

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

**Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem
Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação
Aeroespacial**

Autor: Marcus Vinicius Barros da Silva
Orientador: Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior

Brasília, DF
2018



Marcus Vinicius Barros da Silva

TÍTULO: Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior

Brasília, DF

2018



Marcus Vinicius Barros da Silva

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 04/07/2018 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior, UnB/ FGA

Orientador

Prof. Dr.: Emmanuel Pacheco Rocha Lima, UnB/ FGA

Membro Convidado

Prof. Dr.: Cristian Vendittozzi, UnB/ FGA

Membro Convidado

Brasília, DF

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, que foi fundamental durante toda a graduação, por todo apoio durante as madrugadas de estudo e pela compreensão das ausências nas reuniões de família.

À minha namorada Thainara, que me deu muito apoio psicológico para vencer as adversidades vivenciadas, que se preocupou e sempre me motivou a alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos de faculdade Alexandre, Felipe, Lays e Rennan pelas reuniões de estudo, pelo apoio e amizade que são imprescindíveis em um ambiente acadêmico.

À Universidade de Brasília e a todos os professores que participaram da minha vida acadêmica, em especial ao Manuel pelo apoio e compreensão e pela presença quase diária no laboratório devido aos ensaios. Obrigado a todos, sem vocês isto teria sido muito mais difícil.

RESUMO

A prototipagem rápida através da deposição de material fundido teve larga expansão com dispositivos que replicam grande parte de suas próprias peças, ampliando o uso e estudos em volta de projetos tridimensionais realizados a partir de modelagem em softwares de desenho assistido por computador. A construção do protótipo e caracterização mecânica são desenvolvidas neste trabalho visando agregar mais conhecimento sobre os materiais para aplicações em experimentos futuros. A caracterização mecânica determina as propriedades de um material no intuito de delimitar seu uso em certas aplicações. Os filamentos adotados para a prototipagem descritos neste estudo são o Ácido Polilático, Acrilonitrila Butadieno Estireno e o Politereftalato de Etileno Glicol. Os ensaios realizados na Universidade de Brasília foram os seguintes: tração, pêndulo de impacto izod, excitação por impulso e flexão, baseados na normatização ASTM e descritos no estudo com a finalidade de definir propriedades para o uso aeroespacial.

Palavras-chave: Prototipagem Rápida, Deposição de Material Fundido, Caracterização Mecânica.

ABSTRACT

Rapid prototyping through the fused deposition modeling has expanded rapidly with devices that replicate much of their own parts, expanding the use and studies around three-dimensional designs utilizing computer aided design software. The construction of the prototype and the mechanical characterization are developed in this work aiming to generate more knowledge about the materials for applications in future experiments. The mechanical characterization determines the properties of a material in order to delimit its use in certain applications. The filaments adopted for prototyping are Polylactic Acid, Acrylonitrile Butadiene Styrene and Ethylene Glycol Polyethylene Terephthalate. The tests carried out at the University of Brasilia were: traction, izod impact pendulum, impulse excitation and flexion, based on ASTM standardization and described in the study for the purpose of defining properties for aerospace use.

Keywords: Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, Mechanical Characterization.

LISTA DE SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – Desenho Assistido por Computador

FDM – Deposição de Material Fundido

LOM – Manufatura de Objetos Laminados

SLA - Estereolitografia

SLS – Sinterização Seletiva a Laser

PETG – Politereftalato de Etileno Glicol

PLA – Ácido Polilático

PR – Prototipagem Rápida

3DP – Impressão Tridimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ – Somatório

ν – Coeficiente de Poisson

ΔSg – Fluxo do filamento

d_t – Amplitude média do filamento

σ_f – Desvio padrão da amplitude do filamento

σ_{fl} – Tensão Flexional

π – Pi

s – Desvio Padrão

φ – Ângulo de deflexão do torque

α – Coeficiente de expansão linear

f_f – Frequência fundamental de ressonância de flexão

f_t – Frequência fundamental de ressonância de torção

ε_f – Deformação Flexional

ε_l – Deformação específica longitudinal

ε_t – Deformação específica transversal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 OBJETIVO.....	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivo Específico.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO (FDM)	17
2.2 OUTRAS TECNOLOGIAS.....	23
2.2.1 Estereolitografia (SLA)	24
2.2.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	24
2.2.3 Manufatura de Objetos Laminados (LOM)	25
2.2.4 Impressão Tridimensional (3DP).....	25
2.3 FILAMENTOS PARA MODELAGEM FDM.....	26
2.3.1 Ácido Polilático (PLA).....	27
2.3.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	28
2.3.3 Náilon	29

2.3.4 Politereftalato de Etileno Glicol (PETG)	29
2.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	30
2.4.1 Dureza.....	30
2.4.2 Tração	31
2.4.3 Flexão	34
2.4.4 Torção.....	35
2.4.5 Coeficiente térmico - Dilatômetro	38
2.4.6 Impacto de Charpy	40
2.4.7 Pêndulo de impacto Izod.....	42
2.4.8 Excitação por impulso	44
2.4.9 Vácuo.....	46
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	48
3.1. Parâmetros de Impressão.....	49
3.2. Excitação por Impulso.....	52
3.3. Tração.....	58
3.4. Flexão	64
3.5. Impacto de Charpy	67
3.6. Impacto Izod	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1. Excitação por Impulso.....	70

4.2. Tração.....	79
4.3. Flexão.....	83
4.4. Impacto Izod.....	88
5 CONCLUSÃO	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	94
APÊNDICE.....	98

1. INTRODUÇÃO

São abordadas neste capítulo as possibilidades de impressões em 3D, a evolução dos equipamentos de produção, os processos e principais sistemas de impressão precursores, assim como os objetivos deste trabalho.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Prototipagem Rápida (PR), popularmente conhecida como impressão 3D, baseia-se na construção de um objeto a partir da modelagem virtual em três dimensões via programa de Desenho Computadorizado (ANTAS, 2007; KONZEN, 2015). A aplicação da prototipagem teve um foco inicial aplicado às indústrias aeronáutica e automobilística, entretanto a prototipagem tem se expandido para áreas diversas, como a biomedicina (ANTAS, 2007; LINO, 2003). Os processos de prototipagem rápida elaboram protótipos através da deposição de material em camadas, sendo este material com características específicas para atender os requisitos através das propriedades inerentes ao material. Dentre estes materiais são utilizados aços, cerâmicas, plásticos, papéis e outros (LAFRATTA; FERREIRA, 1998).

Os métodos de desenvolvimento de produtos vêm se transformando com o tempo, incorporando os sistemas computadorizados desde sua concepção. O instrumento amplamente utilizado para gerar esses projetos é o *Computer Aided Design* - CAD, ou simplesmente Desenho Computadorizado (LEITE, 2011). Esta tecnologia adotada no projeto compõe-se de objetos tridimensionais modelados em computador, para a fabricação de peças para ensaios, sendo estas concebidas camada por camada, diferenciando-se de procedimentos convencionais, como a usinagem (CUNICO, 2008). Kai e Fai (1998) e Liou (2007) abordam que uma das características mais importantes da PR seria a produção de peças com geometria complexa de alta qualidade em relação ao modelo de origem, sendo o tempo de sua fabricação bastante reduzido comparado aos métodos de usinagem entre outros. A técnica de manufatura aditiva inicia-se com a formação do modelo tridimensional (3D) por meio de um software CAD. O arquivo desta modelagem quando concluída é convertida em formato *Standard Tessellation Language* – STL. Este arquivo com formato STL é utilizado em um programa, que fatia o objeto em diversas

camadas e níveis para ser lido pela impressora (COTTELEER; HOLDOWSKY; MAHTO, 2014).

A Prototipagem Rápida trata-se de um ramo da tecnologia focada na produção de materiais físicos, que são feitos com base no desenho computadorizado. Nesta modalidade de criação de protótipos, os materiais são desenvolvidos por camadas até obter a forma final, sendo dispensável qualquer tipo de ferramenta para sua conclusão. Estas camadas de filamento refletem a seção transversal da peça e podem ser construídas por elementos em pó, líquido ou sólido (RAJA e FERNANDES, 2008). A evolução dos computadores viabilizou o desenvolvimento de softwares CAD que então possibilitou o crescimento da prototipagem rápida que surgiu em 1987, com a primeira técnica comercial chamada de estereolitografia, que consiste em converter a modelagem computadorizada em modelos físicos de maneira consistente e acelerada (NETTO, 2003; OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2007). Estas impressões de um modelo virtual são usadas para a concepção de protótipos de maneira direta ou indireta, isso porque os modelos podem ser criados pela tecnologia de prototipagem ou elaborados pelas ferramentas que uma vez foram desenvolvidas em um processo similar, por exemplo, um molde (LAFRATTA, 2003).

A classificação das tecnologias de prototipagem rápida é organizada por três subclasses, de acordo com a forma de elemento que constrói as camadas de filamento: o sistema baseado em líquido mais difundido é o Estereolitografia (*Stereolithography Apparatus* - SLA), os principais sistemas fundamentados em sólidos são, Modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM), Manufatura de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing* - LOM), já os sistemas que utilizam pó são Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS), Impressora Tridimensional (*Tridimensional Printer* - 3DP) entre outros (VOLPATO, 2007).

O motor Kaveri, apresentado na figura 1, é um exemplo de motor que utilizou mais de 2500 peças feitas em equipamentos de sistema FDM.

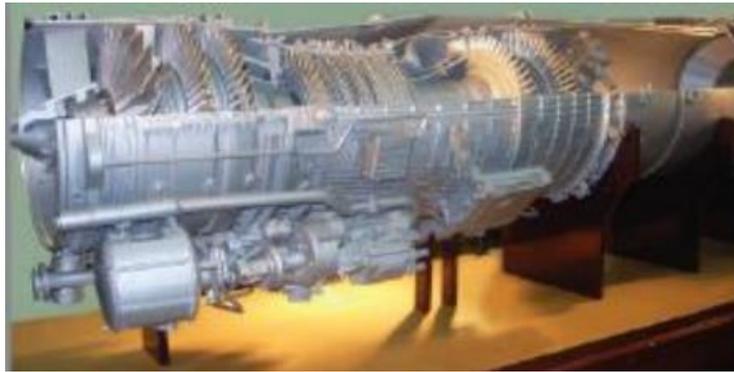


Figura 1: Motor Kaveri com peças construídas em equipamento FDM (Adaptado de YAGNIK, 2014).

Outras aplicações relevantes são relacionadas a missões da NASA como o *Mars Rover*, apresentado na figura 2, que possui 70 peças de construção complexa realizadas por um equipamento de tecnologia FDM. Algumas das peças são integralmente de material Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS (YAGNIK, 2014).



Figura 2: Mars Rover (Jet Propulsion Laboratory - NASA, 2017).

A aplicação de materiais plásticos na área aeroespacial agrega qualidade no produto desenvolvido como baixa massa e sua resistência ao fogo. Quando usado material plástico ao invés de outros materiais, há diversos quesitos que enfatizam o motivo do uso (ENSINGER, 2014):

- Redução de até 60% no peso quando comparado ao alumínio;
- Maior versatilidade de processos para plásticos em relação aos demais materiais;

- Maior liberdade no *design* dos componentes o que resulta na redução da produção e instalação;
- Resistência química;
- Resistência inerente ao fogo, no que se refere à densidade, a toxicidade e ao calor do gás liberado;
- Propriedades com excelentes características de funcionamento a seco;

O gráfico, apresentado na figura 3, mostra a relação peso percentual x anos, de materiais plásticos e compósitos utilizados na indústria aeroespacial ao longo dos anos.

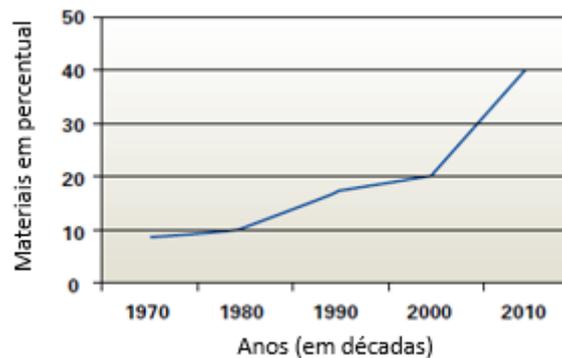


Figura 3: Relação entre uso de materiais plásticos e compósitos ao longo dos anos
(Adaptado de ENSINGER, 2014).

Como um importante exemplo de material plástico, o náilon possui aplicações claras em aeronaves, como na carenagem das portas, na composição de sistemas *slats*, *flaps* nas asas, em componentes gerais como fixadores e selantes, além de estar vastamente presente em atuadores e sistemas de controle, no sistema de trem de pouso (rodas, freios, etc.). Quanto à aplicação aeroespacial há aplicações evidentes em satélites no que tange a carenagem das antenas (radomes) (ENSINGER, 2014).

O projeto LAICAnSat desenvolvido na Universidade de Brasília, teve construção estrutural em material impresso de ácido Polilático - PLA (ALVES *et al.*, 2016). Este trabalho teve grande importância motivacional para a concepção deste estudo, tendo em vista que futuras aplicações no âmbito aeroespacial podem ter limites estruturais melhores estabelecidos.

Na modelagem, ilustrada na figura 4, o *Payload* possui a estrutura externa em PLA. Este ensaio foi aplicado à baixa altitude, não havendo exposição considerável a radiação ou vácuo.

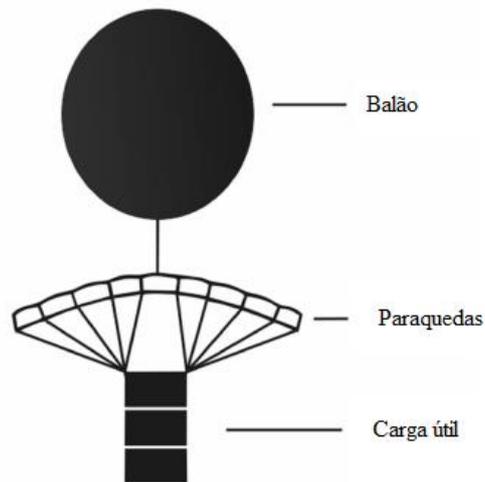


Figura 4: Modelagem do projeto LAICAnSAT (Adaptado de ALVES *et al.*, 2016).

1.2. JUSTIFICATIVA

Este tema é relevante devido à praticidade e viabilidade de materiais atualmente para o desenvolvimento de produtos complexos, sem perda de material no processo de construção, pois a indústria aeroespacial demanda projetos que tenham grande utilidade no menor espaço possível e que possam resistir a condições atmosféricas adversas. Definir as propriedades de cada material qualifica o uso, evitando perdas e problemas estruturais.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como propósito avaliar as propriedades mecânicas de materiais termoplásticos desenvolvidos pelo processo de prototipagem rápida - FDM, com o intuito de descrever as propriedades de cada material através de diversos métodos de caracterização para aplicação aeroespacial.

1.3.2. Objetivo Específico

- Fundamentar a forma de obtenção de propriedades através da análise dos corpos de prova que serão construídos em distintas orientações por FDM em testes de caracterização;
- Verificar e comparar cada peça por suas medidas e propriedades com média e desvio padrão na finalidade de assegurar uma referência para cada amostra;

- Aferir as propriedades mecânicas dos materiais que serão obtidas através dos métodos de caracterização através de ensaio de excitação por impulso, ensaio de tração, ensaio de impacto izod e ensaio de flexão;
- Avaliar a influência da velocidade de construção da peça no resultado dos testes de excitação por impulso;
- Comparar a absorção de energia dos materiais através de um pêndulo de impacto izod;
- Comparar resultados obtidos de módulo de elasticidade entre os ensaios de flexão, tração e excitação por impulso;
- Determinar o coeficiente de Poisson dos materiais através do ensaio de tração;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, toda a abordagem necessária para o ramo de impressão 3D, tanto por dispositivos de impressão, quanto pelos filamentos utilizados são evidenciados, assim como os métodos de caracterização considerados mais relevantes no estudo.

2.1. MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO - FDM

A prototipagem rápida por deposição de material fundido - FDM foi elaborada por Scott Cramp em 1988 e teve sua patente concedida em 1992, nos Estados Unidos (CHUA, LEONG e LIM, 2010). Este procedimento utiliza apenas materiais termoplásticos, no entanto, há uma grande diversidade de materiais que são normalmente adotados como ABS, Policarbonato, ceras, poliamidas e elastômeros (ANTAS, 2007).

O material termoplástico utilizado nesta prototipagem possui forma de filamentos que são envolvidos em um carretel. Para atingir um estado viscoso para impressão, o filamento é tracionado por um par de polias, empurrando o material para um canal aquecido para então ser ejetado. O processo de extrusão inicia-se através da tração do filamento provocada por um êmbolo empurrando o material por uma passagem aquecida até um bico de saída, sendo este calibrado em coordenadas do eixo cartesiano X e Y, inserindo o material sobre a plataforma de acordo com o modelo escolhido para impressão. Durante o processo contínuo de deposição de camadas, ao toque do filamento da camada superior na inferior, o material depositado já se encontra solidificado, porém a uma temperatura onde se torna viável a junção entre camadas. O eixo Z, que se eleva na medida em que as camadas são depositadas, representa a altura de uma camada (STRATASYS, 1992; GRIMM, 2004; KRETSCHEK, 2012; VOLPATO *et al.*, 2007).

O bico ejetor possui a finalidade de expelir o material para a fabricação do modelo propriamente dito, havendo a possibilidade de uso de outro bico ejetor que daria auxílio ao principal como suporte para a confecção de modelos angulados ou de geometria complexa (GRIMM, 2004; MAGALHÃES, 2010). Este bico de auxílio deposita material de suporte com construção de fácil remoção. Caso não possuísse a possibilidade de suporte, os locais de

construção não teriam apoio resultando na deposição de material em espaço inadequado (VOLPATO *et al.*, 2007; MAGALHÃES, 2010). Os principais componentes presentes na deposição de material em uma impressora 3D, encontra-se na figura 5.

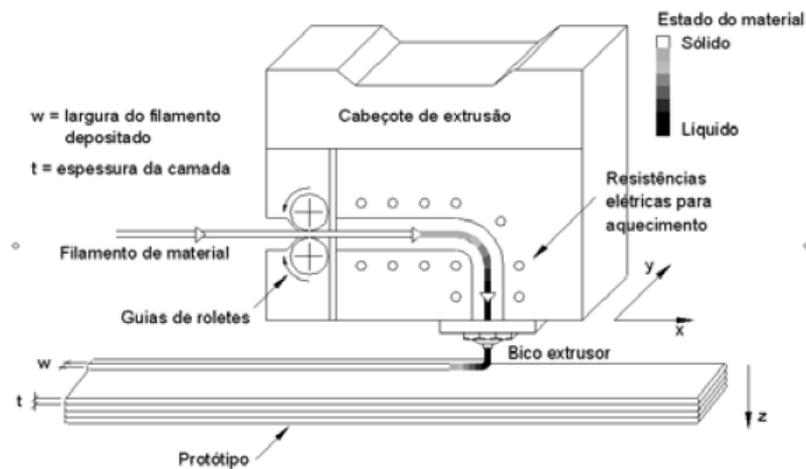


Figura 5: Representação de uma máquina FDM (Adaptado de AHN, 2002).

Dentre as principais impressoras FDM no mercado, existem as impressoras com arquitetura cartesiana e delta, como abordado na figura 6.

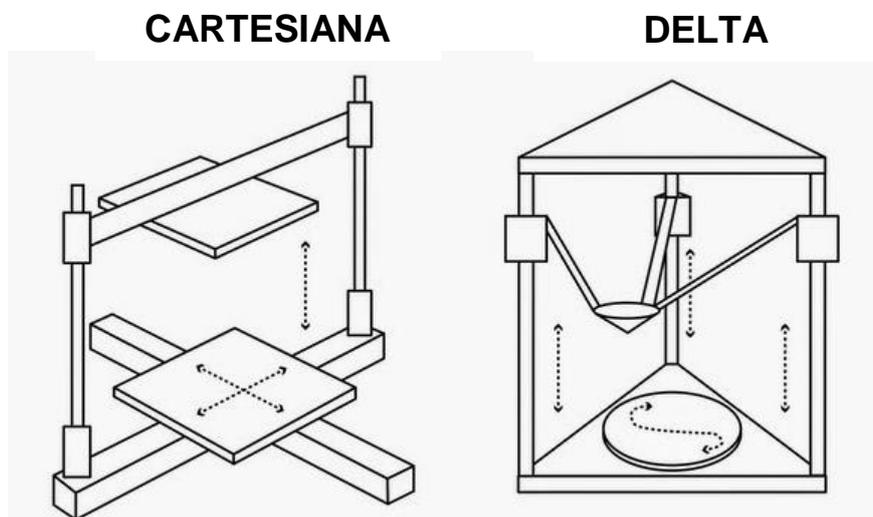


Figura 6: Modelos de impressoras 3D (Studymake, 2017 – Site de Internet).

O modelo Delta possui mesa de construção fixa, como pode ser observado na figura 7, portanto as coordenadas de construção são realizadas pelo bloco extrusor estabilizado por três hastes ligadas ao suporte lateral da impressora.



Figura 7: Impressora com arquitetura Delta (Amazon, 2017 - Site de Internet).

Os modelos de impressora cartesianos são mais conhecidos e acessíveis, amplamente disseminado pela iniciativa do projeto RepRap, ou *Replicating Rapid-Prototyper* inventado por Adrian Bowyer, que teve como objetivo popularizar o uso desses equipamentos, por ter uma organização estrutural de peças que podem ser replicáveis na própria impressora. Esta impressora cartesiana, ilustrada na figura 8, possui a mesa de construção móvel em uma direção enquanto o cabeçote extrusor se move em outra direção e as barras laterais elevam ou descem o cabeçote para construção na vertical (Reprap.org – Site de internet, 2017).

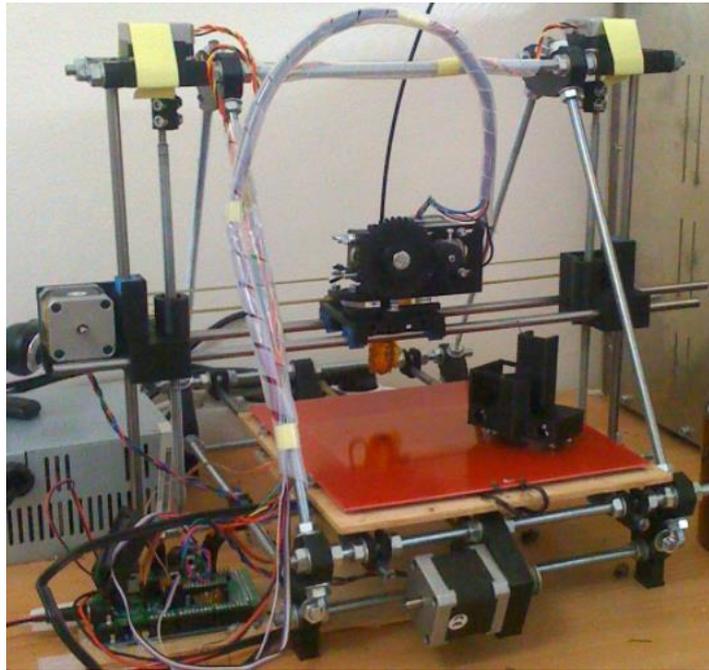


Figura 8: Impressora RepRap Prusa Mendel (RepRap.org, 2017 – Site de Internet).

Processos de prototipagem rápida como o FDM e o SLS utilizam filamentos de materiais termoplásticos como o Náilon e o ABS, que são materiais amplamente utilizados na indústria como um todo (ANTAS, 2007). A estereolitografia é o método de prototipagem rápida mais adotada atualmente, seguido pela deposição de material fundido, devido ao seu baixo valor de construção e praticidade (RAJA e FERNANDES, 2008). Este segundo processo baseia-se na construção de protótipos por meio da extrusão dos filamentos poliméricos e são aquecidos por intermédio de um cabeçote que atinge o ponto de fusão do material (CANCIGLIERI *et al.*, 2007; LEITE, 2011).

Os sistemas de controle de movimento nos eixos X e Y do processo ocorrem através de um sistema eletromagnético, chamado *magna-drive*, que permite o deslocamento do conjunto mecânico para impressão com alta precisão (CHUA, LEONG e LIM, 2010).

A concepção das camadas no processo FDM inicia-se com a demarcação do contorno da seção transversal do protótipo. Este delineamento deve ser fechado fazendo com que os pontos de começo e conclusão do processo sejam simultâneos. Tendo esta etapa realizada, o preenchimento interno da peça inicia-se (LIMA, 2009). Segundo Chua, Leong e Lim (2010), a forma de elaboração de peças por meio da tecnologia FDM é lenta, pois devido

à taxa de extrusão ou fluxo de material que passa pelo cabeçote extrusor a velocidade de construção é baixa. Dentre as possibilidades de preenchimento há três possibilidades sendo estas do tipo contorno, varredura e uma combinação entre as duas (BELLINI e GÜÇERI, 2003; VOLPATO, 2007; LIMA, 2009).

Chua, Leong e Lim (2010) determinam os tipos de preenchimento como Varreduram, Contorno e Duplo:

- Varredura possui a característica de posicionar os filamentos em paralelo, exercendo um preenchimento em ziguezague;
- Contorno caracteriza-se pelo preenchimento feito em ciclos com mesma distância na deposição do material;
- Duplo representa o arranjo entre os dois métodos de preenchimento citados a cima.

Os padrões exercidos que coordenam a fabricação no processo FDM são a quantidade de contornos, a largura do contorno, ângulo de varredura, a espessura de cada camada, orientação de construção e espaçamentos (BRANDÃO e SANT'ANNA, 2005; SANTANA, 2015). Além dos padrões mencionados, outro fator que apresenta grande importância é a temperatura de extrusão que diz a respeito da temperatura no bico da extrusora e da temperatura de envelope que trata da temperatura no interior da câmara de construção (MAGALHÃES, 2010; STEPHEN *et al.*, 2013).

No que tange a importância dos padrões no processo de prototipagem FDM, alguns dados são relevantes como no caso de uma peça que tenha um alto número de camadas, ocorrerá um elevado gradiente de temperatura direcionado ao interior do protótipo, ocasionando maior propagação entre os filamentos, conseqüentemente elevando a resistência mecânica do material. Porém em casos de temperaturas onde excede o limite do material, poderá haver distorções entre uma camada e outra ou internamente em cada camada. Ainda sobre o número de camadas, podem ocorrer distorções, delaminação e até mesmo fendas entre camadas quando há uma associação de tensões residuais devido ao grande número de camadas resultando em aquecimentos e resfriamentos constantes (SOOD *et al.*, 2010).

Durante o processo podem ocorrer contrações do material devido a arrefecimentos repentinos que distorcem o material, prejudicando suas propriedades (CHUA; LEONG; LIM, 2010).

O provimento constante de material por este método de prototipagem corrobora na redução de perda de material, tornando eficiente a elaboração do modelo quando configurado desta forma. O processo FDM possui o privilégio de permitir o uso de mais materiais concomitantemente, podendo assim aumentar as propriedades mecânicas do protótipo, contudo estes materiais devem ser compatíveis quanto às propriedades químicas (ANTAS, 2007). De acordo com a patente reivindicada pela companhia *Stratasys*, no processo de extrusão caso haja um erro no fluxo volumétrico este está relacionado ao diâmetro do filamento. A equação 1, abordada a seguir, trata sobre o movimento médio na região de fusão no cabeçote extrusor durante alterações no fluxo do filamento (ΔSg), a amplitude média do filamento (d_t) e o desvio padrão da amplitude (σ_f) (SANTANA, 2015).

$$V_{erro} = \frac{3\pi\Delta Sg\sigma_f d_t}{2} \quad (1)$$

Esta formulação descreve que o erro no fluxo de material está relacionada à (d_t) e (σ_f), quanto maior forem, maior será o erro (SANTANA, 2015).

Um material compósito de fibras possui uma estrutura que aparenta um modelo fabricado por FDM, pois como as fibras que se encontram em compósitos, os filamentos dispõem de alta resistência na direção axial, porém com uma menor firmeza nas regiões de junção entre filamentos e entre camadas. Os modelos construídos possuem característica anisotrópica (BELLINI e GÜÇERI, 2003). A anisotropia apresenta a particularidade de ter propriedades mecânicas distintas para cada eixo de construção, sendo este um dos aspectos mais relevantes no sistema de manufatura aditiva. Percebe-se com maior clareza a anisotropia no eixo Z, onde a estruturação do material agregado é mais frágil que nos outros dois eixos na mesma camada (VOLPATO *et al.*, 2007).

Concentradores de tensão podem ocorrer devido a uma possível fraca soldabilidade entre camadas do modelo o que provoca baixa resistência mecânica quando elaborada uma peça para ensaio mecânico. A espessura da camada torna-se importante quando analisada a resistência mecânica da peça, tendo em vista que quanto maior a espessura, maior a resistência, frisando que o acúmulo de vazios entre camadas corroboram para a classificação de anisotropia dos modelos impressos (PERES, 2016).

Estes vazios, presente na figura 9, surgem no tipo de preenchimento por contorno, quando há um fluxo escasso de material para preencher o volume proposto. Um dos métodos para correção desta possível falha seria aumentar a deposição de material nos locais de interseção (SANTANA, 2015). De modo geral, os materiais injetados e usinados possuem uma resistência mecânica maior do que os materiais construídos por impressão 3D (PERES, 2016).

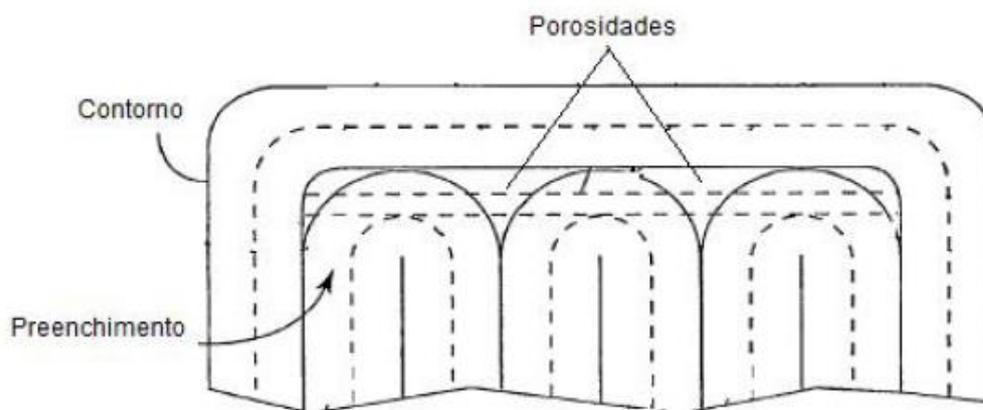


Figura 9: Vazios gerados entre regiões de contorno e varredura (Adaptado de HOLZWARTH, 2006).

2.2. OUTRAS TECNOLOGIAS DE RP

Atualmente há diversos processos de Prototipagem Rápida, sendo mais de trinta tipos, apesar de grande parte não estarem disponíveis para venda (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2007). No entanto além do processo FDM serão mencionados somente alguns processos relevantes à atualidade e ao discernimento do contexto deste estudo.

2.2.1. Estereolitografia (SLA)

A empresa 3D Systems Inc. USA, desenvolveu este processo com reconhecimento de patente em 1986, se tornando o primeiro processo neste ramo (ANTAS, 2007). A estereolitografia ou SLA possui um recipiente com resina, que com a exposição de materiais fotopoliméricos, o feixe de laser solidifica a região de contato. Este feixe percorre os eixos de base do sistema para elaborar a camada do modelo virtual feito em software CAD (CUNICO, 2008). Este processo de prototipagem desenvolve modelos através da superposição das camadas de resina polimérica fotossensível líquida. Basicamente os raios laser são projetados na resina solidificando os contornos do protótipo desenvolvido virtualmente (CANCIGLIERI, 2007; OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2007). Estes feixes de luz são direcionados com alta precisão por um agrupamento de espelhos, promovendo uma reação fotoquímica na resina (ANTAS, 2007).

2.2.2. Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A PR por sinterização seletiva a laser é o terceiro método mais praticado no mercado, tendo sua patente reconhecida em 1989, este processo é comercializado desde 1992 (CHUA; LEONG; LIM, 2010). Este maquinário forma a peça através da geometria virtual em CAD, fundamentada em superposição de camadas de polímero em pó, concretizando a construção do objeto tridimensional (CANCIGLIERI *et al.*, 2007). Através de um laser a base de dióxido de carbono gera-se calor que sinteriza as camadas superpostas por meio de reação química (PEREIRA, 2007).

Semelhante ao processo de estereolitografia, este utiliza um conjunto de espelhos, onde um feixe de laser de dióxido de carbono é conduzido por um sistema eletromecânico, cometendo uma fusão parcial nos pós, sendo todo o sistema controlado por um procedimento computacional. Este procedimento que sinteriza pós bastante finos de material termoplástico, são unidos por varrimento do feixe de luz (ANTAS, 2007).

2.2.3. Manufatura de Objetos Laminados (LOM)

Desenvolvido por Michael Feygin, em 1985, este processo está entre os 4 processos de prototipagem rápida mais primitivo, lida com um laser de dióxido de carbono fabricando peças tridimensionais por folhas de papel cortadas (ANTAS, 2007). Este equipamento possui características similares aos processos mencionados anteriormente tendo seu controle através de um dispositivo eletromecânico e espelhos que direcionam os feixes realizando cortes que delimitam o contorno da peça desenvolvendo também uma moldura que abriga o conjunto em construção. O aparelho desenrola um papel com cola termoplástica impregnado na região interna da peça, esta peça é feita em laminas na parte superior da plataforma de edificação do modelo tridimensional (CHUA, LEONG e LIM, 2010).

Portanto os protótipos são desenvolvidos através da fixação, camada por camada, em sucessivas folhas de papel, onde os contornos são realizados pelo feixe de laser (ALVES, 2001). Este processo se diferencia dos demais devido à característica de empilhamento de camadas e então o corte a laser dos contornos, sendo os possíveis materiais adotados papel comum, compósitos e plásticos (GRIMM, 2004).

2.2.4. Impressão Tridimensional (3DP)

Desenvolvida por Michel Cima e Emmanuel Sachs e patenteada pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), em 1994. Este equipamento possui um recipiente que armazena pó cerâmico ou pó polimérico, tendo o deslocamento de construção no eixo Z, alguns dos componentes deste dispositivo são um rolo para restituição de material e regulação do pó a ser aglutinado nas camadas e a cabeça de impressão provida de aglutinante (ANTAS, 2007). Um jato líquido é utilizado como agente aglutinador neste processo, onde as peças são construídas com materiais fundamentados em pó (ALVES, 2001). Este processo se mostra bastante eclético como outros processos de prototipagem, devido à aplicação dos protótipos serem viáveis para diversas áreas, como na indústria médica, aeroespacial, telecomunicações e outras (CHUA, LEONG e LIM, 2010).

Um inconveniente deste procedimento pode ser o fato que as superfícies do produto final não possuem bom acabamento devido ao formato de grãos do material, com alta rugosidade (ANTAS, 2007).

2.3. FILAMENTOS PARA MODELAGEM FDM

Os filamentos possuem algumas características que devem ser compreendidas, como a relevância da união entre filamentos, pois esta pode ocorrer de duas maneiras, dentro das camadas, ocorrendo como adesão lateral entre filamentos e junção entre camadas, ou seja, conjugação entre camadas (GURRALA e REGALLA, 2014). A qualidade da adesão entre os filamentos é uma condição relevante quanto a integridade dos modelos a serem projetados, afetando diretamente as propriedades mecânicas do material (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004). A aglutinação ocorre devido a energia térmica do material. A qualidade da união é aferida analisando o “pescoço” formado entre os filamentos com junção lateral e a propagação em escala molecular (SUN *et al.*, 2008). A figura 10 enfatiza (a) O contato superficial; (b) crescimento do pescoço; (c) Propagação em escala molecular.

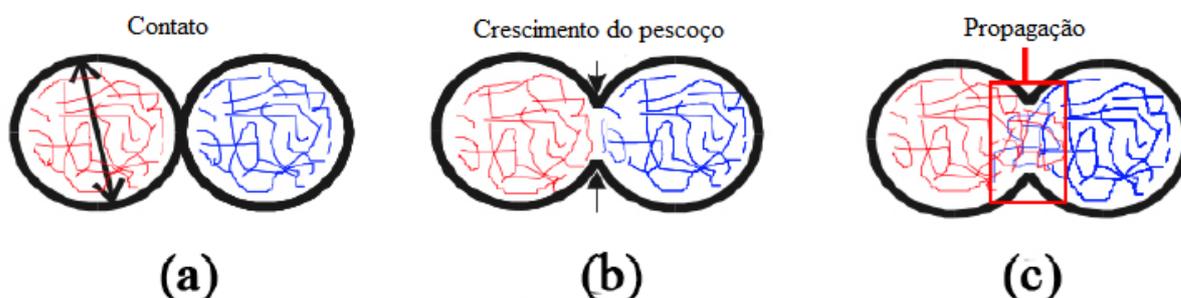


Figura 10: Forma de constituição na adesão de dois filamentos (Adaptado de SUN *et al.*, 2008).

Na deposição dos filamentos a temperatura na superfície está além da temperatura de transição vítrea, o que corrobora a eficiência de adesão entre filamentos. Portanto após a ejeção do material da extrusora, verifica-se o melhor momento de aglutinação do material (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004).

Todos os materiais que são utilizados neste trabalho necessitam de um ambiente de estocagem selado com sílica gel, tendo em vista a higroscopia presente nos materiais. Esta propriedade, que se resume na característica de absorção de umidade pelo material, está mais evidente no náilon.

Uma análise feita em materiais impressos com orientação de impressão nos eixos X, Y e Z, como pode ser visto na figura 11, em prototipagem rápida por deposição de material fundido, visou perceber a resistência mecânica de cada peça. As amostras feitas para ensaio de tração tiveram resultados que apontaram que amostras construídas no eixo X tiveram melhores resultados em resistência mecânica (BAGSIK, SCHÖPPNER e KLEMP, 2010).

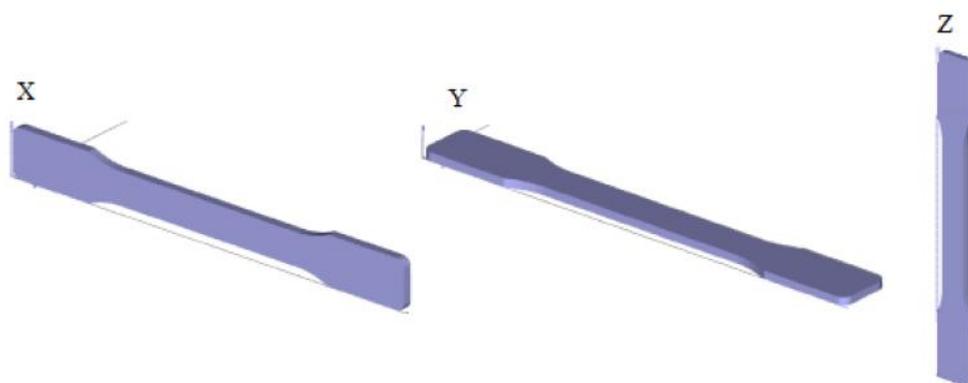


Figura 11: Orientações de impressão (Adaptado de BAGSIK, A.; SCHÖPPNER, V.; KLEMP, E., 2010).

2.3.1. Ácido Polilático - PLA

Um ramo da engenharia que utiliza materiais em aplicações biológicas, adota o polímero sintético chamado ácido polilático, devido as características do material com excelentes propriedades mecânicas, possuindo biocompatibilidade e por ser um material biodegradável (REZWAN *et al.*, 2006). Este polímero está presente na família dos poliésteres alifáticos. Insumos como arroz, milho e trigo são exemplos de fontes renováveis que são utilizados em uma síntese química do ácido lático para a produção dos filamentos em PLA. Este material é um polímero termoplástico, que apresenta boa processabilidade térmica, não toxicidade e é tipificado como um polímero semicristalino ou amorfo (LIM *et al.*, 2008; SANTOS, 2011; BRITO *et al.*, 2012; KAEZMAREK e KWIATKOWSKA, 2012).

As temperaturas de transição vítrea e de fusão estão na faixa de 55°C e 175°C, respectivamente (GARLLOTA, 2001). A temperatura que é utilizada para extrusão no processamento do material está na faixa de 160° a 220°C (HAMOD, 2014). A temperatura na superfície de impressão (*Heat Bed*) desejada para a prototipagem com ácido polilático é de 70°C

(MATTERHACKERS, 2013; ALBUQUERQUE, 2014). Além das características do PLA e maior acesso ao material no mercado, este filamento comparativamente ao ABS, possui maior facilidade de uso (BARNATT, 2014).

O PLA apresenta alta fragilidade, o que delimita o uso do material em diversos casos, possuindo o aspecto de alongamento em torno de 10% na ruptura durante um ensaio de tração (BRITO et al., 2012; RASAL et al., 2010).

Na impressão por FDM, os corpos de prova podem ser impressos a uma velocidade baixa, como 5 mm/s, para ter um resultado satisfatório, pois baixas velocidades resultam em um melhor preenchimento dos espaços. Devido à baixa velocidade na deposição de camadas é possível manter o material com uma alta viscosidade fazendo com que a qualidade e consistência da impressão aumente em consequência do cisalhamento reduzido. A resistência mecânica do material impresso no eixo vertical em relação à superfície, expressa uma resistência inferior aos materiais impressos no eixo horizontal paralelo a superfície. Isto ocorre, pois no ensaio de tração como exemplo, para decorrer uma falha no material impresso horizontalmente é preciso romper o filamento, diferentemente do rompimento de camadas que ocorre para corpos de prova impressos na vertical (PERES, 2016).

2.3.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS

Acrilonitrila, Butadieno e Estireno são os três monômeros que formam o polímero ABS, sendo este um termoplástico derivado de petróleo com formação amorfo. Por este material possuir boas propriedades mecânicas, ficou popular o uso na área industrial e doméstica (ALBUQUERQUE, 2014).

O ABS porta uma peculiaridade de emitir gases nocivos, monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, quando aquecido para a impressão, porém devido à abundância do material, aspecto flexível e resistente, sua utilização se estende a várias áreas (AZIMI, 2016).

Para uma fabricação otimizada para ensaios de materiais, é desejável que o espaçamento entre os filamentos seja negativo, de forma que não haja espaços vazios (*gap*), sendo que os melhores resultados das propriedades são obtidas com ensaios onde a peça possui a orientação dos filamentos em relação à direção da carga em zero grau (AHN et al., 2002).

2.3.3. Náilon

O Náilon é um material versátil, pois consegue unir características de alta durabilidade, flexibilidade e alta resistência. O náilon possui baixo coeficiente de fricção, o que indica que é ideal para materiais quando há movimento relativo entre as partes, por exemplo em engrenagens, além de possui uma alta resistência à tração. É importante manter o filamento em local fechado com sílica para não absorção de água, pois afeta diretamente na qualidade de impressão do material (UP3D, 2017).

A importância de manter uma mesa aquecida em no mínimo 85°C se torna relevante, pois assim como no ABS pode ocorrer empenamento. Apesar da cautela necessária para impressão com este material, o náilon é considerado de fácil impressão (MATTERHACKERS STORE, 2017).

2.3.4. Politereftalato de Etileno Glicol - PETG

PETG é uma combinação durável de copolímeros, esta combinação do PET, já bem conhecido, é aglomerada com Glicol para uma durabilidade extra ao material. Este polímero possui a característica de ser mais flexível que o PLA e ABS, e mais macio. PETG para diversas aplicações terá uma característica, supostamente inquebrável, devido a sua flexibilidade e resistência. O PETG possui a característica de muito baixo encolhimento resultando em baixo empenamento da peça, boa resistência a elementos químicos, a ácidos e também resistente a água, além de não emitir odor durante a impressão, diferentemente do ABS. Este material é considerado a versão melhorada entre o PLA e o ABS, pois consegue unir a fácil impressão do PLA, a resistência do ABS além de não emitir gases tóxicos (3DLAB, 2017).

Durante a impressão é importante o uso de um *cooler* para dar melhor acabamento à peça, tendo assim pontes e quinas mais bem elaboradas que os demais materiais largamente usados. O PETG possui outra característica interessante, por ter um eficaz retardamento de chamas, onde o material acaba se distorcendo, mas não pega fogo em si (3DLAB, 2017).

2.4. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM *International*) padroniza ensaios destrutivos e não destrutivos, com a finalidade de uniformizar os testes para diferentes tipos de materiais evitando resultados incoerentes de medições para quem a adota, sendo todos os ensaios para determinação de propriedades mecânicas dos materiais embasados nesta padronização.

2.4.1. Dureza

O método de ensaio de Dureza *Rockwell* para plásticos e materiais elétricos isolantes é padronizado pela ASTM com a designação D785. Este teste baseia-se num valor obtido para o aumento da impressão de profundidade realizada no corpo de prova através de um equipamento com uma carga. O valor da dureza *Rockwell* depende da relação da equação 2, apresentada na seguinte fórmula (ASTM, 2015).

$$HR = 130 - e \quad (2)$$

Onde HR representa o valor da dureza *Rockwell* e e a profundidade da impressão depois de removida a carga em unidades de 0,002 mm.

Escala de Dureza Rockwell	Carga Mínima, kg	Carga Máxima, kg	Diâmetro de endentação	
			Polegada	Milímetro
R	10	60	0,5000 ± 0,0001	12,700 ± 0,0025
L	10	60	0,2500 ± 0,0001	6,350 ± 0,0025
M	10	100	0,2500 ± 0,0001	6,350 ± 0,0025
E	10	100	0,1250 ± 0,0001	3,175 ± 0,0025
K	10	150	0,1250 ± 0,0001	3,175 ± 0,0025

Figura 12: Escala de dureza *Rockwell* (Adaptado ASTM, 2015).

A endentação da dureza pode variar devido à característica anisotrópica de alguns materiais plásticos, portanto deve ser utilizada a superfície perpendicular a da pressão de moldagem. Neste método, uma esfera de aço é utilizada no equipamento para realizar os testes, sendo relevante a limpeza para não haver poeira, óleo ou qualquer outro material na esfera, caso contrário, não deve ser manuseado para as amostras. Uma plataforma plana

com pelo menos 50 mm deve ser usada como placa base para corpos de prova planos (ASTM, 2015).

O padrão para os corpos de prova deve ter no mínimo uma espessura de 6 mm. A amostra pode ser uma peça cortada de uma moldagem ou folha e deve ter cuidado para que a amostra de teste tenha superfícies planas paralelas para assegurar um bom assentamento na plataforma e, assim, evitar a deflexão que pode ser causada por um contato fraco. A amostra deve ter no mínimo 25 mm² para uma amostra em formato de papel e uma largura mínima 13 mm mais a largura do recuo resultante do ensaio utilizando o material de contato escolhido. A velocidade de carregamento deve ser concluída entre 4 e 5 segundos sem a amostra. As condições térmicas para os corpos de prova devem estar na faixa de 23 ± 2°C e 50 ±5% de humidade relativa do ar por 40 horas antes do ensaio (ASTM, 2015).

A quantidade de testes necessários para materiais anisotrópicos são cinco para cada eixo principal de anisotropia, desde que o tamanho da amostra esteja nos padrões. Para a conclusão dos resultados, é usado o cálculo matemático de desvio padrão (s), presente na equação 3, utilizando a média (X) dos valores obtidos da amostra (n) (ASTM, 2015).

$$s = \sqrt{\frac{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)}{(n - 1)}} \quad (3)$$

2.4.2. Tração

Este método de ensaio utiliza a padronização ASTM com a designação D638, que padroniza o método de ensaio para definição de propriedades de tração em materiais plásticos, sendo esta norma abrangente a plásticos não reforçados e reforçados sob a forma de corpos de prova em haltere para testes com condições pré-definidas como temperatura, humidade e velocidade da máquina de ensaio. Este método é equivalente à norma ISO 527-1 e está ilustrado na figura 13. Este ensaio visa definir algumas propriedades como coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade, onde extensômetros axiais e transversais são capazes de registrar tensão axial e transversal

simultaneamente. O tipo de dimensão adotado para o ensaio foi do Tipo 1, onde se aplica a materiais com espessura de 7 mm ou menos e para materiais rígidos e semirrígidos. Os valores na figura 14 são expressos em milímetros, e entre parênteses polegadas (ASTM, 2002).

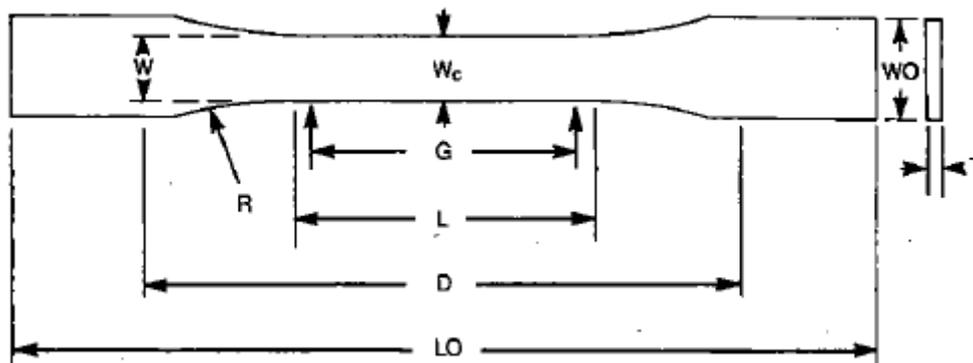


Figura 13: Formato de corpo de prova para ensaio de tração (Adaptado ASTM, 2002).

É preciso testar dez modelos, cinco transversais e cinco longitudinais com o eixo principal de anisotropia, para cada amostra no caso de materiais anisotrópicos e descartar os exemplares que quebram devido a alguma falha, ou que quebram fora da secção de ensaio de corte transversal. A velocidade do ensaio é definida pela tabela abaixo para cada tipo de ensaio onde os materiais se adequam (ASTM, 2002).

Classificação	Tipo de corpo de prova	Velocidade de teste, mm/min (pol./min)	Esforço nominal – taxa no início do teste,
---------------	------------------------	---	---

		mm/min (pol./min)	
Rígido e Semirrígido	Hastes e tubos I, II, III	5 (0,2) ± 25%	0,1
		50 (2) ± 10%	1
		500 (20) ± 10%	10
	IV	5 (0,2) ± 25%	0,15
		50 (2) ± 10%	1,5
		500 (20) ± 10%	15
	V	1 (0,05) ± 25%	0,1
		10 (0,5) ± 25%	1
		100 (5) ± 25%	10
Não rígido	III	50 (2) ± 10%	1
		500 (20) ± 10%	10
	IV	50 (2) ± 10%	1,5
		500 (20) ± 10%	15

Figura 14: Velocidade de testes para tração (Adaptado ASTM, 2002).

As dimensões para o corpo de prova aplicáveis para o Tipo 1, seguem o mesmo padrão de medidas da figura 14 e são definidas pela ASTM na figura 15.

Dimensões	7 (0,28) ou menor	
	Tipo 1	Tipo 2
W – Largura da seção estreita	13 (0,50)	6 (0,25)
L – Comprimento da seção estreita	57 (2,25)	57 (2,25)
WO – Largura geral	19 (0,75)	19 (0,75)
LO – Comprimento geral	165 (6,5)	183 (7,2)
G – Comprimento do Calibre	50 (2,00)	50 (2,00)
D – Distância entre os apertos	115 (4,5)	135 (5,3)
R – Raio da faixa	76 (3,00)	76 (3,00)

Figura 15: Dimensões para testes Tipo 1 e 2 (Adaptado ASTM, 2002).

A espessura, denominada T, deve ter $3,2 \pm 0,4$ mm.

2.4.3. Flexão

A padronização para o ensaio de flexão ASTM possui a designação D790, chamada de método de teste padrão para propriedade flexional de plásticos não reforçados e reforçados e materiais elétricos isolantes. Nesta norma, os testes são aplicados para materiais rígidos e semirrígidos, no

entanto a força flexional não pode ser determinada para materiais que não quebram ou que não rompem na superfície externa do corpo de prova dentro do limite de deformação de 5,0%. As propriedades da flexão podem variar dependendo da profundidade do corpo de prova, temperatura, condições atmosféricas. Este método adota um sistema simples de carregamento de três pontos aplicado a uma viga apoiada, como ilustrado na figura 16, porém os materiais que não rompem submetidos a carga máxima do sistema de 3 pontos, deverá então ser adotado o sistema de 4 pontos de apoio (ASTM, 2003).

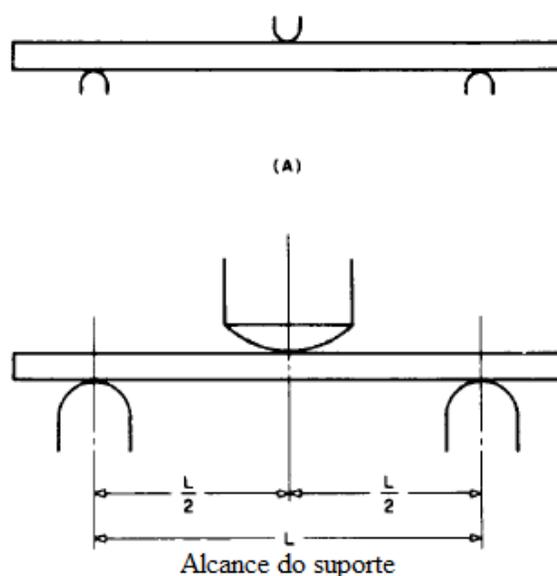


Figura 16: Apoio com dimensões permissíveis para ensaio de flexão (Adaptado ASTM, 2003).

O raio mínimo permitido dos apoios, é de 3,2 mm e o raio máximo até 1,6 vezes a profundidade da amostra. O apoio principal da carga (*loading nose*) deve ter raio máximo de quatro vezes a profundidade da amostra. Alguns aspectos são relevantes ao teste, como a correta calibragem do sistema, o apoio central de carga deve ter uma superfície cilíndrica para evitar falha devido à concentração de estresse e micrômetros devem ser utilizados para medição da espessura e largura do corpo de prova adotando uma escala de pelo menos 0,025 mm. Materiais de moldagem termoplásticos possuem um padrão recomendado de moldagem de 127 por 12,7 por 3,2 mm, sendo assim

uma peça tridimensional retangular. O número de testes mínimos exigidos são cinco corpos de prova para cada amostra (ASTM, 2003).

2.4.4. Torção

O método de teste padrão para rigidez de plásticos como função de temperatura por teste de torção é padronizado pela ASTM com designação D1043. A propriedade medida por este teste é o módulo aparente de rigidez, G , às vezes chamado de módulo de elasticidade aparente de cisalhamento, sendo este módulo diferente do módulo de elasticidade E (ASTM, 2016). Este dispositivo encontra-se na figura 17.

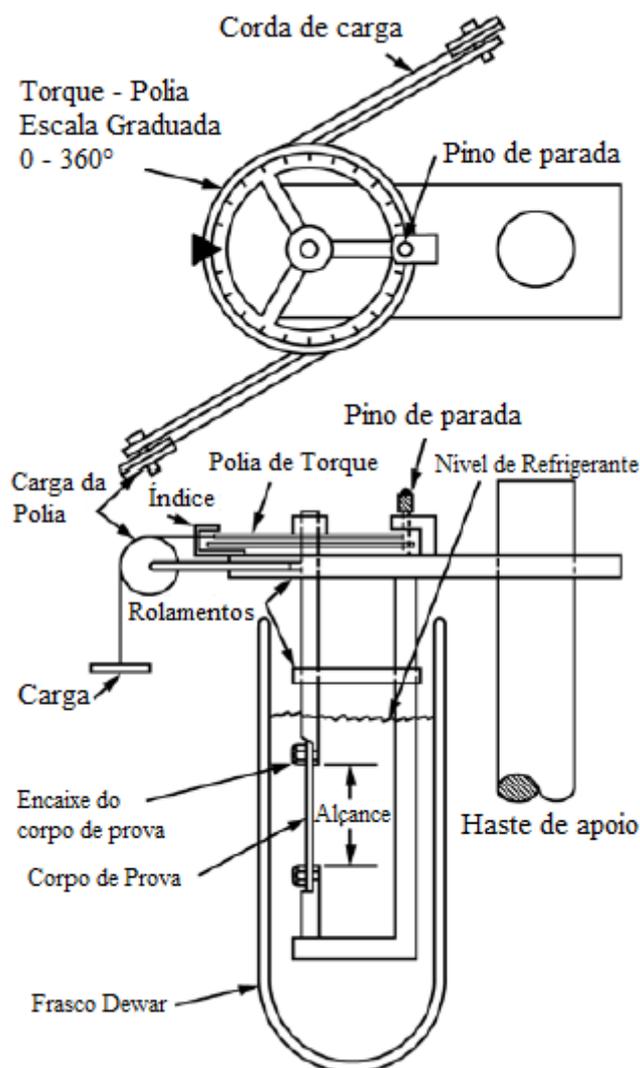


Figura 17: Equipamento de teste de torção (Adaptado ASTM, 2016).

O aparelho para ensaio deve executar um torque que varia de 5 a 100° de arco, dependendo da rigidez de cada material do corpo de prova. O bulbo de um termômetro é alocado próximo a amostra. Um temporizador é utilizado para monitorar a carga de acordo com o tempo. Deve ser utilizado um micrometro com 0,0025 mm de precisão para as medidas de largura e profundidade da peça. As peças devem ter formato retangular para os ensaios e são necessárias amostras isotrópicas. Este dimensionamento se baseia na figura 18.

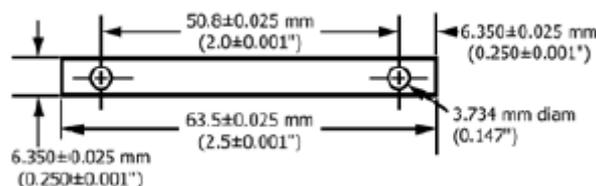


Figura 18: Dimensionamento da peça (Adaptado ASTM, 2016).

A espessura deve ser de aproximadamente 1 a 3 mm. As medidas de largura e profundidade devem ter valores para um algarismo significativo. Dois testes devem ser realizados, caso tenha uma diferença muito grande de valores, é feito um terceiro teste. As condições térmicas para os corpos de prova devem estar na faixa de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa do ar por 40 horas antes do ensaio (ASTM, 2016).

O cálculo do módulo de rigidez aparente para cada temperatura é descrito na equação 4.

$$G = \frac{917TL}{ab^3u\varphi} \quad (4)$$

Em que G = módulo de rigidez (Pa), T = torque aplicado (N.m), L = comprimento (mm), a = largura da amostra (mm), b = profundidade da amostra (mm), φ = ângulo de deflexão do torque aplicado em graus e u = valor da razão entre a e b . Esta razão está presente na figura 19.

Razão da largura, a, para a espessura, b	U	Espessura quando a largura é 6,350 mm (0,250 pol.)
2,00	3,66	3,175 mm (0,125 pol.)
2,25	3,84	2,819 mm (0,111 pol.)
2,50	3,99	2,540 mm (0,100 pol.)
2,75	4,11	2,311 mm (0,091 pol.)
3,00	4,21	2,108 mm (0,083 pol.)
3,50	4,37	1,829 mm (0,072 pol.)
4,00	4,49	1,600 mm (0,063 pol.)
4,50	4,59	1,422 mm (0,056 pol.)
5,00	4,66	1,270 mm (0,050 pol.)
6,00	4,77	1,067 mm (0,042 pol.)
7,00	4,85	0,914 mm (0,036 pol.)

Figura 19: Razão de a e b para valores de u – Cálculo de rigidez (Adaptado ASTM, 2016).

2.4.5. Coeficiente Térmico - Dilatômetro

O método padrão de ensaios para o coeficiente de expansão térmico linear de plásticos entre - 30° e 30°C com um dilatômetro de sílica vítrea, padronizado pela ASTM com designação D696. Este teste visa determinar o coeficiente de expansão térmica do material, para isso a amostra é colocada na parte inferior do tubo externo do dilatômetro tendo a parte interna apoiada a ela. O dispositivo de medição, como ilustrado na figura 20, é firmemente ligado ao tubo exterior, deve estar em contato com o topo do tubo interior e indica variações no comprimento da amostra com mudanças de temperatura. (ASTM, 2016).

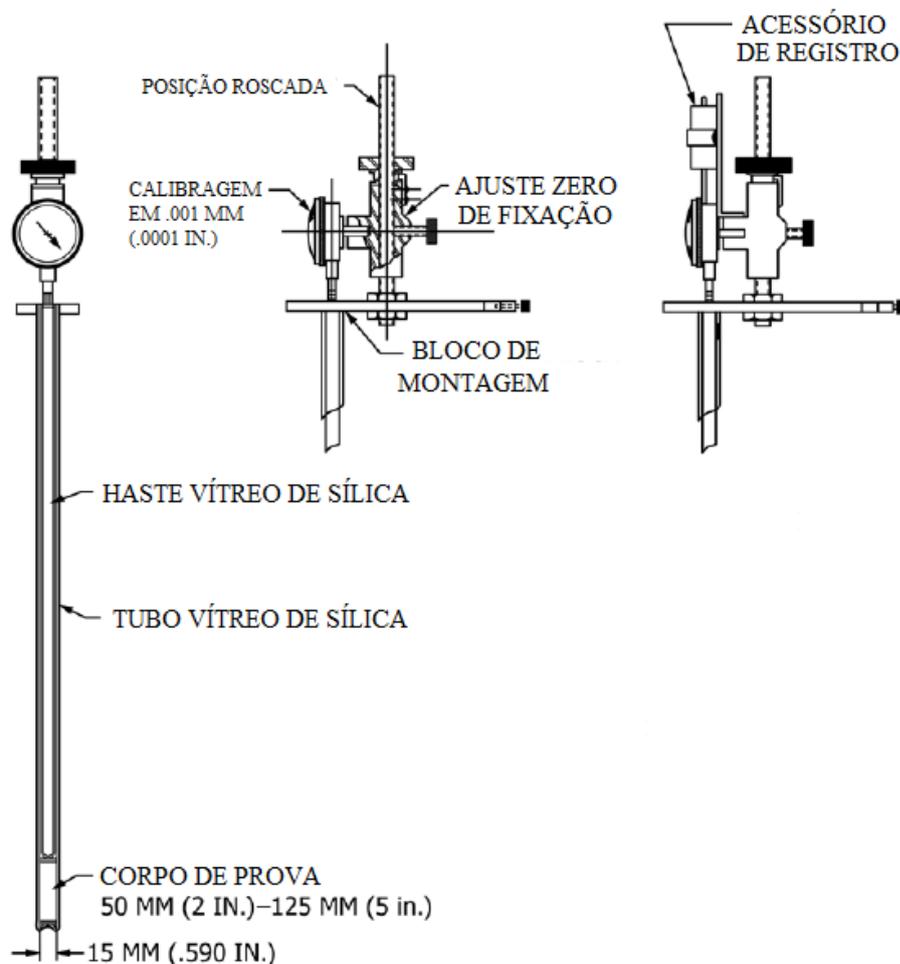


Figura 20: Dilatômetro (Adaptado ASTM, 2016).

O coeficiente de expansão térmica linear, α , presente na equação 5, avalia a expansão entre duas temperaturas T_1 e T_2 para amostra com comprimento L_0 .

$$\alpha = \frac{(L_2 - L_1)}{[L_0(T_2 - T_1)]} = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}$$

Um paquímetro com precisão de $\pm 0,5\%$ deve ser usado para medição dos comprimentos iniciais dos corpos de prova. O comprimento da amostra deve estar entre 50 e 125 mm. A largura padrão adotada para as amostras deve ter valores como 6,3 mm, 12,5 mm de diâmetro. As condições térmicas para os corpos de prova devem estar na faixa de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar por 40 horas antes do ensaio. É necessário repetir o teste até que obtenha valores próximos (ASTM, 2016).

2.4.6. Impacto de Charpy

Este método de ensaio baseia-se na utilização de um corpo de prova para determinar a resistência ao impacto do material por choque de flexão empregando um balanço de pêndulo que utiliza energia potencial. Para ser realizado o ensaio, a peça necessita de padronização e uma característica deste ensaio é um entalhe fresado onde haverá a colisão do pêndulo. Esta região do entalhe produz uma concentração de tensão que promove uma fratura frágil, ao invés de uma fratura dúctil. O maquinário para os testes, ilustrado na figura 21, possui uma padronização de altura do pêndulo, o que resulta em uma velocidade fixada para os ensaios. Os corpos de prova são padronizados tendo comprimento e profundidade fixos podendo variar a largura dependendo do limite da máquina. A designação da norma da ASTM empregada é D6110, que descreve o método de ensaio padrão para determinação da resistência ao impacto de Charpy de modelos plásticos com entalhe (ASTM, 2004).

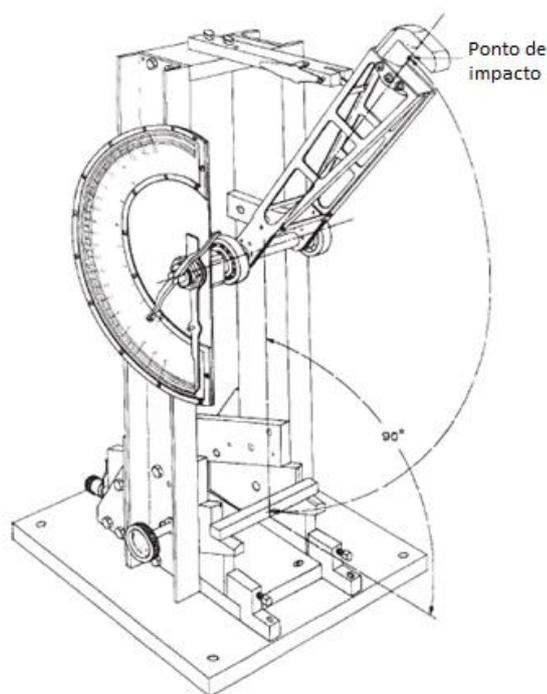


Figura 21: Máquina para ensaio Charpy (Adaptado ASTM, 2004).

Os ensaios precisam estar de acordo com o padrão de medidas adotadas pela ASTM, como na figura 22.

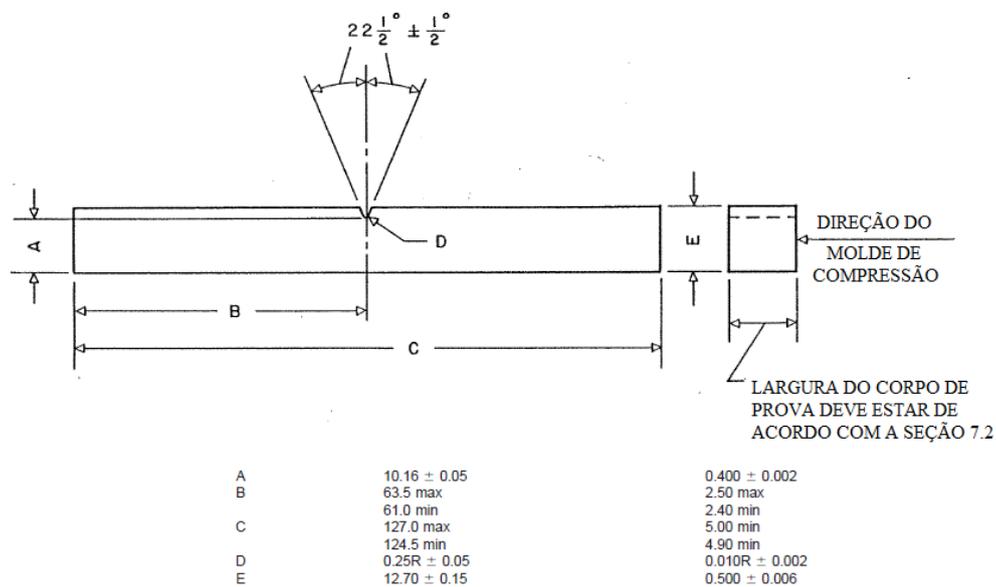


Figura 22: Dimensões para ensaio Charpy (Adaptado ASTM, 2004).

Os valores a esquerda são expressos em milímetros e a direita em polegadas. Na figura 23, são explicitadas as dimensões na zona de impacto do teste de Charpy, que devem ser seguidos em milímetros ou polegadas como descrito acima. As amostras moldadas devem ter uma largura entre 3,00 e 12,7 mm. Deverão ser feitas pelo menos cinco e preferencialmente dez ou mais ensaios para determinar a resistência média ao impacto de uma determinada amostra (ASTM, 2004).

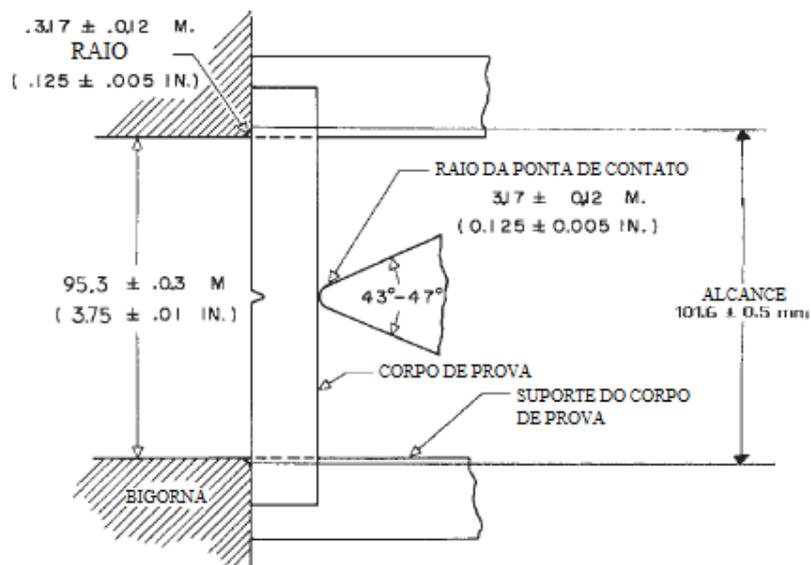


Figura 23: Zona de impacto ensaio Charpy (Adaptado ASTM, 2004).

2.4.7. Pêndulo de impacto Izod

Para os ensaios de impacto realizados por um pêndulo Izod com o objetivo de determinar a absorção de energia pela resistência dos plásticos, adotou-se a padronização ASTM, com designação D 256. Os ensaios tiveram como base o Método "E", que consiste em uma peça fixada na vertical, com entalhe na região central da peça. A figura 24 consiste na esquematização do equipamento para ensaios utilizando o método E.

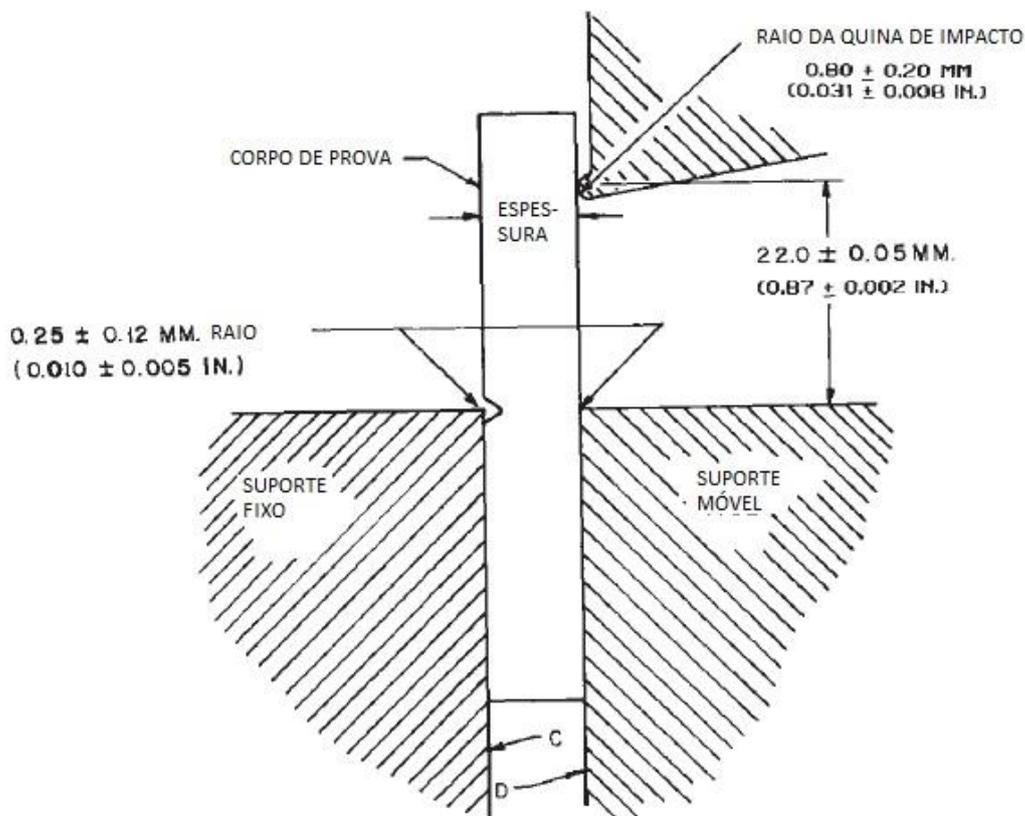


Figura 24: Método "E" para impacto Izod (ASTM, 2004).

Para o dimensionamento do corpo de prova com entalhe baseado na norma, as letras presentes na figura 25, representam os valores para cada região em milímetros. "A" $10,16 \pm 0,05 \text{ mm}$, "B" $31,80 \pm 1,0 \text{ mm}$, "C" $63,5 \pm 2,0 \text{ mm}$, "D" $0,25 \pm 0,05 \text{ mm}$ de raio, "E" $12,70 \pm 0,20 \text{ mm}$ e "F" deve ter entre 3,00 e 12,70 mm.

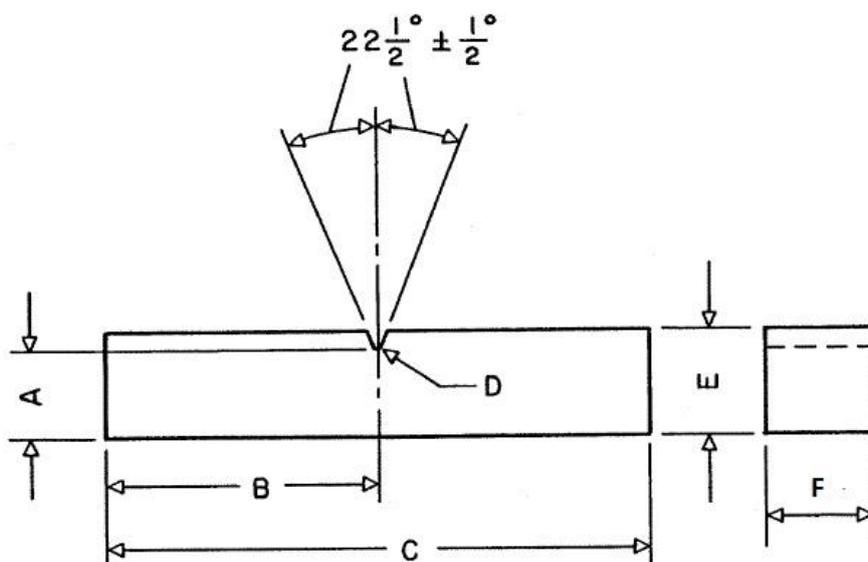


Figura 25: Dimensionamento para impacto Izod (ASTM, 2004).

O mínimo de corpos de prova requerido pela norma são 5 peças e assim foi executado para cada direção de impressão.

2.4.8. Excitação por Impulso

O método de teste padrão para o módulo dinâmico de Young, módulo de cisalhamento e razão do coeficiente de Poisson por Excitação de Impulso de Vibração é padronizado pela ASTM com designação E1876. Este método visa determinar as propriedades elásticas dinâmicas de materiais elásticos à temperatura ambiente. O módulo dinâmico de Young e o módulo de dinâmico de cisalhamento que são obtidos resolve a razão do coeficiente de Poisson. A excitação por impulso utiliza uma ferramenta de impacto e apoios simples para os ensaios dos corpos de prova. (ASTM, 2015).

Este teste possui aplicação específica para materiais elásticos, homogêneo e isotrópico, porém é possível ser utilizado em materiais compósitos, não homogêneo e anisotrópico com atenções para fração volumétrica, dimensão, morfologia, distribuição, orientação, propriedades elásticas. Estes efeitos devem ser considerados na interpretação dos resultados. O procedimento envolve a medida de vibrações elásticas transientes do material. É desejável que o material para o corpo de prova não tenha grandes vazios, fendas ou descontinuidades importantes. Este ensaio estabelece módulos que é limitado a amostras com geometrias regulares (paralelepípedo retangular, cilindros e discos) para os quais estão disponíveis equações analíticas para relacionar geometria, massa e módulo com as frequências de vibração ressonante (ASTM, 2015).

A seleção para o tamanho dos corpos de prova é baseado em uma razão entre o comprimento da peça e sua espessura para um valor de no mínimo 5 mm, porém para melhores resultados nos cálculos do módulo de elasticidade dinâmico é desejado uma razão entre 20 e 25 mm. No caso de testes para obtenção do módulo de cisalhamento dinâmico são usadas barras retangulares com razão entre a largura e a espessura de no mínimo 5 mm, para minimizar dificuldades experimentais (ASTM, 2015).

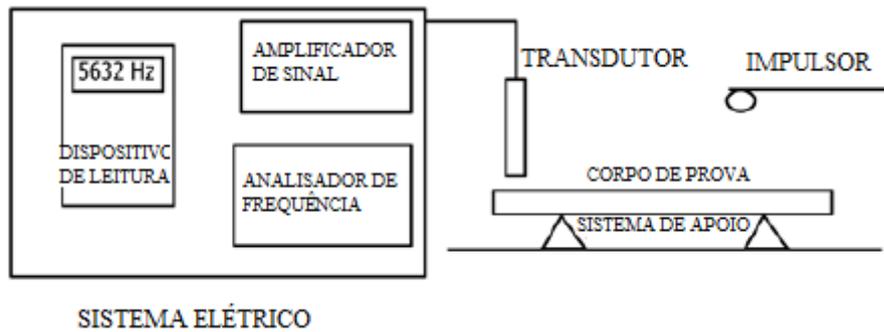


Figura 26: Equipamento de ensaio de excitação por impulso (Adaptado ASTM, 2015).

A excitação por impulso é transmitido através de um rápido golpeamento do corpo de prova, como visto na figura 26. O material que o golpeia deve ter a maior parte da sua massa concentrada no ponto de impacto e ter massa suficiente para induzir uma vibração mecânica mensurável. As vibrações são detectadas por um transdutor que possui contato com o material a ser testado. Registre a leitura resultante e repita o teste, até que sejam obtidas cinco leituras consecutivas que se encontram dentro de 1% umas das outras.

Para o cálculo do módulo dinâmico de Young, ou módulo de Elasticidade, é adotado o cálculo para a frequência fundamental de ressonância de flexão de uma barra retangular descrita na equação 6.

$$E = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (6)$$

Onde m = massa da barra, em gramas, b = largura da barra, em mm, L = comprimento da barra, em mm, t = espessura da barra, em mm, f_f = frequência fundamental de ressonância de flexão de uma barra retangular, em Hz, T_1 = Fator de correção para o modo de flexão fundamental para solucionar a razão de Poisson.

Para solucionar o fator de correção onde $\frac{L}{t} \geq 20$ neste trabalho é adotada a formulação na equação 7.

$$T_1 = \left[1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Para o cálculo da frequência fundamental de ressonância de torção de uma barra retangular, este é descrito pela equação 8.

$$G = \frac{4 L m f_t^2}{b t} R \quad (8)$$

Onde m = massa da barra, em gramas, b = largura da barra, em mm, L = comprimento da barra, em mm, G = Módulo dinâmico de cisalhamento, em Pa, f_t = frequência fundamental de ressonância de torção de uma barra retangular, em Hz, t = espessura da barra, mm e R é uma equação que depende do número de ressonâncias (n), para este caso é adotada a ressonância fundamental, $n=1$, em que é descrita pela equação 9.

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{4 - 2,521 \frac{t}{b} \left(1 - \frac{1,991}{e^{\frac{\pi b}{t}} + 1}\right)} \right] \left[1 + \frac{0,00851 n^2 b^2}{L^2} \right] - 0,060 \left(\frac{nb}{L}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{b}{t} - 1\right)^2 \quad (9)$$

Por fim o cálculo do coeficiente de Poisson relaciona os dois módulos na equação 10.

$$\nu = \left(\frac{E}{2G}\right) - 1 \quad (10)$$

Em que ν é o coeficiente de Poisson, E o módulo de elasticidade, G o módulo de cisalhamento.

2.4.9. Vácuo

O método padrão de ensaios para determinar os efeitos de altas altitudes em sistemas empacotados pelo método a vácuo, designado com o código D6653/D6653M, padronizado pela ASTM visa determinar os efeitos de diferencial de pressão, sendo que os resultados neste teste possuem propósito qualitativo (ASTM, 2013).

O equipamento adotado para este ensaio baseia-se em qualquer câmara que seja adequada para suportar um diferencial de pressão de

aproximadamente uma atmosfera. Os tubos de entrada e saída de uma fonte de vácuo devem ser seladas para a câmara de ensaios, sendo estes tubos equipados com válvulas manuais. O sistema de medição na câmara deve possuir um calibrador de qualidade que opere na faixa de 0 a 100 kPa (0 a 30 polegadas de Hg), com graduação mínima não superior a 2 kPa (1 polegada de Hg) (ASTM, 2013).

Os modelos para ensaio devem estar em $5,6 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por no mínimo 24 horas antes do teste, assim como no próprio teste. Caso não seja possível condicionar a amostra nas temperaturas mencionadas, é recomendado o uso de temperatura atmosférica de $23,2 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 24 horas antes do teste. O procedimento baseia-se no posicionamento da peça dentro da câmara, o fechamento do tubo de entrada e abertura do tubo de saída assim como o ligamento da fonte de vácuo. O sistema aumenta pressão até uma faixa de 305 m (1000 pés), monitorado através de um calibre. A partir de então é calibrada uma pressão equivalente a 4877 m (16.000 pés) $\pm 5\%$ para corpos de prova nas condições ideais previstas. Caso estas condições não sejam seguidas a pressão equivalente será 4267 m (14.000 pés) $\pm 5\%$ (ASTM, 2013).

O vácuo deve ser mantido por 60 minutos. Por fim a válvula de entrada é parcialmente aberta e é liberado o vácuo numa taxa de 305 m (1000 pés) entre 30 e 60 segundos. Após aberta a câmara analisa-se qualquer dano ou deformação na peça (ASTM, 2013).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O capítulo 3 descreve com maiores detalhes, as metodologias de cada caracterização realizada, assim como os parâmetros de impressão para cada material.

Para um trabalho desenvolvido em dois semestres ficou estabelecido que inicialmente os processos com equipamento de maior viabilidade para utilização é o ensaio de excitação por impulso, no entanto procedimentos iniciais para o ensaio de Charpy e Tração foram documentados, tendo em vista a tentativa de sua realização logo após a conclusão das análises de excitação por impulso, no entanto devido a adaptação a máquina presente no laboratório na universidade, utilizou-se o ensaio de impacto Izod, pois assim foi possível seguir o padrão de medidas da norma. Todo o processo metodológico para os ensaios são padronizados pela ASTM, e são realizados na Universidade de Brasília no Laboratório de Caracterização de Materiais no Campus FGA e no edifício SG 9 no Campus Darcy Ribeiro.

A padronização de todos os ensaios possui embasamento no Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM), que descreve o cálculo de média aritmética e desvio padrão para amostras que são empregadas no experimento. O cálculo da média é a avaliação da incerteza padrão do tipo “A”, como descreve o GUM. Na qual \bar{q} , que indica a média, está na fórmula representada na equação 11.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (11)$$

O desvio padrão experimental é para uma série de n medições de um mesmo mensurando. Na equação 12, a grandeza $s(q_k)$, caracteriza esta dispersão obtida.

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Onde q_k é o resultado da k-ésima medição e \bar{q} é a média aritmética dos n resultados apontados.

3.1. PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Os filamentos PLA, ABS e PETG foram adquiridos das fabricantes 3D LAB e UP3D na primeira etapa do estudo, para o teste de excitação por impulso; na segunda etapa, devido aos bons resultados, foi eleita a fabricante 3D LAB, para dar continuidade aos testes de excitação por impulso, flexão, tração e impacto izod. Todos os filamentos possuem diâmetro de 1,75 mm e o bico extrusor de 0,4 mm. Tal fabricante recomenda os parâmetros de impressão para cada material conforme descrito na tabela 1.

Tabela 1: Recomendação de uso das fabricantes na prototipagem.

PARÂMETROS DOS FILAMENTOS ESPECIFICADOS PELA FABRICANTE			
Filamentos	Temperatura de impressão	Velocidade de impressão	Temperatura da mesa
PLA	200 – 220°C	Até 150 mm/s	60 – 70°C
ABS	220 – 240°C	Até 150 mm/s	100 – 120°C
PETG	230 – 245°C	Até 120 mm/s	60 – 70°C

Fonte: Próprio autor, 2017.

Para o experimento são utilizados os seguintes parâmetros para todos os testes da tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros seguidos na prototipagem.

PARÂMETROS ADOTADOS PARA PROTOTIPAGEM			
Filamentos	Temperatura de impressão	Velocidade de impressão	Temperatura da mesa
PLA	220°C	50 mm/s	60°C
ABS	240°C	50 mm/s	100°C
PETG	245°C	50 mm/s	60°C

Fonte: Próprio autor, 2018.

A decisão por baixas velocidades de impressão, foram tomadas devido à baixa possibilidade de vazios entre camadas e sob camadas, evita variações na espessura do material extrudado tornando assim uma impressão mais lenta, porém com melhor acabamento. Inicialmente utilizou-se 30 mm/s como velocidade padrão, os primeiros ensaios de excitação foram feitas nesta velocidade, porém devido a quantidade de peças para construção, possíveis falhas nos ensaios para flexão, tração e izod e manutenções no equipamento, os corpos de prova foram construídos com 50 mm/s.

O critério adotado no software Repetier foi de cem por cento de preenchimento com padrão de varredura 45° e -45° , por ser a configuração usual de referência encontrada nos softwares como padrão. Esta varredura tem o padrão como ilustrado nas imagens 27 e 28 a baixo.

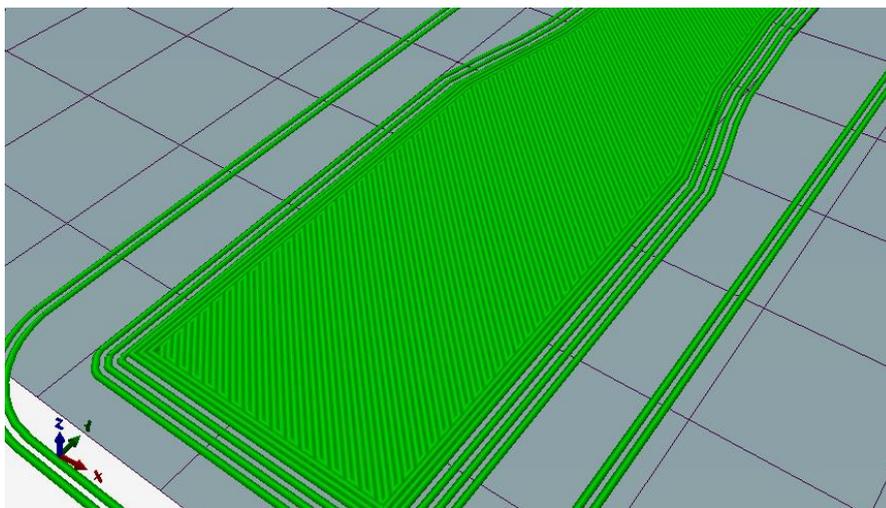


Figura 27: Preenchimento com varredura 45° (Fonte: Próprio Autor, 2018).

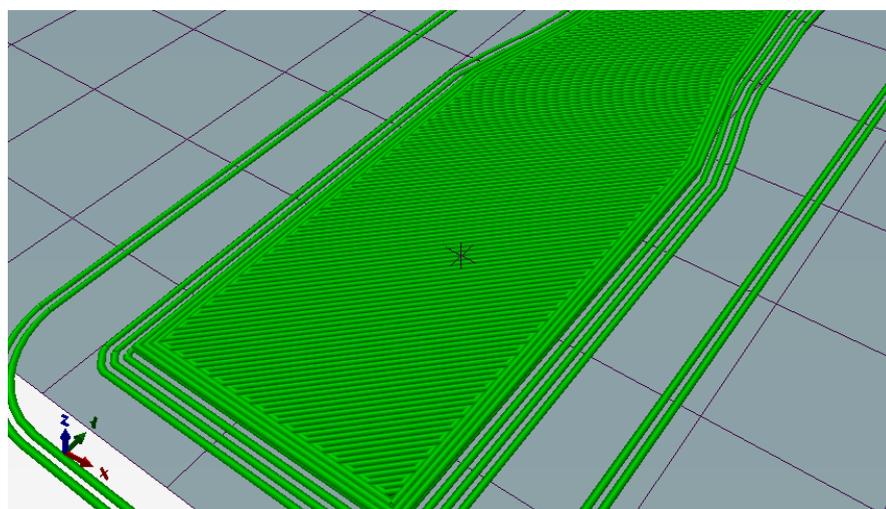


Figura 28: Preenchimento com varredura -45° (Fonte: Próprio Autor, 2018).

A taxa de fluxo teve como referência multiplicador igual a um, altura da camada de 0,25 milímetros da primeira e 0,20 milímetros para as camadas subsequentes até a última camada, concha perimetral de duas voltas por camada, o padrão de preenchimento retilíneo no preenchimento interno e externo, na superfície inferior e superior, tendo camada por camada o ponto de início alinhado, assim sendo cada camada é iniciada na mesma posição. Foram usadas quatro voltas nas peças na primeira camada, para dar mais adesão a mesa e evitar empenamento, sendo posteriormente retirada manualmente por estilete.

Os suportes sugeridos no software não foram usados, quando necessário suporte, como no caso das peças de construção vertical, foi construído suporte no software CAD junto a peça.

As peças possuem orientação, para facilitar a compreensão, como Y, X e Z referente as peças elaboradas no sentido chapado, horizontal e vertical, como abordado na figura 11.

As velocidades são diversas para cada situação na impressão, sendo a de 50 mm/s mencionada anteriormente como a velocidade principal, pois esta é utilizada como velocidade perimetral, e de preenchimento. A velocidade para pequenos perímetros é de 40 mm/s, a volta mais externa do perímetro de setenta por cento da velocidade perimetral, preenchimento do topo nas últimas três camadas de 40 mm/s, pontes de 60 mm/s e velocidade para movimentos de deslocamento, onde não há impressão, de 120 mm/s. A primeira camada é inserida a 30 mm/s para gerar maior adesão do filamento a mesa, e evitar possíveis erros na impressão na parte mais crítica da fabricação.

O náilon seria utilizado como um ótimo comparativo na caracterização mecânica dos materiais adotados, porém foi descartado, devido a dificuldades em sua utilização. Por ter propriedade higroscópica, em que este material tende a absorver a umidade do ar, haverá complicações na impressão caso este não esteja isolado de umidade. Foram feitas algumas tentativas com este material, entretanto concluiu-se que seria utilizado somente PLA, ABS e PETG como referência para o desenvolvimento das caracterizações mecânicas.

A fabricante disponibiliza de uma tabela com valores referentes a um ensaio de tração realizada por ela, com os materiais PLA, ABS e PETG que são amplamente mencionadas posteriormente. Esta tabela da fabricante 3D LAB segue abaixo na tabela 3.

Tabela 3: Propriedades dos materiais fornecidos pela fabricante 3D LAB.

Propriedades da matéria prima - Grãos			
Propriedades	PLA	ABS	PETG
<i>Tensão de Escoamento</i>	66 [Mpa]	38 [Mpa]	51 [Mpa]
<i>Módulo de Elasticidade</i>	4350 [Mpa]	2200 [Mpa]	2120 [Mpa]
Resultados para ensaio de tração de corpos de prova impressos seguindo a norma D638			
Propriedades	PLA	ABS	PETG
<i>Tensão de Escoamento</i>	24,8 [Mpa]	14,7 [Mpa]	18,6 [Mpa]
<i>Módulo de Elasticidade</i>	1896,0 [Mpa]	1335,9 [Mpa]	1067,9 [Mpa]
<i>Tensão de Ruptura</i>	46 [Mpa]	29 [Mpa]	32,6 [Mpa]

Fonte: 3D LAB – Site de Internet, (2018).

Todas as peças para os ensaios foram feitas em um software CAD, denominado CATIA, que então foram exportadas para outro software chamado Repetier como arquivo STL, que realizou o fatiamento da modelagem em pequenas porções geométricas para a leitura da impressora. Para a construção das peças a impressora escolhida foi a Graber i3, devido a maior facilidade e acessibilidade do equipamento no mercado.

3.2. EXCITAÇÃO POR IMPULSO

As peças impressas para este ensaio são padronizadas pela ASTM, desta forma as medições dos valores base para impressão, que estão presentes na figura 29, foram de 120 mm de comprimento, 30 mm de largura e 6 mm de espessura.

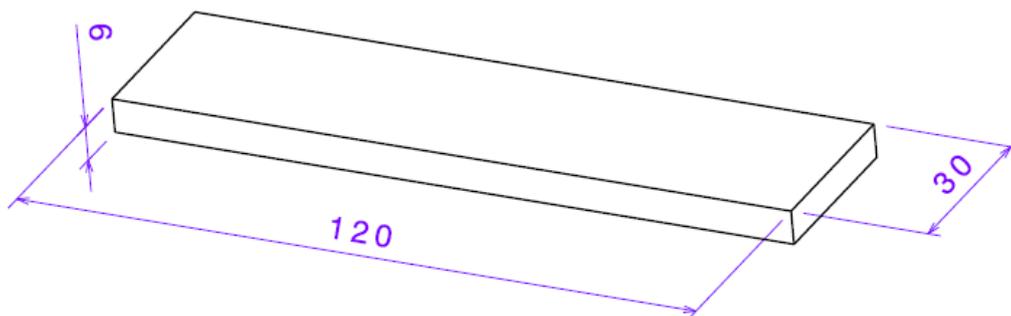


Figura 29: Desenho técnico do corpo de prova (Fonte: Próprio autor, 2017).

Uma das motivações para a execução deste trabalho foi devido à anisotropia das peças, desta maneira foram construídas três peças de cada material em orientações diferentes, sendo estes filamentos adquiridos de duas fabricantes, 3DLAB e UP3D, desta forma foram três corpos de prova em PLA, ABS, e PETG de cada fabricante, resultando em 18 peças para o ensaio não destrutivo.

O diagrama para os ensaios de excitação por impulso segue a metodologia explicitada na figura 30, a seguir.



Figura 30: Metodologia simplificada (Fonte: Próprio autor, 2017).

Para a realização do ensaio foi adotado o software e dispositivo Sonelastic, as imagens do equipamento seguem nas figuras 31, 32 e 33.



Figura 31: Metodologia simplificada (Fonte: Próprio autor, 2017).



Figura 32: Metodologia simplificada (Fonte: Próprio autor, 2017).

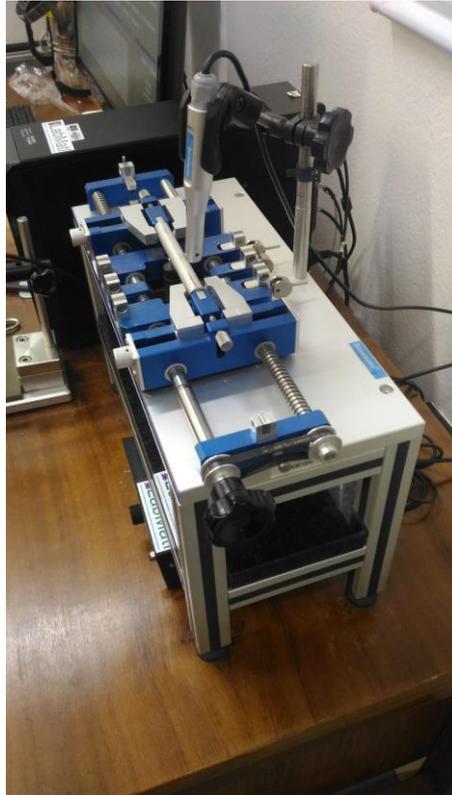


Figura 33: Metodologia simplificada (Fonte: Próprio autor, 2017).

O ensaio de excitação por impulso visa determinar as propriedades de elasticidade (E) e de cisalhamento (G) do material assim como o coeficiente de Poisson.

As medições e geometria dos corpos de prova são estipuladas pela norma, sendo as medições aferidas três vezes, sendo estes indicadores obtidos nas extremidades e na região central da peça, tendo em vista os erros indicados pelo paquímetro e o erro do próprio instrumento. O paquímetro possui resolução de 0,02 mm, e é o equipamento indicado pela norma da ASTM que padroniza este teste.

Este procedimento baseia-se em um golpeamento do corpo de prova e captação via microfone do sinal emitido. O equipamento mede vibrações transientes do material ensaiado para então analisar as frequências nos picos do sinal. Estes picos são registrados de acordo com os parâmetros escolhidos no software. Para este experimento o nível de excitação ficou configurado em cinco, tempo de aquisição em 0,683 segundos, tempo de processamento seis, em uma escala de 0 a 8, filtro de detecção de 0,5 a 20 kHz, sensibilidade com amplitude de 0,020 V e modo de vibração flexional + torcional.

Este ensaio padroniza três geometrias possíveis, sendo estas de peças retangulares, cilíndricas e aneladas. A geometria retangular foi adotada com os valores já mencionados acima.

O teste para o modo de vibração Flexional + Torsional, ilustrado na figura 34, visa determinar os dois módulos de elasticidade e de cisalhamento, e assim relacionar ambos encontrando o coeficiente de Poisson. Para isso é necessário posicionar o impulsor e o microfone em lados distintos da peça, assim como em lados diferentes.

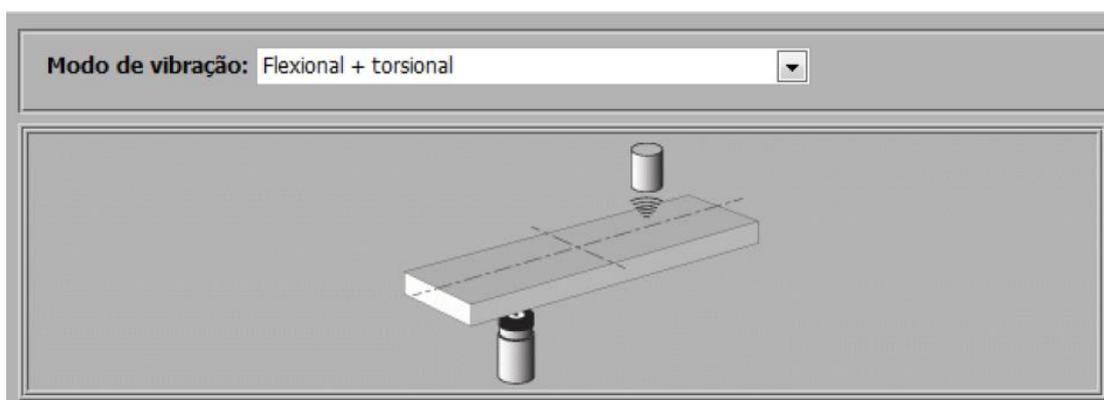


Figura 34: Modo de vibração (Fonte: Manual Sonelastic, 2014).

Realizado a captura do sinal os dois primeiros picos registrados pelo software são considerados o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento respectivamente a partir da frequência desejada, delimitada pelo tracejado vermelho como no exemplo do Manual Sonelastic (2014), visto na figura 35.

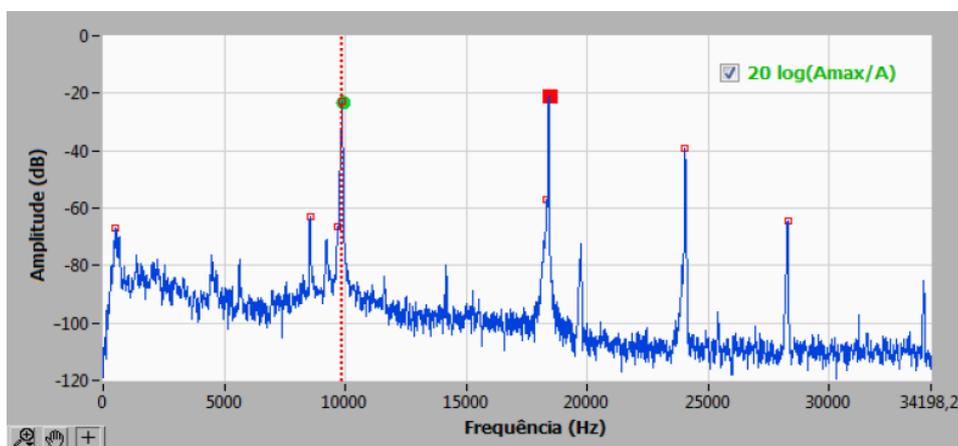


Figura 35: Sinal registrado em um ensaio (Fonte: Manual Sonelastic, 2014).

Na continuação do desenvolvimento, no Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC 2), em busca de resultados mais precisos seguindo a norma com 5 peças por direção, foram construídas cinco peças chapado, horizontal e vertical em PLA. Desta vez, foi utilizada uma balança de precisão, como visto na figura 36, Shimadzu AUY 220, do Laboratório de Metalografia no SG9, na Universidade Brasília (UnB).



Figura 36: Balança de precisão (Fonte: Próprio Autor, 2018).

Como mencionado anteriormente, as peças são mensuradas três vezes em comprimento, largura e espessura para cada peça em cada direção de impressão. Além disto, foram feitas três aferições de massa para cada peça, totalizando quarenta e cinco medições. Para a confecção das peças na impressora 3D, foi mantida a fabricante de filamentos 3D LAB devido aos resultados satisfatórios.

Para estes últimos ensaios foram mantidas as configurações já utilizadas no TCC 1, contudo o paquímetro usado possui resolução de 0,10 mm.

3.3. TRAÇÃO

Para o ensaio de tração o equipamento utilizado no laboratório de caracterização de materiais é o Instron® 8801, que é um dispositivo de teste de fadiga servo-hidráulico compacto que atende a requisitos de testes estáticos e dinâmicos. Esta máquina é ideal para testes de fadiga em alto e baixo ciclos, testes de fadiga termomecânicos e mecânica de fraturas. A maior capacidade do aparelho para testes é de até 100 kN, esta máquina possui um grande espaço de trabalho, alta rigidez e precisão de alinhamento, pressão máxima de 21 Mpa sendo o peso deste em si de 650 kg. A figura 37 relata uma imagem deste equipamento.



Figura 37: Equipamento de ensaio de tração (Fonte: Próprio autor, 2017).

A peça desenvolvida no software CATIA para o ensaio de tração possui um padrão como ilustrado a seguir, baseado nos padrões da norma ASTM mencionados na revisão bibliográfica.

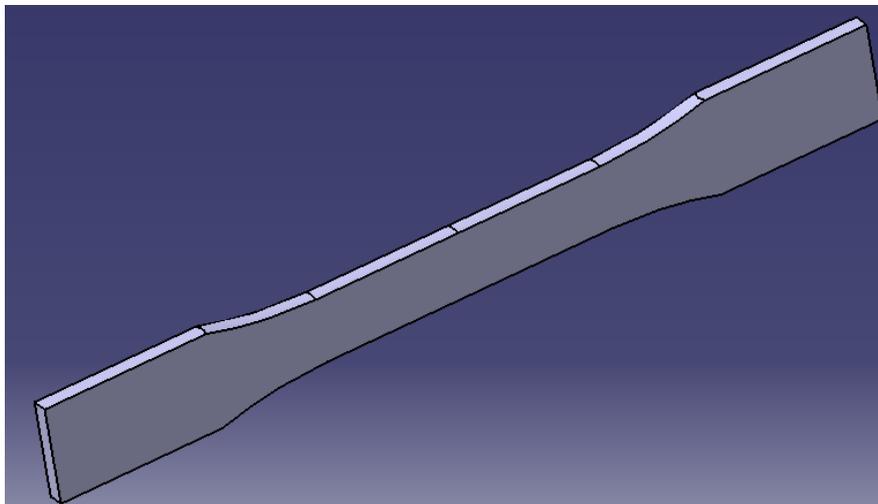


Figura 38: Peça desenvolvida para ensaio de tração no Catia (Fonte: Próprio autor, 2017).

Seguindo as normas da ASTM, foram fabricadas inicialmente cinco peças de PLA na direção vertical, horizontal e chapado, como na figura 38, totalizando 15 peças. O padrão de construção das peças foi adotado da mesma forma para estas primeiras quinze peças e as demais desenvolvidas posteriormente, sendo estes materiais PLA, ABS e PETG. Estas primeiras peças foram feitas sem a indução de fratura na região central, esta induzida com o uso de estilete com um arranhão simples feito no meio da peça, tornando esta região um concentrador de tensão levando a ruptura provável na região. Foi necessário utilizar esta técnica nos corpos de prova posteriores, pois nos ensaios houve a aplicação de um extensômetro, equipamento que verifica a variação da extensão da peça com maior precisão, e desta maneira se torna necessário a fratura do material na região de avaliação do extensômetro.

Para as primeiras peças foram adotados os resultados da deformação específica longitudinal da máquina, e deformação transversal do extensômetro, contudo após ter sido feitos testes, notou-se que a deformação específica da máquina e do extensômetro usados na vertical, deram valores divergentes, dessa forma todo o ensaio foi recomeçado e as peças foram duplicadas para cada tipo de construção, resultando em um total de noventa peças, trinta para cada material sendo destes trinta, dez verticais, dez horizontais e dez

chapados, e destes dez de cada orientação, cinco com extensômetro longitudinal e os cinco restantes na transversal, decorrendo em resultados mais precisos.

As primeiras quinze peças, cinco em cada direção, foram utilizadas no ensaio com o objetivo de alcançar o máximo de resultado possível, sendo um desses o coeficiente de Poisson. Para isto é necessário obter a deformação específica (uma medida de deformação adimensional que representa o deslocamento relativo em um material) transversal e longitudinal da peça. Desta forma, foi considerada a deformação realizada pela máquina longitudinalmente e a deformação obtida pelo extensômetro transversalmente. Após análise realizada dos resultados, ficou nítido que a deformação obtida pela máquina estava imprecisa, em vista disso todo o processo foi reiniciado. A intenção foi obter resultados longitudinalmente e transversalmente através do extensômetro. Como há somente um extensômetro, dobrou-se a quantidade de peças para obter o montante mínimo de cinco peças segundo a norma, para cada orientação, sendo cinco com medições transversais e cinco longitudinais, resultando em um total de noventa peças necessárias para a caracterização.

Foram fabricadas mais de noventa peças, tendo em vista que algumas poucas peças tiveram que ser substituídas, dentro do universo de noventa corpos de prova para o experimento, devido a comportamentos como trinca na peça próximo as garras, ou alguma falha de preenchimento da peça que tornou inconsistentes alguns resultados.

As peças verticais, ilustradas na figura 39, demandaram de um apoio para não descolar da mesa durante a impressão, portanto quando impresso se tornava necessário retirar o suporte com estilete. Este suporte possui 0,6 mm de espessura e está presente na base e nas laterais da peça. Este mesmo padrão de suporte foi desenvolvido para as caracterizações de flexão, excitação por impulso, assim como para impacto Izod.

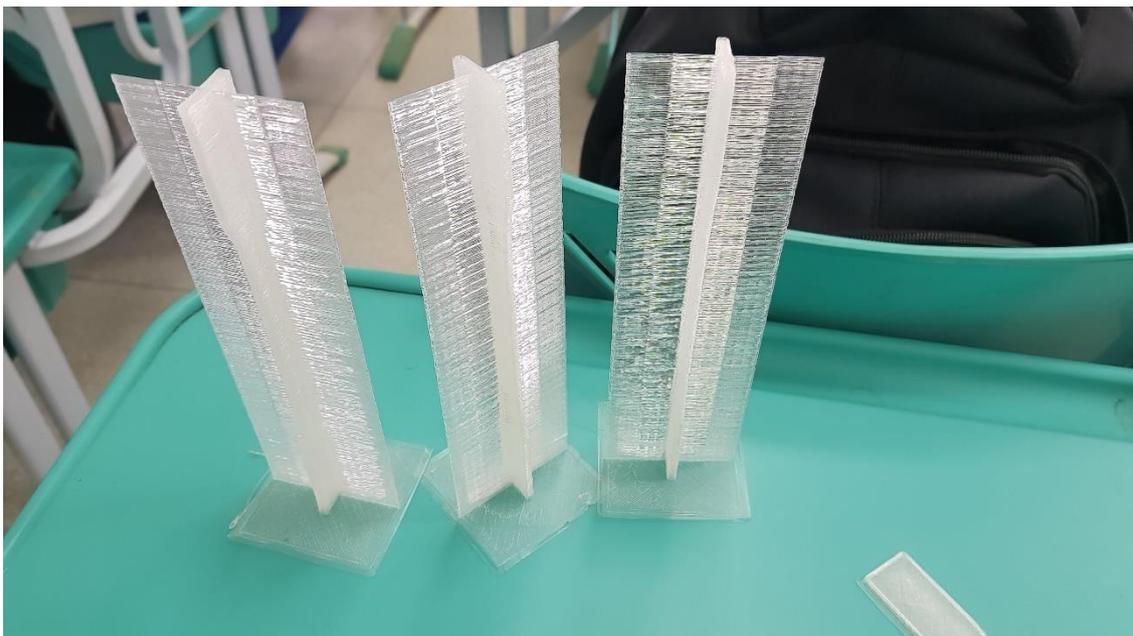


Figura 39: Peças verticais com suporte de impressão (Fonte: Próprio autor, 2018).



Figura 40: Peça de tração ainda com o material na base para maior adesão a mesa de impressão (Fonte: Próprio autor, 2018).

Cada peça teve uma marcação com caneta a trinta milímetros da extremidade para facilitar a inserção na máquina e ter uma boa área de fixação com a garra no equipamento. Além desta marcação as peças verticais, devido a um padrão um pouco mais arredondado da extremidade, demandava um

risco de leve na região de contato do extensômetro, devido a possíveis deslizamentos constatando assim erros na leitura da deformação específica.

O procedimento para ligar todo o equipamento é composto de diversas etapas, primeiramente é necessário ligar a torneira que arrefece a máquina, é girado uma alavanca desta máquina deixando-a em modo de espera, caso os botões de parada emergencial estejam acionados, destravá-las, ligar o computador e o gabinete de processamento do maquinário, com o computador ligado, abrir o programa de controle e por fim acionar o botão de iniciação.

As garras presentes no equipamento precisam estar de acordo com o corpo de prova da norma, para materiais metálicos, os ensaios de tração segundo a norma da ASTM são feitos com corpos de prova cilíndricos, já em material plástico, estas garras são planas com ranhuras que evitam o deslizamento da peça.

Para elucidar os dispositivos utilizados neste ensaio, a imagem 41 a seguir mostra as garras no material ensaiado, assim como o extensômetro na região central da peça antes de ter o processo iniciado, tendo em vista que o fixador do ponto zero no extensômetro ainda está inserido.

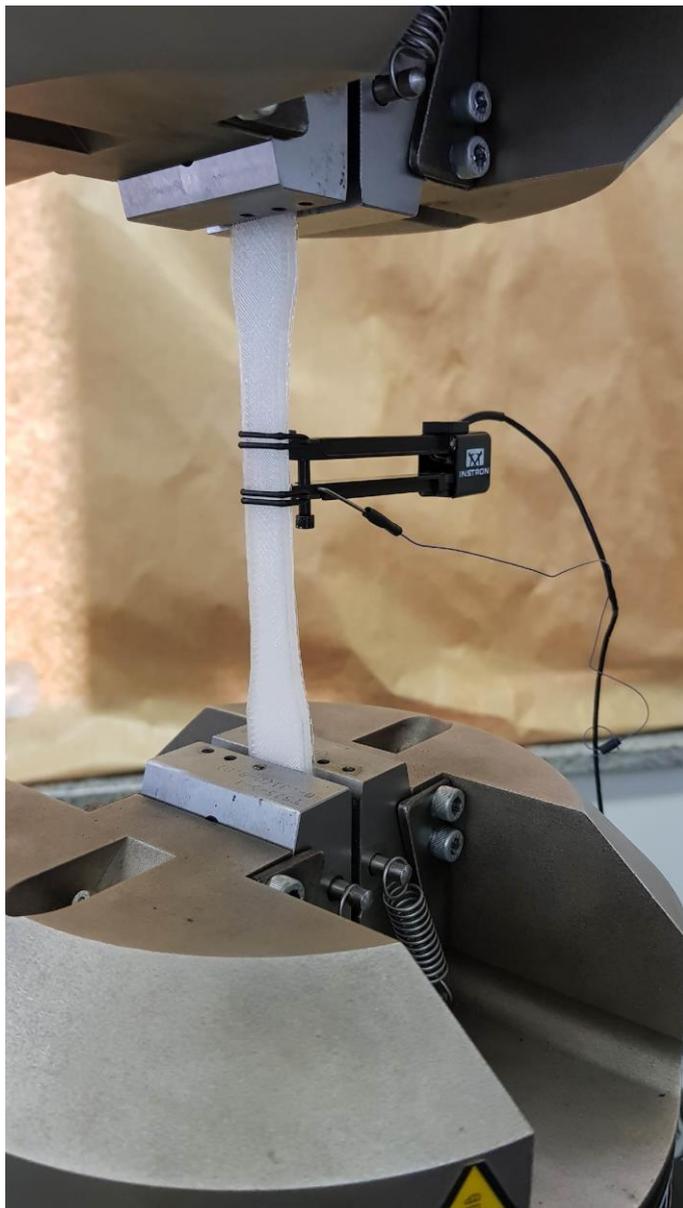


Figura 41: Fixação da garra no corpos de prova (Fonte: Próprio autor, 2018).

Neste programa do maquinário, chamado BlueHill, todos os dados de dimensionamento dos corpos de prova, taxa de carga, resultados a serem obtidos como a carga, extensão, deformação específica, são adicionados a um arquivo e assim utilizado em todos os ensaios. Além da calibração da máquina em si, era necessário a calibração do extensômetro, que este tem por definição 12,5 mm como o marco zero, as variações obtidas a partir deste valor são registradas em uma tabela como deformação adimensional (mm/mm).

O coeficiente de Poisson calculado é obtido através da formulação 17.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Sendo que “ ε_t ” representa a deformação específica transversal e “ ε_l ” a deformação específica longitudinal da peça. Quando este coeficiente ν resulta em valores positivos, isto representa que enquanto a peça é tracionada longitudinalmente, há um empescoçamento na região central da peça encurtando a largura original da peça.

3.4. FLEXÃO

O ensaio de flexão é realizado no mesmo equipamento onde foram realizados os ensaios de tração, contudo para realizá-lo foi instalado um equipamento do professor orientador deste trabalho, onde este equipamento segue as padronizações da norma ASTM para ensaios de 3 apoios. As configurações do software para esta caracterização mecânica visou flexionar o corpo de prova através da compressão do material. A extensão máxima configurada no BlueHill foi de 20 mm, satisfazendo a extensão máxima até obter falhas no material para todos os filamentos utilizados.

A norma da ASTM de designação D790, que descreve a caracterização mecânica por flexão, não está presente como deve ser realizado um ensaio para peças impressas em impressora 3D, por isso utilizou-se o padrão de dimensionamento de peças para materiais moldáveis, que abrange os termoplásticos, onde as peças são retangulares e preferencialmente devem ter dimensões de 127,00 mm de comprimento, 12,70 mm de largura e 3,20 mm de espessura.

O mínimo de corpos de prova exigido pela norma para ter dados de forma significativa são de cinco peças. Por isso foram feitas cinco peças em cada orientação de cada material, totalizando quarenta e cinco peças ensaiadas neste método.

A norma deixa evidente como devem ser posicionados os suportes no corpo de prova para obter um resultado mais preciso. Para isso é utilizada a equação 13, descrita a seguir:

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

“R” representa a taxa de movimento em mm/min da carga superior da máquina que pressiona a peça comprimindo-a. Esta taxa de movimento de compressão da carga da máquina deve ser menor que 2 mm/min estabelecido pela norma. “Z” representa a taxa de deformação da fibra mais externa em mm/mm/min, “Z” deve ser igual a 0,01. “L” a distância entre os suportes de apoio da máquina em milímetros, e “d” a espessura da peça em milímetros. “R” resultou em 1,3653 mm/min, e foi então arredondado para 1,40 mm/min na máquina, atendendo a exigência da norma de não variar mais do que 10% do valor original e seguindo o estabelecido de ser uma taxa menor que 2 mm/min.

Para chegar ao objetivo do valor do módulo de Elasticidade e do seu desvio padrão, são aplicadas as seguintes fórmulas.

$$\sigma_{fl} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (14)$$

Em que σ_f representa a tensão flexional, “P” a carga exercida sob o corpo de prova, “L” a distância entre os apoios, “b” a largura do corpo de prova e “d” sua espessura, encontrados na equação 14.

Obtido a tensão, agora será necessário obter a deformação específica, portanto as seguintes fórmulas são fundamentais, sendo estas fornecidas pela norma.

$$D = \frac{rL^2}{6d} \quad (15)$$

“D” significa a deflexão de meia distância, necessária no cálculo da deformação flexional. “r” é a deformação dada pela norma de 0,05, como padrão, “L” a distância dos apoios e por fim “d” que representa a espessura do material ensaiado. Este equacionamento 15 sendo solucionado, é então aplicada a formulação da deformação flexional encontrada na equação 16:

(16)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

Sendo que “ ε_f ” representa a deformação, “D” a deflexão de meia distância obtida anteriormente, “d” a espessura do corpo de prova e “L” a distância entre apoios.

A instalação do equipamento para o ensaio de flexão é feito na mesma máquina para tração, no entanto as garras são diferentes para o ensaio de tração de peças em plástico, as garras foram modificadas para o padrão de peças cilíndricas para se adaptar com o suporte superior e inferior. Abaixo é possível perceber de forma mais clara o equipamento na figura 42.



Figura 42: Ensaio de Flexão realizada no laboratório (Fonte: Próprio autor, 2018).

O equipamento de flexão para este ensaio possui três suportes móveis para se adequar a exigência da distância entre apoios.

Os procedimentos de inicialização de todo o maquinário já descritos acima para o ensaio de tração, seguem da mesma maneira, com a diferença que ao invés de tracionar, este irá comprimir a peça, sendo necessário pôr os valores das dimensões da peça, taxa de compressão, os resultados a serem obtidos e a extensão máxima até o fim do procedimento.

3.5. IMPACTO DE CHARPY

Para o ensaio de Charpy seriam feitos cinco corpos de prova para cada amostra em uma orientação de construção. O equipamento de impacto de Charpy da empresa Pantec possui medição até 300 Joules e está ilustrado nas imagens 43 e 44.



Figura 43: Equipamento de Impacto de Charpy (Fonte: Próprio autor, 2017).



Figura 44: Escala do ensaio de Charpy (Fonte: Próprio autor, 2017).

A peça desenvolvida no software CATIA para o ensaio de impacto de Charpy possui um padrão como ilustrado na imagem 45 a seguir, baseado nos padrões da norma ASTM mencionados na revisão bibliográfica.

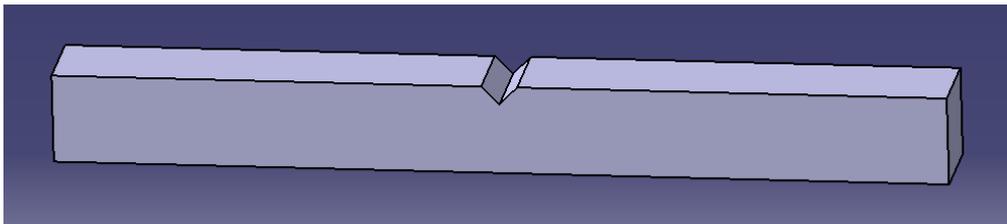


Figura 45: Peça construída para ensaio de impacto de Charpy no Catia (Fonte: Próprio autor, 2017).

Este ensaio não teve prosseguimento devido à limitação do maquinário no laboratório, que restringia à peças metálicas segundo a norma da ASTM, porém este mesmo equipamento possibilitou a realização de ensaios de impacto izod que será descrito a diante.

3.6. IMPACTO IZOD

O ensaio por Izod é o procedimento mais simples em relação aos demais. Primeiramente o pêndulo é fixado a um ângulo de 90° em relação ao posicionamento do corpo de prova. A peça é posta na base fixado através de parafusos Allen, que seguram uma placa que pressiona a peça na base do dispositivo. A peça é posicionada verticalmente com metade do seu comprimento exposto ao impacto do pêndulo. O lado que apresenta entalhe na peça é posicionado contra o lado do ponto de impacto do pêndulo, seguindo assim o método “E” da norma.

Depois de posicionado corretamente o corpo de prova é zerado manualmente o ponteiro na escala em Joules. A intenção deste ensaio é constatar a absorção de energia da peça tendo em vista a possibilidade de variação na trajetória do pêndulo. Caso este não se eleve no fim do curso até a marca zero, este material ensaiado “inibiu” o movimento completo resultando em uma dada energia absorvida.

Para esta caracterização, o dimensionamento esteve conforme a norma, sendo os mesmo valores utilizados na impressão de “A” a “E”, como citado na caracterização 2.4.10. deste trabalho, e o valor para F que varia entre 3,00 e 12,70 mm, foi definido como 8,80 mm.

A norma prevê no mínimo cinco ensaios como resultado significativo, tendo em vista este fato foram feitas cinco peças em cada orientação para cada material, resultando em quarenta e cinco amostras ensaiadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados nos ensaios de caracterização são debatidos neste capítulo sendo feita uma relação destes resultados com uma dada referência como é o caso da fabricante dos filamentos, que possui dados relevantes ao ensaio de tração.

4.1. EXCITAÇÃO POR IMPULSO

Os resultados do TCC 1 estão subdivididos por filamentos. As amostras de PETG foram as que tiveram melhores resultados de impressão, as peças de PLA tiveram leve empenamento nas suas extremidades, mas foram consideradas para o ensaio, já as de ABS da fabricante UP3D provocaram problemas por empenamento, entupimento do bocal, na impressão da peça vertical teve que ser refeita algumas impressões devido à queda da peça próximo ao fim do processo. Para isso foi necessário usar hastes de apoio para concluir o desenvolvimento das peças deste material em particular. Estas peças estão presentes na figura 46.



Figura 46: Peça em PETG nas orientações vertical, horizontal e chapado (Fonte: Próprio autor, 2017).

Devido aos problemas encontrados com as peças em ABS foram feitas novas modelagens a fim de diminuir os problemas percebidos de empenamento e apoio nos filamentos da UP3D que seguem ilustradas no

apêndice B. Uma camada de 1 mm visa reduzir distorções nas peças de ABS na orientação Y. As hastes de apoio e a base são removidas com estilete. As peças com construção horizontal tiveram problemas de empenamento e queda assim como as peças de construção vertical.

Os dados do estudo estão seccionados por material, fabricante e orientação de construção tiveram como valor base 120 mm de comprimento, 30 mm de largura e 6 mm de espessura como debatido anteriormente estão descritos nas tabelas de 4 a 12. A tabela completa com todos os dados encontra-se no apêndice A.

- Peças de material PETG:

Tabela 4: Dados da prototipagem na orientação Z - PETG

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	
	PETG	
Orientação de Construção	<i>Vertical – eixo Z</i>	
Média do Comprimento (mm)	124,17	124,03
Desvio Padrão do Comprimento	0,14	0,06
Média da Largura (mm)	30,48	30,52
Desvio Padrão da Largura	0,07	0,08
Média da espessura (mm)	6,43	6,43
Desvio Padrão da espessura	0,08	0,05
Módulo de elasticidade (E)	$1,71 \pm 0,10$	$1,70 \pm 0,08$

Fonte: Próprio autor (2017).

Tabela 5: Dados da prototipagem na orientação X - PETG

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	
	PETG	
Orientação de Construção	<i>Horizontal – eixo X</i>	
Média do Comprimento (mm)	121,81	121,79
Desvio Padrão do Comprimento	0,13	0,04
Média da Largura (mm)	31,13	31,33
Desvio Padrão da Largura	0,12	0,24
Média da espessura (mm)	6,35	6,25
Desvio Padrão da espessura	0,06	0,06
Módulo de elasticidade (E)	$1,83 \pm 0,10$	$1,82 \pm 0,10$

Fonte: Próprio autor (2017).

Tabela 6: Dados da prototipagem na orientação Y - PETG

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	
	PETG	
Orientação de Construção	<i>Chapado – eixo Y</i>	
Média do Comprimento (mm)	121,75	121,71
Desvio Padrão do Comprimento	0,09	0,03
Média da Largura (mm)	30,55	30,50
Desvio Padrão da Largura	0,05	0,09
Média da espessura (mm)	6,35	6,39
Desvio Padrão da espessura	0,05	0,06
Módulo de elasticidade (E)	$1,57 \pm 0,08$	$1,57 \pm 0,08$

Fonte: Próprio autor (2017).

As amostras de PETG comprovam que o módulo de elasticidade das peças com construção em X (horizontal) são superiores as das demais orientações. A construção vertical resultou em um valor esperado, já que a deposição das camadas nesta orientação tende a diminuir a resistência do material quando tracionada.

O resultado registrado na primeira parte do trabalho alcançou valores razoáveis para tensão de cisalhamento e coeficiente de poisson. No entanto, na segunda parte do trabalho estes dados não foram considerados, tendo em vista que o equipamento não apresenta suporte para valores mais precisos do módulo de cisalhamento.

O módulo de elasticidade foi levemente inferior ao esperado na bibliografia devido a anisotropia do material, sendo o módulo do PETG de 2,1 GPa (MAKEITFROM; 3D LAB, 2017).

- Peças de material PLA:

Tabela 7: Dados da prototipagem na orientação Z - PLA

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	
Orientação de Construção	PLA	
	Vertical – eixo Z	
Média do Comprimento (mm)	124,10	123,99
Desvio Padrão do Comprimento	0,24	0,09
Média da Largura (mm)	30,32	30,34
Desvio Padrão da Largura	0,13	0,04
Média da espessura (mm)	6,43	6,65
Desvio Padrão da espessura	0,13	0,03
Módulo de elasticidade (E)	3,10 ± 0,26	2,97 ± 0,13

Fonte: Próprio autor (2017).

Tabela 8: Dados da prototipagem na orientação X - PLA

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	
Orientação de Construção	PLA	
	Horizontal – eixo X	
Média do Comprimento (mm)	121,69	121,77
Desvio Padrão do Comprimento	0,15	0,17
Média da Largura (mm)	31,35	31,20
Desvio Padrão da Largura	0,10	0,14
Média da espessura (mm)	6,24	6,37
Desvio Padrão da espessura	0,03	0,03
Módulo de elasticidade (E)	3,42 ± 0,15	3,35 ± 0,15

Fonte: Próprio autor (2017).

Tabela 9: Dados da prototipagem na orientação Y - PLA

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	PLA	
Filamento	Chapado – eixo Y	
Orientação de Construção		
Média do Comprimento (mm)	121,72	121,77
Desvio Padrão do Comprimento	0,07	0,05
Média da Largura (mm)	30,47	30,41
Desvio Padrão da Largura	0,07	0,06
Média da espessura (mm)	6,40	6,32
Desvio Padrão da espessura	0,08	0,07
Módulo de elasticidade (E)	2,89 ± 0,17	3,30 ± 0,19

Fonte: Próprio autor (2017).

As amostras de PLA ratificam que o módulo de elasticidade das peças com construção em X (horizontal) são superiores as das demais orientações. A construção vertical resultou em um valor esperado, já que a deposição das camadas nesta orientação tende a diminuir a resistência do material quando tracionada como visto no PETG.

O módulo de elasticidade do PLA foi levemente inferior ao esperado na bibliografia devido a anisotropia do material, sendo o módulo do PETG de 3,5 GPa (3DLAB, 2018). O melhor resultado foi da orientação em X da fabricante 3DLAB com 3,42 GPa.

- Peças de material ABS:

Tabela 10: Dados da prototipagem na orientação Z - ABS

Fabricantes	3DLAB
Filamento	ABS
Orientação de Construção	Vertical – eixo Z
Média do Comprimento (mm)	123,85
Desvio Padrão do Comprimento	0,14
Média da Largura (mm)	30,63
Desvio Padrão da Largura	0,03
Média da espessura (mm)	6,38
Desvio Padrão da espessura	0,03
Módulo de elasticidade (E)	1,89 ± 0,10

Fonte: Próprio autor (2017).

Tabela 11: Dados da prototipagem na orientação X - ABS

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	ABS
Orientação de Construção	<i>Horizontal – eixo X</i>	
Média do Comprimento (mm)	121,85	121,92
Desvio Padrão do Comprimento	0,29	0,55
Média da Largura (mm)	30,58	31,28
Desvio Padrão da Largura	0,59	0,48
Média da espessura (mm)	6,85	6,94
Desvio Padrão da espessura	0,21	0,29
Módulo de elasticidade (E)	1,79 ± 0,22	2,18 ± 0,33

Fonte: Próprio autor (2017).

Tabela 12: Dados da prototipagem na orientação Y - ABS

Fabricantes	3DLAB	UP3D
	Filamento	ABS
Orientação de Construção	<i>Chapado – eixo Y</i>	
Média do Comprimento (mm)	121,51	121,69
Desvio Padrão do Comprimento	0,06	0,07
Média da Largura (mm)	30,55	30,67
Desvio Padrão da Largura	0,12	0,16
Média da espessura (mm)	6,41	6,47
Desvio Padrão da espessura	0,33	0,15
Módulo de elasticidade (E)	1,97 ± 0,36	2,35 ± 0,23

Fonte: Próprio autor (2017).

Devido à complicação na impressão da peça vertical em ABS da fabricante UP3D, não foram inseridos resultados referente a esta peça. Quanto aos demais testes com o ABS, houveram inconsistências nos resultados comparativo entre as duas fabricantes, além de um elevado desvio padrão das medições quando comparado aos demais corpos de prova, os valores do módulo de elasticidade tiveram grandes variações. Porém os resultados condizem com a bibliografia, onde o módulo de elasticidade está entre 2,0 e 2,6 GPa, sendo alguns resultados levemente inferiores, mas esperados devido a anisotropia das peças.

No progresso do trabalho de TCC 2, foram feitas reavaliações do desenvolvimento do trabalho, e ficou determinado que os valores do coeficiente de Poisson e do módulo de cisalhamento, obtidos nos ensaios de excitação por impulso, seriam removidos, tendo em vista a rigorosidade da norma quanto ao apoio da peça no equipamento de ensaio, tendo em vista que, para a obtenção de resultados consistentes do módulo de cisalhamento, seria necessário um apoio centralizado longitudinalmente a peça. Na continuação dos ensaios no intuito de fornecer o módulo de elasticidade para uma amostra significativa para a norma, foram feitas quinze peças de PLA, cinco em cada direção para

desta forma estar de acordo com a quantidade mínima de peças ensaiadas pela ASTM. As tabelas de 13 à 16 expressam as características das peças.

Tabela 13: Valores para peças de construção chapado

Peça	Peso (g)			Medidas (mm)		
	1	26,9579	26,9578	26,9580	L - 122,40	L - 122,60
W - 31,10					W - 30,80	W - 31,00
T - 6,30					T - 6,20	T - 6,10
2	26,8216	26,8218	26,8217	L - 122,50	L - 122,30	L - 122,20
				W - 31,10	W - 30,60	W - 30,80
				T - 6,30	T - 6,30	T - 6,10
3	26,8972	26,8971	26,8972	L - 122,00	L - 122,10	L - 122,00
				W - 31,00	W - 30,90	W - 30,80
				T - 6,20	T - 6,10	T - 6,20
4	26,7454	26,7452	26,7454	L - 121,90	L - 121,80	L - 121,90
				W - 30,60	W - 30,50	W - 30,70
				T - 6,50	T - 6,40	T - 6,40
5	26,7269	26,7270	26,7270	L - 122,30	L - 122,20	L - 122,10
				W - 30,70	W - 30,40	W - 30,70
				T - 6,60	T - 6,40	T - 6,30

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Tabela 14: Valores para peças de construção horizontal

Peça	Peso (g)			Medidas (mm)		
	1	28,3804	28,3805	28,3805	L - 121,90	L - 121,70
W - 31,00					W - 31,10	W - 31,30
T - 6,40					T - 6,40	T - 6,50
2	28,3865	28,3863	28,3866	L - 122,00	L - 121,70	L - 121,80
				W - 31,00	W - 30,80	W - 30,70
				T - 6,60	T - 6,30	T - 6,20
3	28,6410	28,6408	28,6410	L - 121,90	L - 121,50	L - 121,60
				W - 31,70	W - 30,60	W - 30,90
				T - 6,40	T - 6,30	T - 6,40
4	28,8948	28,8947	28,8946	L - 121,70	L - 121,50	L - 121,80
				W - 31,10	W - 30,80	W - 30,60
				T - 6,70	T - 6,40	T - 6,20
5	28,7139	28,7143	28,7141	L - 121,60	L - 121,80	L - 121,80
				W - 31,00	W - 30,90	W - 31,20
				T - 6,30	T - 6,30	T - 6,40

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Tabela 15: Valores para peças de construção vertical

Peça	Peso (g)			Medidas (mm)		
	1	28,3387	28,3386	28,3386	L - 123,40 W - 30,30 T - 7,10	L - 123,50 W - 30,30 T - 7,00
2	28,6497	28,6496	28,6498	L - 123,50 W - 30,10 T - 6,70	L - 123,40 W - 30,20 T - 7,00	L - 123,60 W - 30,70 T - 6,80
3	28,6483	28,6482	28,6484	L - 123,70 W - 30,10 T - 7,40	L - 123,60 W - 30,20 T - 7,20	L - 123,40 W - 30,70 T - 7,60
4	28,5345	28,5345	28,5346	L - 123,40 W - 30,20 T - 7,50	L - 123,30 W - 30,10 T - 7,20	L - 123,50 W - 30,40 T - 7,40
5	29,0405	29,0407	29,0406	L - 123,80 W - 30,30 T - 7,50	L - 123,70 W - 30,20 T - 7,10	L - 123,60 W - 30,20 T - 7,30

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Tabela 16: Resultados do último ensaio de excitação por impulso

Peça	Frequência	Amplitude	Frequência	Amplitude	Módulo de Elasticidade (E) em GPa
	Flexional (Hz)	Flexional (Vpp)	Torcional (Hz)	Torcional (Vpp)	
PLA CHAPADO - Y					
1	703,780	0,001145	1920,837	0,001098	3,21 ± 0,23
2	702,851	0,000944	1926,675	0,000753	3,10 ± 0,21
3	703,343	0,000934	1928,978	0,000871	3,21 ± 0,20
4	722,069	0,000790	1963,183	0,000675	2,99 ± 0,18
5	714,698	0,000710	1948,228	0,000673	2,95 ± 0,25
PLA HORIZONTAL - X					
1	760,195	0,000907	2061,146	0,000826	3,44 ± 0,21
2	761,067	0,001031	2077,387	0,000944	3,49 ± 0,21
3	766,379	0,000989	2091,117	0,001330	3,68 ± 0,22
4	773,793	0,000880	2103,871	0,001256	3,58 ± 0,44
5	763,802	0,000890	2084,291	0,001138	3,69 ± 0,22
PLA VERTICAL - Z					
1	711,557	0,000892	1944,269	0,001119	2,51 ± 0,16
2	717,232	0,000653	1960,428	0,000933	2,77 ± 0,23
3	722,112	0,000880	1957,307	0,001149	2,22 ± 0,20
4	711,612	0,000866	1925,121	0,001312	2,18 ± 0,16
5	734,298	0,000915	1969,888	0,001126	2,44 ± 0,22

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Como citado na metodologia a resolução do paquímetro para estes últimos ensaios foi de 0,10 mm. Nas tabelas acima, nas colunas de medidas, as letras L, W e T representam o comprimento (L), largura (W) e espessura (T).

A mudança nas velocidades de impressão entre as peças desenvolvidas na primeira parte do trabalho e as demais desenvolvidas neste segundo momento para ensaios de excitação por impulso, não tiveram diferença

significativa, tendo em vista a baixa variação de velocidade, de 30 mm/s para 50 mm/s dos perímetros e preenchimento.

O resultado médio dos valores obtidos para peças em PLA de construção chapado, considerando módulo de Elasticidade E como 3,09 GPa. Já a resultante dos valores médios obtidos para peças de construção horizontal, considerando E como 3,58 Gpa, e por fim o resultado médio obtido para os corpos de prova de construção vertical, sendo o módulo E analisado obtendo-se 2,42 GPa. Segundo a fabricante o módulo de elasticidade para corpos de prova de PLA impresso resulta em 1,896 GPa em média, já o módulo de elasticidade do material granulado, antes de ser utilizado como material de impressão possui 4,35 GPa.

As peças criadas para este ensaio estão ilustradas na imagem 47.



Figura 47: As quinze peças para caracterização de excitação por impulso (Fonte: Próprio autor, 2018).

Os resultados para o módulo de elasticidade para as três direções de construção estiveram entre os valores mencionados pela fabricante 3D LAB, porém há uma proximidade das peças horizontais de 3,58 GPa ao módulo do grão de 4,35 GPa. Isso mostra que os resultados foram mais satisfatórios que os próprios desenvolvidos pela empresa, apesar de não haver informações sobre as configurações utilizadas no fatedor. São dados mais satisfatórios do que o esperado tendo em vista os resultados apresentados pelo próprio fabricante.

4.2. TRAÇÃO

Os resultados foram compilados em uma planilha no excel facilitando assim as manipulações em busca dos resultados de tensão por deformação, resultando no módulo de elasticidade, desvio padrão e coeficiente de Poisson. Tendo em vista os resultados a serem alcançados, utilizou-se o extensômetro para obter a deformação enquanto o gráfico carga por extensão se manteve linear. Durante o ensaio era preciso retirar o extensômetro da peça, tendo em vista que a tração exercida no ponto de ruptura da peça poderia danificar o extensômetro. Desta maneira é feita uma razão da coluna obtida de tensão com a deformação específica longitudinal, resultando no módulo de elasticidade E ponto a ponto, assim é feita uma média de todos os valores, na região linear do gráfico para as cinco peças.

Os valores encontrados estão descritos na tabela 17.

Tabela 17: Média do Módulo de Elasticidade, Desvio e Coeficiente de Poisson de todos os ensaios

<i>Direção de construção</i>	<i>Média do Módulo de Elasticidade (E) - MPa</i>	<i>Média do Desvio Padrão do Módulo (E)</i>	<i>Coeficiente de Poisson Médio</i>
<i>PLA</i>			
<i>Chapado</i>	3499,98	± 5,32	+0,33
<i>Horizontal</i>	3841,16	± 6,64	+0,33
<i>Vertical</i>	3515,69	± 4,95	+0,16
<i>ABS</i>			
<i>Chapado</i>	2336,13	± 3,01	+0,25
<i>Horizontal</i>	2231,11	± 2,42	+0,26
<i>Vertical</i>	2236,33	± 8,73	+0,24
<i>PETG</i>			
<i>Chapado</i>	1446,98	± 1,51	+0,35
<i>Horizontal</i>	1679,83	± 2,50	+0,29
<i>Vertical</i>	1666,33	± 3,94	+0,18

Fonte: Próprio Autor, 2018.

De acordo com os resultados da própria fabricante, o módulo obtido de PLA e PETG deram acima dos corpos de prova impressos pela 3D LAB, e abaixo do módulo dos grãos. Isso mostra resultados altamente satisfatórios, no entanto é importante reportar que a fabricante não mencionou as configurações

do fateador. Os ensaios com ABS resultaram em valores iguais ao módulo de elasticidade do grão, o que impressiona por ter sido esperado valores intermediários como os outros materiais. É importante reiterar que todos os ensaios foram executados de maneira similar e seguindo as normas da ASTM.

Os gráficos 1 a 3 retratam a curva tensão x deformação dos materiais ensaiados.

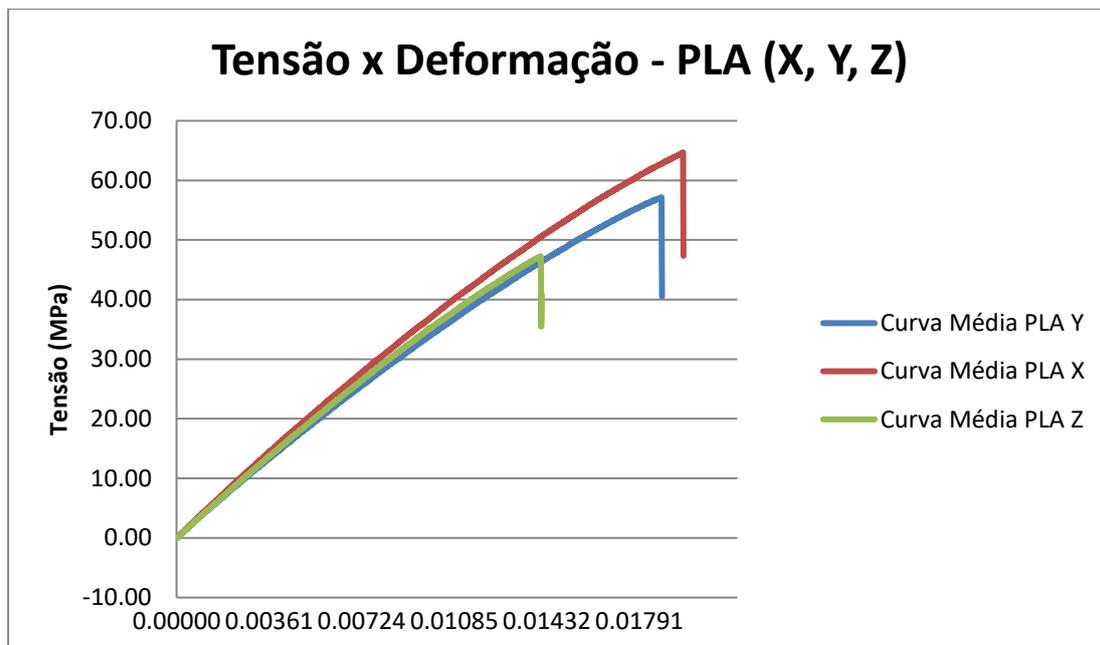


Gráfico 1: Tensão x Deformação de peças em PLA nas três direções (Fonte: Próprio Autor, 2018).

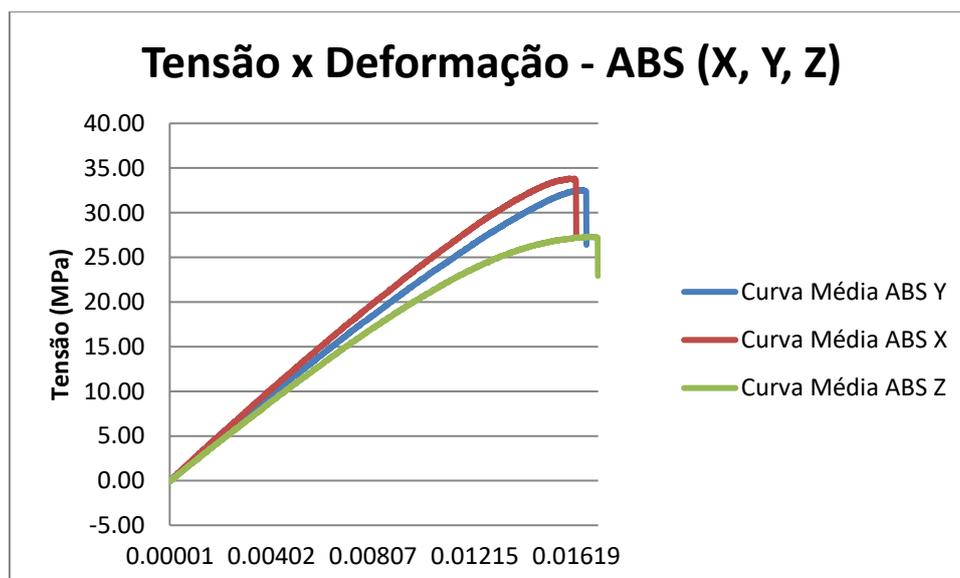


Gráfico 2: Tensão x Deformação de peças em ABS nas três direções (Fonte: Próprio Autor, 2018).

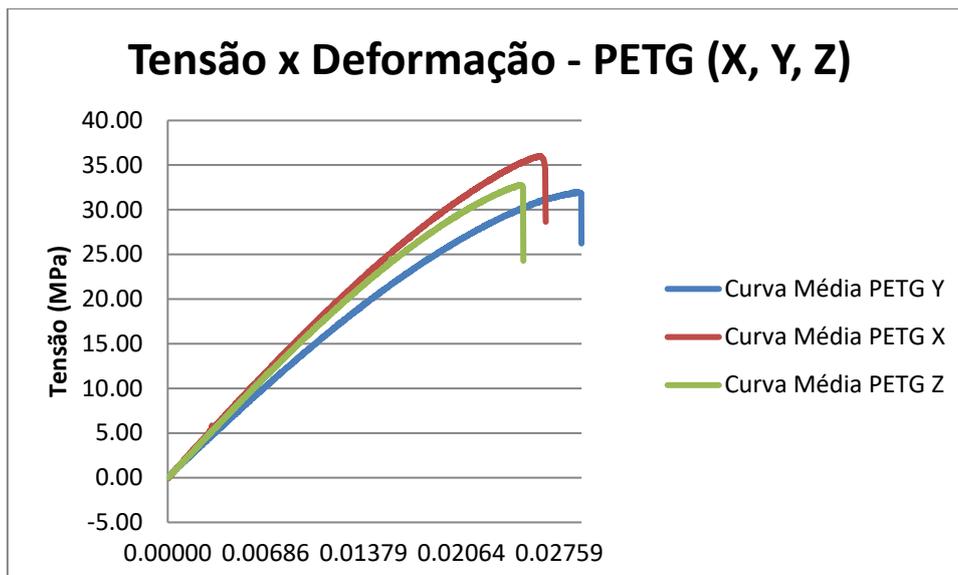


Gráfico 3: Tensão x Deformação de peças em PETG nas três direções (Fonte: Próprio Autor, 2018).

Tendo em vista que o extensômetro foi utilizado com uma margem de segurança para evitar que este estivesse na peça durante a tensão última podendo danificar o equipamento, o extensômetro era retirado assim que percebida a curva no gráfico. No entanto para obter os valores da deformação específica na tensão última foi feita uma curva de calibração que possibilitou os gráficos acima. Esta curva de calibração é a razão da média das deformações das peças para cada orientação obtidas pelo extensômetro, pela média das deformações obtidas pela máquina ponto a ponto e então é feita uma média dessa razão. Desta forma este último valor obtido é usado como parâmetro para uma multiplicação com a deformação encontrada pela máquina, podendo assim obter a deformação que seria captada pelo extensômetro, caso este estivesse na peça até o momento de ruptura. Por fim é plotado o gráfico tensão x deformação, resultando nos gráficos acima.

Algumas peças tiveram que ser substituídas durante os ensaios, e isto ocorria primordialmente quando o extensômetro deslizava sobre a peça e não captava a deformação de forma correta. Outro caso que tornava necessário a realização de um ensaio substitutivo era quando havia fratura nos extremos de “L” (como retrata a norma), região afastada do centro da peça, e também ocorria substituições em casos como desta peça da imagem 48 que segue:



Figura 48: Peça de PLA fraturada em ensaio de tração (Fonte: Próprio autor, 2018).

Este comportamento na região de fratura se deve ao padrão de preenchimento da peça angulada em 45° , demonstrando as possíveis falhas que há em um material não injetado ou usinado como este.

A tensão de ruptura, é a tensão última que o material sofre até sua ruptura e a tensão de escoamento é a tensão onde ocorre a linha reta

A tensão média de ruptura e de escoamento das peças obtidas deste ensaio estão compiladas na tabela 18.

Tabela 18: Tensão de ruptura e escoamento dos corpos de prova

Materiais e Direção de construção	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Diferença percentual da tensão de escoamento	Diferença percentual da tensão de ruptura
PLA				
<i>Corpo de prova (3D LAB) - Referência</i>	24,80	46,00	0,00%	0,00%
<i>Corpo de prova horizontal (X)</i>	56,54	64,60	127,98%	40,43%
<i>Corpo de prova chapado (Y)</i>	47,65	57,00	92,14%	23,91%
<i>Corpo de prova vertical (Z)</i>	44,22	47,54	78,31%	3,35%
ABS				
<i>Corpo de prova (3D LAB) - Referência</i>	14,70	29,00	0,00%	0,00%
<i>Corpo de prova horizontal (X)</i>	27,94	33,97	90,07%	17,14%
<i>Corpo de prova chapado (Y)</i>	20,59	32,58	40,07%	12,34%
<i>Corpo de prova vertical (Z)</i>	22,09	27,88	50,27%	-3,86%
PETG				
<i>Corpo de prova (3D LAB) - Referência</i>	18,60	32,60	0,00%	0,00%
<i>Corpo de prova horizontal (X)</i>	28,65	34,73	54,03%	6,53%
<i>Corpo de prova chapado (Y)</i>	23,35	39,34	25,54%	20,67%
<i>Corpo de prova vertical (Z)</i>	24,61	33,22	32,31%	1,90%

Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.3. FLEXÃO

Esta caracterização exigiu um mínimo de quarenta e cinco peças, sendo quinze para cada material, e destes quinze, cinco em cada orientação. Este procedimento necessita de equações para obter o Módulo de Elasticidade que são fornecidas na norma da ASTM de designação D 790. O que é obtido pela máquina através deste ensaio, são a extensão e a carga aplicada no material.

Os resultados obtidos quanto ao módulo de elasticidade e ao desvio padrão, teve os primeiros 10% dos valores ignorados tendo em vista a variação na tensão de compressão da peça que resultava em valores negativos, desta maneira as resultantes do módulo e do desvio estão detalhadas na tabela 19 abaixo.

Tabela 19: Dados obtidos do ensaio de flexão

Direção de construção	Módulo de Elasticidade (E) MPa	Desvio Padrão
<i>PLA</i>		
<i>Chapado</i>	1075,31	± 7,44
<i>Horizontal</i>	1592,27	± 7,96
<i>Vertical</i>	1224,03	± 10,04
<i>ABS</i>		
<i>Chapado</i>	998,30	± 4,46
<i>Horizontal</i>	1017,56	± 5,54
<i>Vertical</i>	669,25	± 4,81
<i>PETG</i>		
<i>Chapado</i>	1030,32	± 6,08
<i>Horizontal</i>	1377,32	± 6,16
<i>Vertical</i>	1059,76	± 5,18

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Os dados do resultado de PETG segue o padrão de resultados obtidos pela fabricante para peças impressas no ensaio de tração, diferentemente do ABS e PLA que tiveram resultados a baixo do esperado. O que trouxe discussão foi o fato dos módulos de elasticidade pelo ensaio de flexão ter variado consideravelmente em relação aos ensaios de tração e excitação por impulso. Isso se deve ao fato de que a variação da deformação específica obtida pelo extensômetro é registrada ao longo do tempo, ocasionando valores mais precisos que os de flexão, tendo em vista que a anisotropia da peça corrobora uma maior variação neste tipo de ensaio do que nos ensaios de tração. O que levanta a questão é o fato de ser necessário um extensômetro para dados mais precisos no ensaio de tração, isso pode ter impactado para essa variação, tendo em vista que para o ensaio de flexão não havia nenhum dispositivo que pudesse dar maior acurácia aos resultados obtidos. Os gráficos da curva de tensão no ensaio de flexão estão presentes nos gráficos 4 a 6.

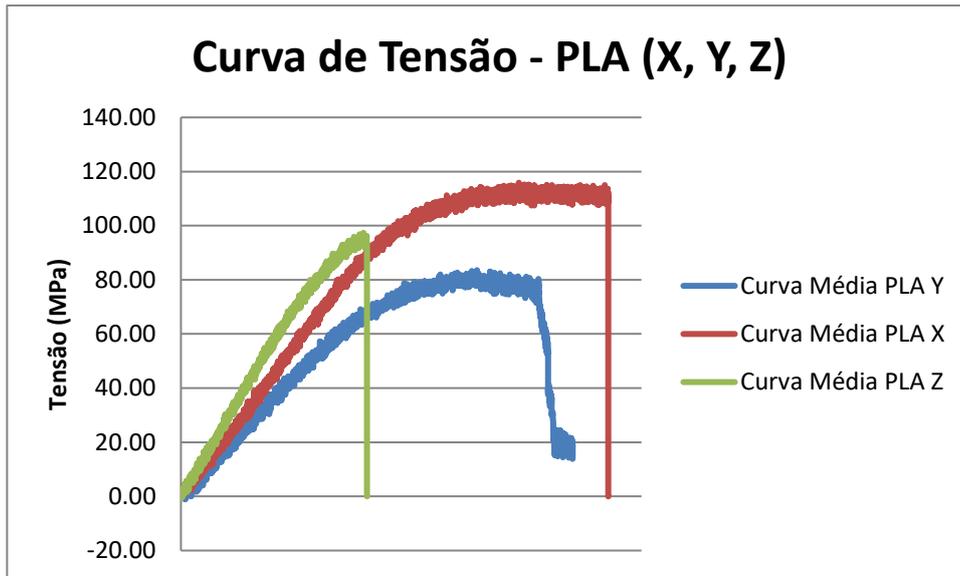


Gráfico 4: Curva de tensão de peças em PLA nas três direções no ensaio de flexão
(Fonte: Próprio Autor, 2018).

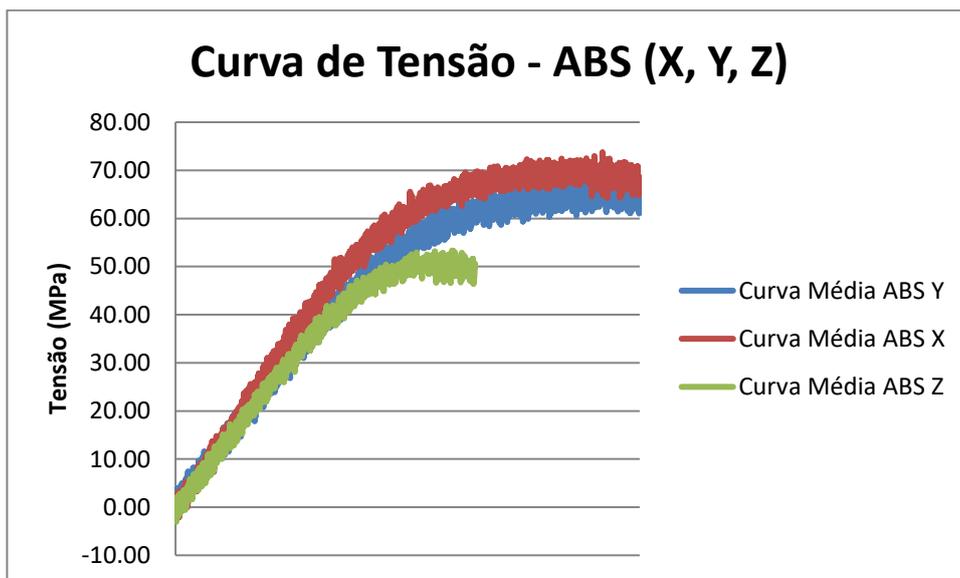


Gráfico 5: Curva de tensão de peças em ABS nas três direções no ensaio de flexão
(Fonte: Próprio Autor, 2018).

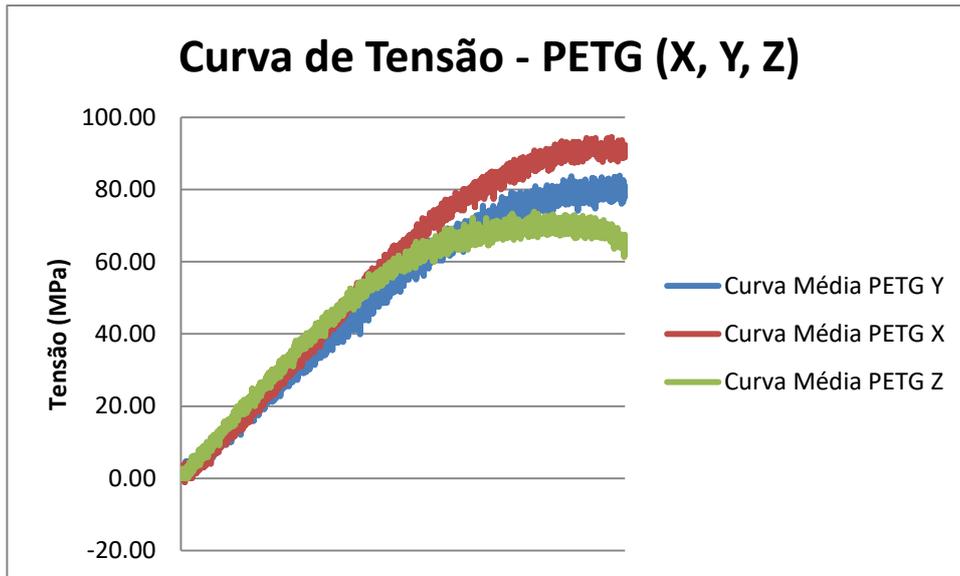


Gráfico 6: Curva de tensão de peças em PETG nas três direções no ensaio de flexão (Fonte: Próprio Autor, 2018).

Uma peça de caracterização mecânica de flexão com construção horizontal em PETG, demonstrada na figura 49, apresenta o padrão dos corpos de prova para este ensaio.



Figura 49: Peça de PETG para ensaio de flexão (Fonte: Próprio autor, 2018).

As tabelas 20 a 22 relaciona os valores do módulo de elasticidade da fabricante e dos ensaios realizados. Importante ressaltar que quando expresso as letras X, Y e Z na tabela a seguir, estas fazem referência as direções de construção das peças chapado, horizontal e vertical, respectivamente, como citado na metodologia.

Tabela 20: Percentual do Módulo de Elasticidade de PLA em relação a Fabricante

Módulos de elasticidade	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diferença Percentual
<i>Ensaio de Tração - Plástico granulado (3D LAB) - Referênci</i>	4,350	0,00%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova (3D LAB)</i>	1,896	-56,41%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova X</i>	3,841	-11,70%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova Y</i>	3,499	-19,56%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova Z</i>	3,515	-19,20%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova X</i>	1,592	-63,40%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova Y</i>	1,075	-75,29%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova Z</i>	1,224	-71,86%
<i>Ensaio de Excitação por Impulso - Corpo de prova X</i>	3,576	-17,79%
<i>Ensaio de Excitação por Impulso - Corpo de prova Y</i>	3,092	-28,92%
<i>Ensaio de Excitação por Impulso - Corpo de prova Z</i>	2,424	-44,28%

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Tabela 21: Percentual do Módulo de Elasticidade de ABS em relação a fabricante

Módulos de elasticidade	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diferença Percentual
<i>Ensaio de Tração - Plástico granulado (3D LAB) - Referênci</i>	2,200	0,00%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova (3D LAB)</i>	1,335	-39,32%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova X</i>	2,231	1,41%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova Y</i>	2,336	6,18%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova Z</i>	2,236	1,64%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova X</i>	1,017	-53,77%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova Y</i>	0,998	-54,64%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova Z</i>	0,669	-69,59%

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Tabela 22: Percentual do Módulo de Elasticidade de PETG em relação a fabricante

Módulos de elasticidade	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diferença Percentual
<i>Ensaio de Tração - Plástico granulado (3D LAB) - Referênci</i>	2,120	0,00%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova (3D LAB)</i>	1,067	-49,67%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova X</i>	1,679	-20,80%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova Y</i>	1,446	-31,79%
<i>Ensaio de Tração - Corpo de prova Z</i>	1,666	-21,42%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova X</i>	1,377	-35,05%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova Y</i>	1,030	-51,42%
<i>Ensaio de Flexão - Corpo de prova Z</i>	1,059	-50,05%

Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.4. IMPACTO IZOD

Foram confeccionadas quarenta e cinco peças para esta caracterização mecânica, sendo quinze peças para cada material sendo estes PLA, ABS e PETG. Todas as peças de PLA sendo cinco para cada direção, nenhuma delas

deram resultado diferente de zero, ou seja, na escala do equipamento utilizado, não foi possível perceber absorção de energia da peça.

O mesmo procedimento foi feito para os demais materiais. PETG foi um dos materiais que havia expectativa, porém não houve absorção de energia perceptível para análise.

Quando ensaiado o ABS, houveram resultados positivos para os corpos de prova que tiveram construção chapado e horizontal, já as peças verticais, assim como todas as peças de PETG e PLA, não tiveram absorção perceptível na escala do dispositivo.

As peças foram construídas no padrão, como na imagem 50 a seguir, de uma peça de PETG que foi ensaiada.



Figura 50: Peça de PETG ensaiada em um pêndulo de impacto Izod (Fonte: Próprio autor, 2018).

Os valores encontrados para as peças em ABS que foram fabricadas de forma chapada e horizontal, estão descritas nas tabelas 23 e 24:

Tabela 23: Energia absorvida por material ABS chapado por Izod

ABS - Chapado		
Peça	Energia absorvida (J)	Resistência ao Impacto ($\frac{kJ}{m^2}$)
1	5,0	55,923
2	4,0	44,738
3	3,0	33,554
4	2,0	22,369
5	3,5	55,923

Fonte: Próprio autor, 2018.

Tabela 24: Energia absorvida por material ABS horizontal por Izod

ABS - Horizontal		
Peça	Energia absorvida (J)	Resistência ao Impacto ($\frac{kJ}{m^2}$)
1	2,5	27,961
2	2,5	27,961
3	1,5	16,777
4	2,0	22,369
5	2,0	22,369

Fonte: Próprio autor, 2018.

A ficha técnica do ABS dada pela empresa Ultimaker, demonstra resistência ao impacto izod com entalhe de $10,5 \text{ kJ/m}^2$ para um material impresso. Já a empresa Elix Polimers, possui valores de 30 kJ/m^2 e 23 kJ/m^2 para plásticos injetados em ABS de alto e médio impacto respectivamente. É importante ressaltar que os ensaios foram feitos com peças de PLA, ABS e PETG, porém com a carga presente no equipamento, só foi possível perceber absorção de energia das peças de ABS de construção horizontal e chapado, como mencionado nas tabelas acima.

A área de impacto consiste da multiplicação $8,80 \text{ mm}$ e $10,16 \text{ mm}$ que resulta em $89,41 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. A resistência ao impacto é obtida através da divisão da energia absorvida pela área da seção de impacto.

Como exemplo, a imagem 51 a seguir, ajuda a compreender como foi obtido o resultado da peça 2 de ABS chapado, lembrando que cada divisão representa 1 joule.



Figura 51: Energia absorvida pela segunda peça de ABS chapado no ensaio de impacto izod
(Fonte: Próprio autor, 2018).

5. CONCLUSÃO

Pode se dizer que uma das barreiras enfrentadas no decorrer do trabalho foi o entupimento do bocal com o filamento de ABS, que prejudicou o andamento do trabalho devido a interrupção da impressão e retirada do equipamento para a limpeza do sistema nas primeiras peças de excitação por impulso quando foi avaliado duas fabricantes, e a necessidade de refazer algumas peças principalmente no ensaio de tração devido a fratura em local indevido para avaliação. Outro empecilho foi o empenamento de peças devido à temperatura da mesa aquecida e a taxa de resfriamento tendo leves distorções no material. Ainda houve obstáculos quanto à construção dos corpos de prova devido a necessidade de apoio para as peças verticais, que tiveram algumas quedas durante a impressão, para isso foram feitos novos modelos para os testes, sendo por fim padronizado para todos os corpos de prova verticais a construção do suporte na peça.

A principal dificuldade encontrada foi quanto a impressão das peças de náilon, pois devido a característica higroscópica do material, que absorve bastante umidade, este foi inviabilizado devido a necessidade da grande quantidade de peças para o teste.

Os objetivos foram reavaliados para a segunda etapa do trabalho, sendo que inicialmente o trabalho almejava além dos objetivos citados, a caracterização de peças sob vácuo, para verificar mudança nas propriedades do material com um ensaio como o de tração, assim como o ensaio com dilatômetro, para discussões do coeficiente térmico da peça, além de impacto de charpy. O ensaio de impacto de Charpy foi inviabilizado devido a característica do maquinário que não atende a norma da ASTM para ensaios com material plástico.

Os objetivos específicos definidos nesta segunda etapa do trabalho foram alcançados, tendo como uma das metas principais, a discussão sobre a relevância da anisotropia. Esta característica foi relevante principalmente para peças de construção vertical, onde esta direção de construção resultou em módulos de elasticidade inferiores aos chapado e horizontal nos ensaios de excitação por impulso e no ensaio de flexão das peças em ABS. Já no ensaio destrutivo de tração, os resultados foram bastante próximos não afetando tanto as propriedades para cada direção tendo como base o módulo de elasticidade.

Os resultados de excitação por impulso refeitas na segunda parte do trabalho, focando somente em PLA seguindo a norma, surpreendeu com valores acima do obtido pela fabricante em ensaios de tração, assim como os próprios resultados deste trabalho de ensaio de tração, que deram valores similares aos do grão, onde não há extrusão do material, para formar rolos de filamento. O trabalho tem caráter exploratório para analisar as características dos materiais, desta forma vários testes visaram a obtenção do módulo de elasticidade, e dentre estes o ensaio de flexão resultou em valores abaixo dos encontrados em tração e excitação por impulso devido a supostas tensões de contato dos suportes, tensão cisalhante de atrito, que pode causar alteração no momento fletor e deslocar a linha neutra da peça, diferentemente da tração onde esta é presa a garras e a deformação é obtida por extensômetro.

Este trabalho possui perspectivas futuras interessantes, como comparar estes resultados com peças construídas com um padrão de preenchimento 90° e -90° ou preenchimento 0° , pois desta maneira as fibras seriam puramente em uma direção. Analisar as diferenças do módulo de elasticidade para peças com 20% de preenchimento (*honeycomb*) e 100%. Outro exemplo intrigante seria constatar se há mudança nas propriedades para peças com taxa de fluxo de multiplicador 0.9 para 1.0 ou 1.1.

Referências bibliográficas

- AHN, S. H. *et al.* **Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS.** *Rapid Prototyping Journal*, v.8, n.14, 2002.
- ALBUQUERQUE, A. J. **Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas.** Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Espanha, 2014.
- ALVES, M. F. S. *et al.* **Design of the structure and Reentry System for the LAICAnSat-3 platform.** Brasil, 2016.
- ALVES, F. J. L. **Protoclick - Prototipagem Rápida**, 2001.
- ANTAS, A. F. F. **Utilização das tecnologias de prototipagem rápida na área médica.** Porto, Portugal, 2007.
- ASTM. **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.** EUA, 2004.
- ASTM. **Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.** EUA, 2004.
- ASTM. **Standard Test Methods for Determining the Effects of High Altitude on Packaging Systems by Vacuum Method.** EUA, 2013.
- ASTM. **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.** EUA, 2015.
- ASTM. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** EUA, 2003.
- ASTM. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** EUA, 2002.
- AZIMI, P. *et al.* **Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments.** EUA, 2016.
- BAGSIK, A.; SCHÖPPNER, V.; KLEMP, E. **FDM Part Quality Manufactured With Ultem*9085.** *Polymeric Materials Journal*, 2010.
- BELLEHUMEUR, C. T. *et al.* **Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process.** *Journal of Manufacturing Processes*, v.6, n.2, 2004.
- BELLINI, A.; GÜÇERI, S. **Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling.** *Rapid Prototyping Journal*, 2003.

BRANDÃO, F. M.; SANT'ANNA, D. R. **Influência da Estratégia de Fabricação de Peças Prototipadas em FDM no Alongamento e na Resistência à Tração**. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2005.

CANCIGLIERI, O.J. *et al.* **Processos de prototipagem rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos: uma abordagem comparativa**. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, Brasil, 2007.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid prototyping: principles and applications**. Ed 3. New York, EUA, 2010. ISBN: 978-9810245160.

CUNICO, M. W. M. **Estudo de Viabilidade de Tecnologia de Prototipagem Rápida Baseada em Materiais Fotopoliméricos Extrudados**. Curitiba, Brasil, 2008.

COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J.; MAHTO, M. **An overview of additive manufacturing (3D printing)**. *The 3D Opportunity Primer: The basics of additive manufacturing*. Texas, EUA, 2014.

ENSINGER. **Plastics used in aerospace technology**. 2004.

FERREIRA, A. C.; LAFRATTA, F.H. **Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas**. Santa Catarina, Brasil, 1998.

GRIMM, T. **Rapid prototyping benchmark: 3D printers**. T. A. Grimm Associates Inc. 2003. Disponível em: <<http://www.tagrimm.com/benchmark>>. Acesso em: Março, 2017.

GURRALA, P. K.; REGALLA, S. P. **Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling**: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part, 2014.

HOLZWARTH, D. J. **Method for building three-dimensional objects with extrusion based layer deposition system**. Stratasys Inc.. USA, 2006.

JCGM. **Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incertezas de medição (GUM)**. 2008.

KONZEN, A. L. **Avaliação da resistência mecânica à tração de peças produzidas por prototipagem rápida via modelagem por deposição de material fundido (FDM)**. Canoas, Brasil, 2015.

KRETSCHKEK, D. **Desenvolvimento de um Cabeçote de Extrusão por Êmbolo para Polipropileno Granulado Visando a Manufatura Aditiva**.

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.

LAFRATTA, F. H. **Uso de Fluido Refrigerante, Temporariamente Confinado, em ferramental Rápido para Injeção de Termoplástico.** Santa Catarina, Brasil, 2003.

LEITE, W. O. *et al.* **Prototipagem rápida por deposição de material fundido - uma aplicação acadêmica.** Belo Horizonte, Brasil, 2011.

LIMA, M. V. A. **Modelo de Fatiamento Adaptativo para Prototipagem Rápida** - Implementação no Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). Dissertação Mestrado – Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LINO, F. J.; NETO, R. **A Prototipagem Rápida na Indústria Cerâmica, Comparação com outros sectores Industriais.** Revista Kéramica. Porto, Portugal, 2003.

LIU, F.W. **Rapid Prototyping and Engineering Applications: a toolbox for prototype development.** New York, EUA, 2007.

MAGALHÃES, L. C. **A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

NETTO, A. C. **Prototipagem Rápida: uma ferramenta de projeto para a redução do tempo de desenvolvimento e melhoria de qualidade de produtos.** Gramado, Brasil, 2003.

OLIVEIRA, P. M.; OLIVEIRA, R. D.; **A utilização da prototipagem rápida em design de produtos para empresas de pequeno porte: um estudo de caso.** Belo Horizonte, Brasil, 2007.

PEREIRA, E.J. **CAD e engenharia reversa como ferramentas de auxílio na fabricação de cartuchos para próteses ortopédicas.** Dissertação em Mestrado de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

PERES, R. V. **Caracterização e Processamentos do Poli(Ácido Lático) 70/30 Para Impressão 3D.** Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

- RAJA, I.; FERNANDES, V. J. **Reverse engineering: an industrial perspective**. Londres, Inglaterra, 2008. ISBN = 978-1-84628-855-5.
- REZWAN, K. **Biodegradable and Bioactive Porous Polymer/Inorganic Composite Scaffolds for Bone Tissue Engineering**. Reino Unido, 2006.
- SANTANA, L. **Avaliação de uma Impressora 3D Baseada em Projeto de Código Aberto na Fabricação de Peças em PLA**. Florianópolis, Brasil, 2015.
- SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. **Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts**. *Materials & Design Journal*, 2010.
- STRATASYS INC. Steven Scott Crump. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**. Minneapolis, EUA, 1989.
- SUN, Q. *et al.* **Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments**. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 14. 2008.
- VOLPATO, N. *et al.* **Prototipagem Rápida Tecnologias e Aplicações**. Ed. Blucher. São Paulo, Brasil, 2007. ISBN: 9788521203889.
- YAGNIK, D. **Fused Deposition Modeling – A Rapid Prototyping technique for Product Cycle Time Reduction cost effectively in Aerospace Applications**. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. India, 2014.

APÊNDICES

Apêndice A – Valores referentes às medições dimensionais das peças, propriedades médias e desvios padrões.

POLITEREFTALATO DE ETILENO GLICOL (PETG)

3DLAB

- Peça na orientação Z (vertical);

Tabela 25: Dados PETG – Vertical

Peça PETG CLARO - VERTICAL	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	124,30		
Medida 2	123,98	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	124,22	124,17	0,14
LARGURA (W)			
Medida 1	30,58		
Medida 2	30,44	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,42	30,48	0,07
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,54		
Medida 2	6,36	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,40	6,43	0,08
Peso em gramas	29,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,19		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,71 ± 0,10	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,66 ± 0,03	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,30 ± 0,08		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	509,133		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,013584		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1157,843		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,020105		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação X (horizontal);

Tabela 26: Dados PETG – Horizontal

Peça PETG CLARO - HORIZONTAL		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,74		
Medida 2	121,70	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	122,00	121,81	0,13
LARGURA (W)			
Medida 1	31,00		
Medida 2	31,28	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	31,10	31,13	0,12
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,30		
Medida 2	6,32	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,44	6,35	0,06
Peso em gramas	29,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,20		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,83 ± 0,10	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,64 ± 0,03	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,44 ± 0,08		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	537,246		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,018884		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1121,369		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,038481		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Y (chapado);

Tabela 27: Dados PETG – Chapado

Peça PETG CLARO - CHAPADO		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,64		
Medida 2	121,78	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,84	121,75	0,09
LARGURA (W)			
Medida 1	30,50		
Medida 2	30,54	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,60	30,55	0,05
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,30		
Medida 2	6,34	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,40	6,35	0,05
Peso em gramas	28,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,19		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,57 ± 0,08	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,61 ± 0,03	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,28 ± 0,07		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	501,484		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,021120		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1126,166		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,014370		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

UP3D

- Peça na orientação Z (vertical);

Tabela 28: Dados PETG – Vertical

Peça PETG ESCURO - VERTICAL	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	124,00		
Medida 2	123,98	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	124,12	124,03	0,06
LARGURA (W)			
Medida 1	30,42		
Medida 2	30,60	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,54	30,52	0,08
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,38		
Medida 2	6,48	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,42	6,43	0,05
Peso em gramas	29,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,19		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,70 ± 0,08	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,64 ± 0,03	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,33 ± 0,07		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	508,583		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,032206		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1143,422		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,015774		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação X (horizontal);

Tabela 29: Dados PETG – Horizontal

Peça PETG ESCURO - HORIZONTAL	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,84		
Medida 2	121,78	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,76	121,79	0,04
LARGURA (W)			
Medida 1	31,00		
Medida 2	31,58	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	31,40	31,33	0,24
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,32		
Medida 2	6,18	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,26	6,25	0,06
Peso em gramas	28,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,17		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,82 ± 0,10	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,62 ± 0,03	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,46 ± 0,08		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	533,925		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,016827		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1101,267		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,035894		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Y (chapado);

Tabela 30: Dados PETG – Chapado

Peça PETG ESCURO - CHAPADO		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,70		
Medida 2	121,74	Média	Desvio
Medida 3	121,68	121,71	0,03
LARGURA (W)			
Medida 1	30,60		
Medida 2	30,52	Média	Desvio
Medida 3	30,38	30,50	0,09
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,36		
Medida 2	6,34	Média	Desvio
Medida 3	6,46	6,39	0,06
Peso em gramas	28,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,18		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,57 ± 0,08	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,62 ± 0,03	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,27 ± 0,08		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	506,575		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,015086		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1143,217		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,020592		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

ÁCIDO POLILÁTICO (PLA)

3DLAB

- Peça na orientação Z (vertical);

Tabela 31: Dados PLA – Vertical

Peça PLA CLARO - VERTICAL		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	123,88		
Medida 2	123,98	Média	Desvio
Medida 3	124,44	124,10	0,24
LARGURA (W)			
Medida 1	30,22		
Medida 2	30,24	Média	Desvio
Medida 3	30,50	30,32	0,13
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,24		
Medida 2	6,50	Média	Desvio
Medida 3	6,54	6,43	0,13
Peso em gramas	28,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,16		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	3,10 ± 0,26	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	1,26 ± 0,06	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,23 ± 0,11		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	695,008		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,041170		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1631,550		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,050639		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação X (horizontal);

Tabela 32: Dados PLA – Horizontal

Peça PLA CLARO - HORIZONTAL		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,60		
Medida 2	121,58	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,90	121,69	0,15
LARGURA (W)			
Medida 1	31,38		
Medida 2	31,46	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	31,22	31,35	0,10
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,24		
Medida 2	6,26	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,22	6,24	0,03
Peso em gramas	28,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,18		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	3,42 ± 0,15	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	1,24 ± 0,05	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,38 ± 0,07		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	731,346		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,023412		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1551,548		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,059713		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Y (chapado);

Tabela 33: Dados PLA – Chapado

Peça PLA CLARO - CHAPADO		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,78		
Medida 2	121,76	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,62	121,72	0,07
LARGURA (W)			
Medida 1	30,54		
Medida 2	30,38	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,48	30,47	0,07
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,38		
Medida 2	6,32	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,50	6,40	0,08
Peso em gramas	27,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,14		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	2,89 ± 0,17	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	1,18 ± 0,05	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,22 ± 0,09		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	700,603		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,033629		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1612,784		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,019202		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Z (vertical);

Tabela 34: Dados PLA – Vertical

Peça PLA ESCURO - VERTICAL		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	124,10		
Medida 2	123,96	Média	Desvio
Medida 3	123,90	123,99	0,09
LARGURA (W)			
Medida 1	30,34		
Medida 2	30,38	Média	Desvio
Medida 3	30,30	30,34	0,04
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,68		
Medida 2	6,62	Média	Desvio
Medida 3	6,66	6,65	0,03
Peso em gramas	29,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,16		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	2,97 ± 0,13	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	1,22 ± 0,05	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,22 ± 0,07		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	705,296		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,028968		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1655,882		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,039322		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação X (horizontal);

Tabela 35: Dados PLA – Horizontal

Peça PLA ESCURO - HORIZONTAL		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,62		
Medida 2	121,68	Média	Desvio
Medida 3	122,00	121,77	0,17
LARGURA (W)			
Medida 1	31,00		
Medida 2	31,28	Média	Desvio
Medida 3	31,32	31,20	0,14
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,34		
Medida 2	6,36	Média	Desvio
Medida 3	6,40	6,37	0,03
Peso em gramas	29,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,20		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	3,35 ± 0,15	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	1,23 ± 0,05	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,36 ± 0,07		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	730,873		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,034821		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1564,412		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,054802		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Y (chapado);

Tabela 36: Dados PLA – Chapado

Peça PLA ESCURO - CHAPADO	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,70		
Medida 2	121,82	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,78	121,77	0,05
LARGURA (W)			
Medida 1	30,50		
Medida 2	30,38	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,36	30,41	0,06
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,26		
Medida 2	6,28	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,42	6,32	0,07
Peso em gramas	28,00		
densidade da peça (g/cm ³)	1,20		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	3,30 ± 0,19	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	1,27 ± 0,06	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,30 ± 0,08		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	721,268		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,038068		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1617,163		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,019094		

Tabela 36: Dados PLA – Chapado Fonte: Próprio Autor, 2017.

ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)

3DLAB

- Peça na orientação Z (vertical);

Tabela 37: Dados ABS – Vertical

Peça ABS CLARO - VERTICAL	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	123,98		
Medida 2	123,92	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	123,66	123,85	0,14
LARGURA (W)			
Medida 1	30,60		
Medida 2	30,66	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,62	30,63	0,03
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,38		
Medida 2	6,40	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,36	6,38	0,03
Peso em gramas	24,00		
densidade da peça (g/cm ³)	0,99		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,89 ± 0,10	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,73 ± 0,04	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,30 ± 0,08		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	584,979		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,032449		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1323,369		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,048096		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação X (horizontal);

Tabela 38: Dados ABS – Horizontal

Peça ABS CLARO - HORIZONTAL		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,58		
Medida 2	121,72	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	122,26	121,85	0,29
LARGURA (W)			
Medida 1	29,94		
Medida 2	31,36	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,44	30,58	0,59
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,60		
Medida 2	6,84	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	7,12	6,85	0,21
Peso em gramas	24,00		
densidade da peça (g/cm ³)	0,94		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,79 ± 0,22	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,62 ± 0,04	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,43 ± 0,16		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	646,155		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,013166		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1362,865		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,052499		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Y (chapado);

Tabela 39: Dados ABS – Chapado

Peça ABS CLARO - CHAPADO		Valores (mm)	
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,44		
Medida 2	121,56	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,54	121,51	0,06
LARGURA (W)			
Medida 1	30,70		
Medida 2	30,54	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,40	30,55	0,12
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,00		
Medida 2	6,44	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,80	6,41	0,33
Peso em gramas	23,00		
densidade da peça (g/cm ³)	0,97		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	1,97 ± 0,36	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,76 ± 0,06	Torsional	
Coeficiente de Poisson	0,30 ± 0,23		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	631,874		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,019859		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1406,518		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,063064		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

UP3D

- Peça na orientação X (horizontal);

Tabela 40: Dados ABS – Horizontal

Peça ABS ESCURO - HORIZONTAL	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	122,48		
Medida 2	122,10	Média	Desvio
Medida 3	121,18	121,92	0,55
LARGURA (W)			
Medida 1	30,64		
Medida 2	31,78	Média	Desvio
Medida 3	31,42	31,28	0,48
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,56		
Medida 2	7,00	Média	Desvio
Medida 3	7,26	6,94	0,29
Peso em gramas	25,00		
densidade da peça (g/cm ³)	0,94		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	2,18 ± 0,33	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,76 ± 0,05	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,43 ± 0,19		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	719,715		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,026588		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1485,877		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,048960		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

- Peça na orientação Y (chapado);

Tabela 41: Dados ABS – Chapado

Peça ABS ESCURO - CHAPADO	Valores (mm)		
COMPRIMENTO (L)			
Medida 1	121,64		
Medida 2	121,64	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	121,78	121,69	0,07
LARGURA (W)			
Medida 1	30,46		
Medida 2	30,70	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	30,84	30,67	0,16
ESPESSURA (T)			
Medida 1	6,62		
Medida 2	6,52	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Medida 3	6,26	6,47	0,15
Peso em gramas	23,00		
densidade da peça (g/cm ³)	0,95		
Módulo de elasticidade (E) - (GPa)	2,35 ± 0,23	Flexional	
Mód. de cisalhamento (G) - (GPa)	0,92 ± 0,05	Torsional	
Coefficiente de Poisson	0,28 ± 0,13		
Frequência do Pico Flexional (Hz)	697,538		
Amplitude da Freq. Flexional (Vpp)	0,017443		
Frequência do Pico Torcional (Hz)	1559,620		
Amplitude da Freq. Torcional (Vpp)	0,030169		

Fonte: Próprio Autor, 2017.

Apêndice B – Modelagem dos corpos de prova para os ensaios de excitação por impulso.

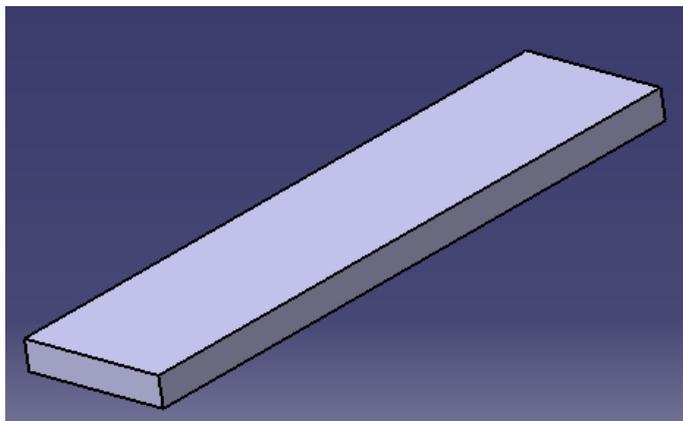


Figura 52: Geometria do Corpo de Prova (Fonte: Próprio autor).

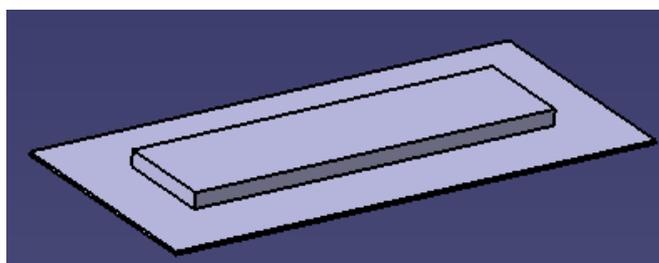


Figura 53: Modelo com apoio na orientação Y (chapado) (Fonte: Próprio autor).

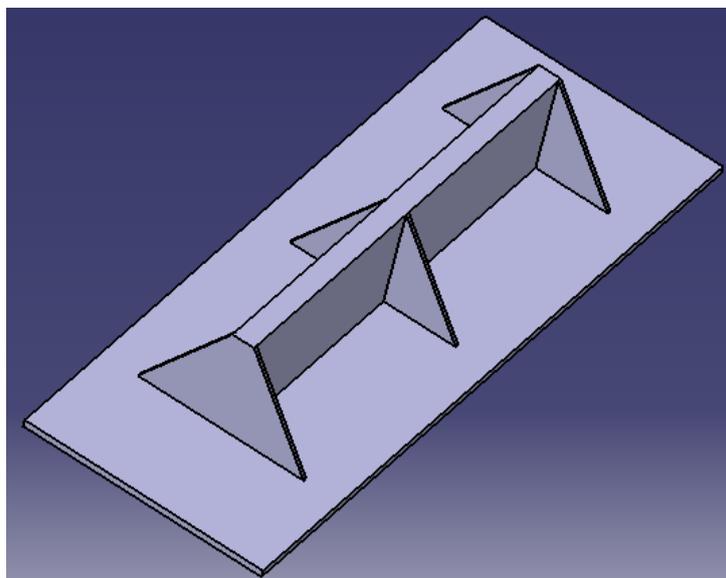


Figura 54: Modelo com apoio na orientação X (horizontal) (Fonte: Próprio autor).

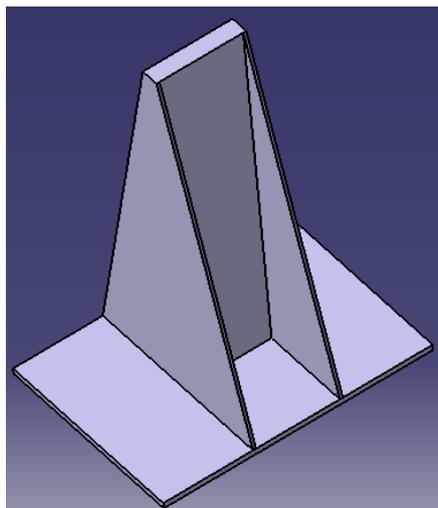


Figura 55: Modelo com apoio na orientação Z (vertical) (Fonte: Próprio autor).

Apêndice C – Imagens do processo de evolução da impressora 3D própria.

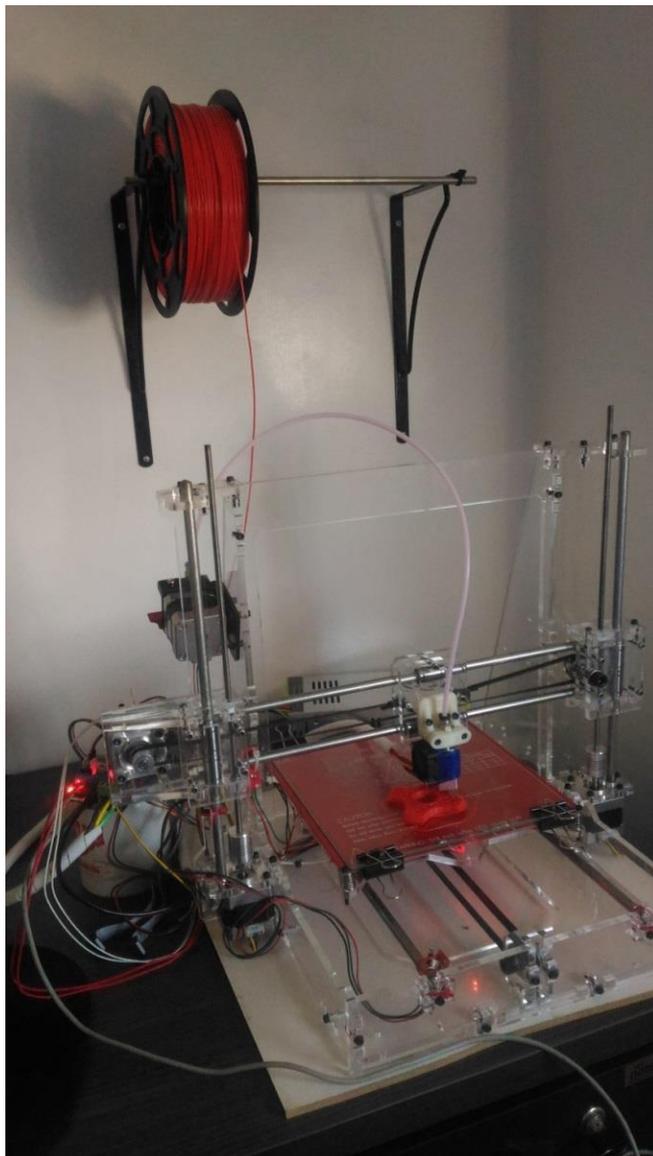


Figura 56: Primeira versão Graber em acrílico (Fonte: Próprio autor, 2017).

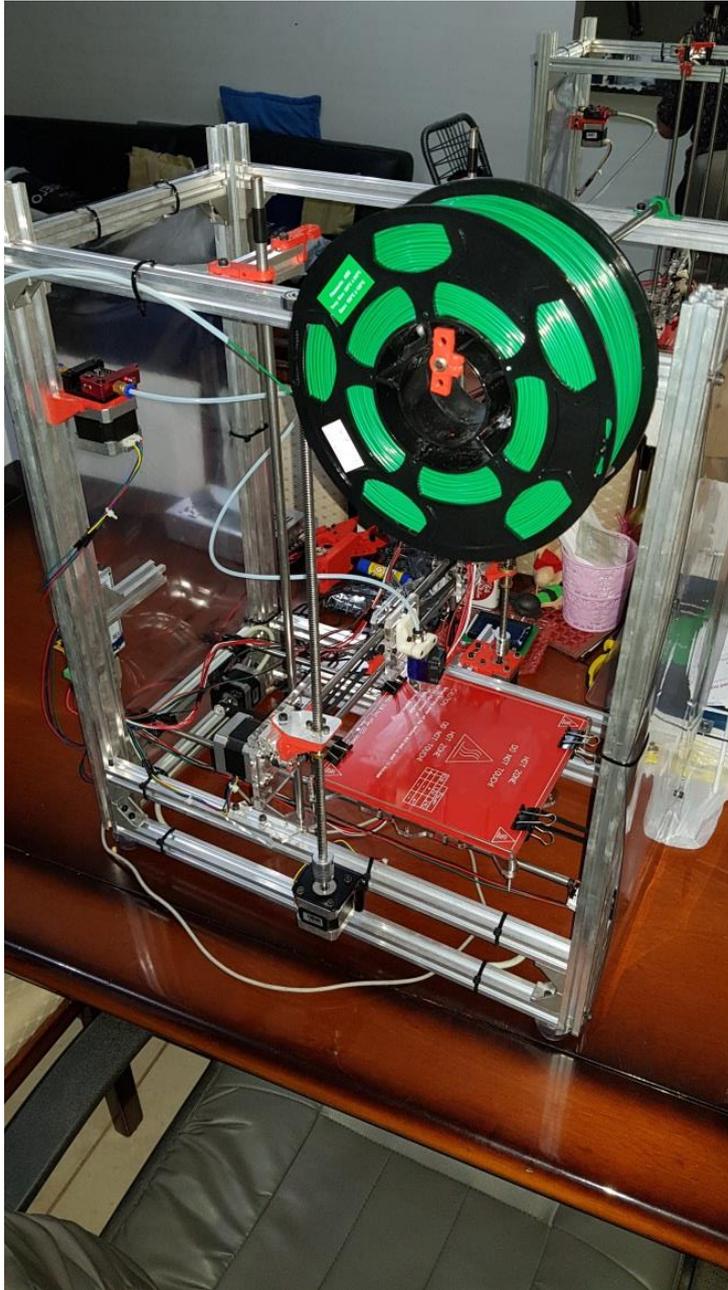


Figura 57: Versão no estilo Graber com alumínio perfilado (Fonte: Próprio autor, 2018).

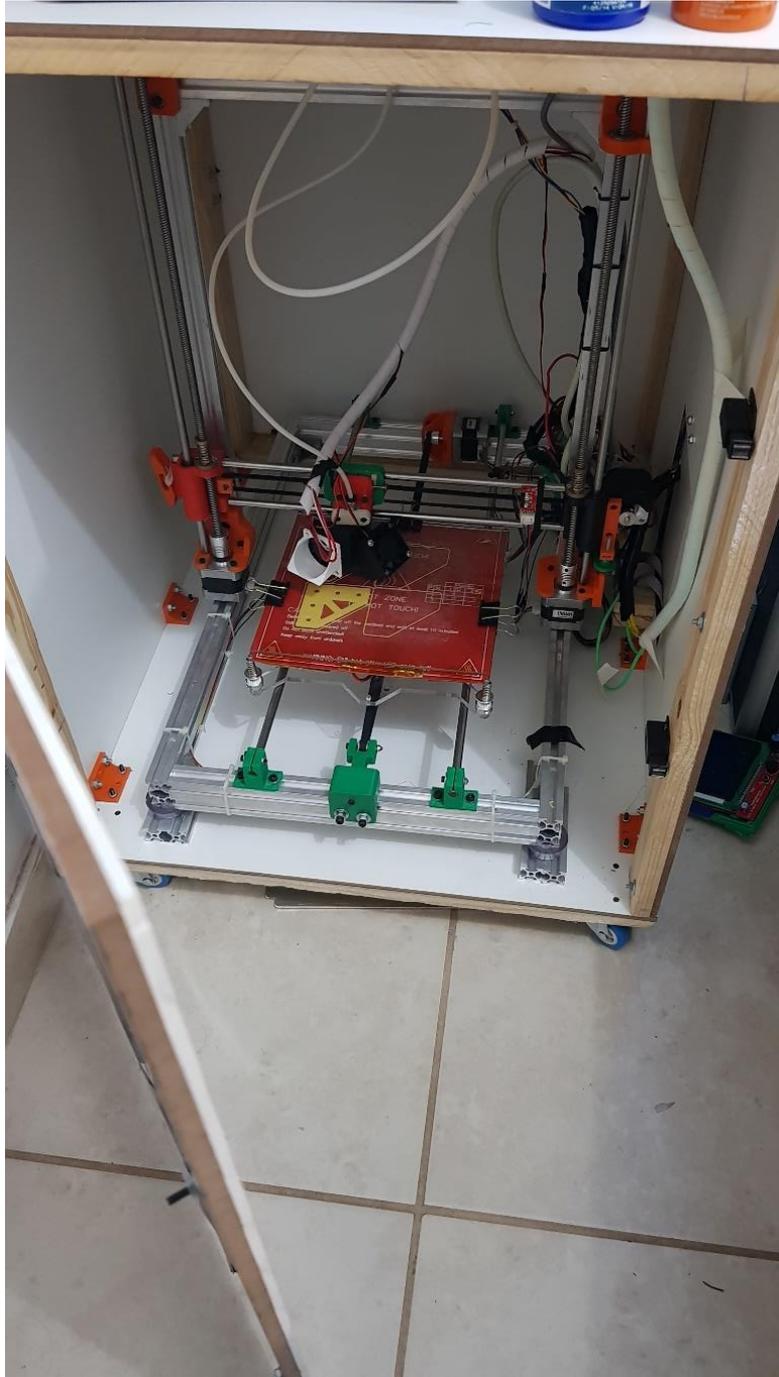


Figura 58: Versão atual com ambiente fechado (Fonte: Próprio autor, 2018).