com o diagrama tensão-deformação clássico para materiais poliméricos semicristalinos, com a formação de um “pescoço” após a região da tensão de escoamento e sofrendo um alongamento constante, sem sofrer a ruptura do corpo de prova. Já as peças fabricadas com o *cooler* em velocidade máxima não chegaram a formar o “pescoço” e romperam-se logo após atingirem o valor da tensão de escoamento.

Também foi visto que a diferença entre as tensões de escoamento para corpos de provas fabricados com o mesmo material na horizontal e na vertical foram drasticamente diferentes e fortemente impactados pelo *cooler* de resfriamento. Com o *cooler* desligado, a diferença entre o sentido horizontal e vertical ficou entre 12% e 32% da tensão de escoamento, com o sentido horizontal sendo o mais resistente. Já com o *cooler* a 100%, a diferença entre o sentido horizontal e vertical ficou entre 40% e 55% da tensão de escoamento, com o sentido horizontal sendo o mais resistente. Isso mostra que caso se deseje uma peça com as melhores propriedades mecânicas possível, é preciso levar em conta o sentido de impressão, deixando as camadas da impressão perpendiculares as forças aplicadas na peça.

Desligar o *cooler* de resfriamento irá proporcionar uma melhor resistência mecânica, e até mesmo permitir um maior alongamento sob tração no caso do PETG. Para imprimir com o cooler desligado, é recomendando projetar a peça sem *overhangs* e com folgas maiores. A curva de queda da tensão de escoamento foi diferente para o PLA de diferentes fabricantes e para o PETG, porém a taxa máxima de redução percentual dos valores de tensão foi similar.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- a) Ampliar os estudos com outros materiais utilizados na manufatura aditiva;
- b) Analisar o impacto do *cooler* de resfriamento na precisão dimensional das peças fabricadas.
- c) Analisar o impacto do *cooler* de resfriamento nas outras propriedades mecânicas das peças.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. F. C. et al. Life Cycle Assessment of Poly(Lactic Acid) (PLA): Comparison Between Chemical Recycling, Mechanical Recycling and Composting. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 24, n. 4, p. 372–384, 2016.

ASTM. ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. **ASTM International**, p. 17, 2014.

BELLEHUMEUR, C. et al. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 6, n. 2, p. 170–178, 2004.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. [s.l.] LTC, 2008.

DUPAIX, R. B.; BOYCE, M. C. Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). **Polymer**, v. 46, n. 13, p. 4827–4838, 2005.

FRANCISZCZAK, P.; PIESOWICZ, E.; KALNIŃŠ, K. Manufacturing and properties of r-PETG/PET fibre composite – Novel approach for recycling of PETG plastic scrap into engineering compound for injection moulding. **Composites Part B: Engineering**, v. 154, n. August, p. 430–438, 2018.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. DOS. **Ensaio dos Materiais**. 2ª ed. [s.l.] LTC, 2012.

GEBHARDT, A.; HÖTTER, J.-S. **Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing**. 1. ed. [s.l.] Hanser, 2016.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Technologies Manufacturing: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. [s.l.] Springer, 2016. v. 2

GOODNO, B. J.; GERE, J. M. **Mechanics of Materials**. 9ª ed. [s.l.] Cengage Learning, 2018.

GRAMES, E. **3D Printer Fan – Do I Really Need One?** Disponível em: <<https://all3dp.com/2/3d-printer-fans-do-i-really-need-one/>>. Acesso em: 17 set. 2020.

HORVATH, J.; CAMERON, R. **Mastering 3D Printing**. 1ª ed. [s.l.] Technology in AcTion, 2014.

LACROIX, C. et al. Properties of PETG/EVA blends: 1. Viscoelastic, morphological and interfacial properties. **Polymer**, v. 37, n. 14, p. 2939–2947, 1996.

MACEDO, R. Q. DE; FERREIRA, R. T. L.; JAYACHANDRAN, K. Determination of mechanical properties of FFF 3D printed material by assessing void volume fraction, cooling rate and residual thermal stresses. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, n. 10, p. 1661–1683, 2019.

NAMPOOTHIRI, K. M.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 22, p. 8493–8501, 2010.

PIEMONTE, V.; SABATINI, S.; GIRONI, F. Chemical Recycling of PLA: A Great Opportunity Towards the Sustainable Development? **Journal of Polymers and the Environment**, v. 21, n. 3, p. 640–647, 2013.

SILVA, M. V. B. DA. **Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2018.

SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.

Temp Tower PLA, ABS, PETG. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:2493504>>. Acesso em: 21 out. 2020.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. **Assembly Automation**, v. 23, n. 4, p. 318–330, 2003.

WALSH, A. **Effects of extrusion temperature and printer nozzle speed on the tensile properties of 3d printed polylactic acid**. [s.l.] Pennsylvania State University, Tese de PhD, 2017.

WRIGHT, W. J.; ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Materials 2nd Edition**. 7^a ed. [s.l.] Cengage Learning, 2014.

XYZ 20mm Calibration Cube. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:1278865>>. Acesso em: 21 out. 2020.