

**RAINER FERNANDO MATHIAS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS  
PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM PLA  
ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

**RAINER FERNANDO MATHIAS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS  
PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM PLA  
ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO**

**Trabalho de conclusão de curso** apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: Projetos mecânicos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

UBERLÂNDIA-MG  
2019

**RAINER FERNANDO MATHIAS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS PRODUZIDAS POR  
MANUFATURA ADITIVA EM PLA ATRAVÉS DE ENSAIO DE  
TRAÇÃO**

Projeto de conclusão de curso **APROVADO**  
pelo Colegiado do Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Faculdade de  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal  
de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato - Orientador  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Márcio Peres de Souza  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Tobias Souza Moraes  
Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia, 11 de julho de 2019

Dedico este trabalho ao meu irmão Robson que nos faz tanta falta.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, principalmente à minha mãe Sandra e ao meu irmão Robson que nos deixou imensurável saudade.

Agradeço aos meus sobrinhos Icaro e Ivie por me proporcionar bons momentos e um sentido para seguir em frente. À minha madrinha Helenice, por tanto carinho e zelo durante tantos anos da minha vida e pelos bons momentos vividos.

Aos demais familiares que fizeram e fazem parte da minha vida e colaboram para que esta seja mais leve possível e que traga boas lembranças.

Um agradecimento, também, à minha namorada Juliana, que me auxilia, me conforta e compartilha parte importante da sua vida.

Não posso deixar de agradecer ao professor Alexandre por todo o esforço, dedicação e disponibilidade para que este trabalho fosse realizado, bem como a atenção e carisma de sempre.

Agradeço ao Laboratório de Projetos Mecânicos e ao Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU pela enorme disponibilidade em ajudar a realizar este trabalho, com destaque aos professores Cleudmar, Arthur e Núbia, ao técnico Diego e aos demais membros dos laboratórios que colaboraram tanto.

Agradeço também os demais colegas que estiveram comigo durante a graduação, professores e técnicos da UFU, e a todos que não foram aqui citados, mas que, de alguma forma, influenciaram na realização deste estudo e na trajetória da graduação do curso de Engenharia Mecânica.

MATHIAS, R. F. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM PLA ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO**. 2019. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo do caráter anisotrópico existente em amostras impressas pelo método *Fused Deposition Modelling* (FDM), a partir de filamentos de Políácido Láctico (PLA). O objetivo do estudo foi quantificar a resistência à tração das amostras e apontar qual delas seria mais recomendada para solicitações deste tipo. Para que houvesse uma concepção mais criteriosa, foi elaborada uma revisão dos métodos atuais de impressão, das aplicações, das vantagens que a tecnologia proporciona, das propriedades dos materiais, dos ensaios de tração e como são analisados, além de uma coletânea de estudos semelhantes. Em seguida, foram feitas análises das normas técnicas que se aplicavam a este tipo de material, e, então, selecionada a geometria da amostra, o número de corpos de prova e as orientações de impressão. Então, foram feitas 5 amostras impressas na horizontal (0°) e outras 5 na vertical (90°). Realizados os testes, notou-se larga vantagem das amostras horizontais sob o ponto de vista da resistência à tração. Comparou-se os resultados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos por outros estudos. Verificou-se que existem diferenças de até 20% com relação a estudos precedentes e que o material assume caráter anisotrópico por se assemelhar a um material compósito, superando, inclusive, os dados fornecidos pelo fabricante para um filamento submetido à testes de tração. Trabalhos futuros focarão em outras propriedades mecânicas de amostras impressas em 3D em relação a outros parâmetros de impressão e a outros materiais de filamentos.

---

*Palavras chave:* Impressão 3D, anisotropia, Políácido Láctico (PLA), *Fused Deposition Modelling* (FDM).

MATHIAS, R. M. **Experimental analysis of additive manufactured PLA samples through traction tests**. 2019. Graduation Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

## **ABSTRACT**

This research presents an evaluation of anisotropic behaviour on 3D printed samples by Fused Deposition Modelling (FDM), with Polylactic Acid (PLA) filaments. The goal of this study was to quantify the mechanical resistance of the samples and to point out which are the best printing conditions. A literature review about current 3D printing methods, their applications, their advantages, material properties, traction tests and how to perform them was developed. Parameters about technical standards for traction tests on polymers were studied: the sample geometry, the number of necessary samples and 3D printing conditions. Five samples were manufactured on horizontal orientation ( $0^\circ$ ) and five on the vertical orientation ( $90^\circ$ ) in relation to the printing bed. This work concludes that there is a large advantage of the samples printed on the horizontal way over the samples that were printed on the vertical orientation. The experimental results were compared with the previous on the literature. There is a difference up to 20% on the experimental results of this work in relation to previous works on the literature. Moreover, the anisotropic behaviour the printed samples is similar as composite materials. Some tensile limits obtained in the present work are greater than the manufacturer information for the used filaments. Future research will still focus on mechanical properties of 3D printed samples in relation to different printing parameters and to different filament materials.

---

*Keywords:* 3D Printing, anisotropic, Polylactic Acid (PLA), Fused Deposition Modelling (FDM).

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Propriedades de alguns tipos de plástico (Fonte: Stratasys).....	42
Tabela 2 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D638 - 02a).....	49
Tabela 3 - Parâmetros de impressão (Fonte: O próprio autor).....	52
Tabela 4 - Medidas da secção transversal da peça.....	55
Tabela 5 - Tempos de retirada do extensômetro.....	56
Tabela 6 - Resultados principais das amostras horizontais.....	58
Tabela 7 - Resultados principais das amostras verticais.....	60
Tabela 8 - Dados comparativos para a orientação 0°.....	64
Tabela 9 - Dados comparativos para a orientação de 90°.....	65



## Lista de figuras

Figura 1 - Impacto econômico (BRAGA, 2017) .....	16
Figura 2 - Mercado de manufatura (BRAGA, 2017) .....	17
Figura 3 - Esquema de um pantógrafo.....	19
Figura 4 - Pantógrafo moderno real .....	19
Figura 5 - Modelo utilizado por Willême .....	20
Figura 6 - Modelo de Blantner para perfis topográficos (adaptado de BRAGA, 2017).....	20
Figura 7 - Stereolithography (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014). .....	22
Figura 8 - Sinterização seletiva a laser (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).....	24
Figura 9 - Laser engineered net shaping (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014). .....	25
Figura 10 - Estrusão (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).....	26
Figura 11 - Inkjet printing (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).....	27
Figura 12 - Jateamento múltiplo (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014). .....	27
Figura 13 - Laminação (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).....	28
Figura 14 - Estratégias de preenchimento internos das camadas (Adaptado de Martins, 2018) .....	33
Figura 15 - Regra dos 45° para a geração de suporte (Adaptado do manual de instruções da Cliever CL2 Pro) .....	34
Figura 16 - Orientações de impressão (Adaptado de Dizon et. al., 2018) .....	34
Figura 17 - Área sob a fase elástica (adaptado do CALLISTER, 2000).....	36
Figura 18 – Correlação entre dureza e limite de resistência à tração (adaptado do CALLISTER, 2000). .....	37
Figura 19 - Classificação de ligas metálicas (adaptado do CALLISTER, 2000).....	39
Figura 20 - Um exemplo de corpo de prova (adaptado do CALLISTER, 2000) .....	42
Figura 21 - Tipo de máquina para ensaios de tração (adaptado do CALLISTER, 2000). ....	43
Figura 22 – Estiramento no teste de tração (adaptado do CALLISTER, 2000).....	43
Figura 23 - Exemplo de curva tensão-deformação (adaptado do CALLISTER, 2000).....	44
Figura 24 - Limite elástico (adaptado do CALLISTER, 2000). .....	45
Figura 25 - Amostra do Tipo IV segundo a ASTM D638-02a .....	48
Figura 26 - Impressora utilizada no trabalho (Fonte: O próprio autor) .....	50
Figura 27 - Simulação da impressão.....	51
Figura 28 - Construção das camadas da amostra (Fonte: O próprio autor).....	52
Figura 29 - Exemplares de corpo de prova impresso (Fonte: O próprio autor) .....	53
Figura 30 - Máquina utilizada no ensaio de tração (Fonte: O próprio autor) .....	54

Figura 31 - Extensômetro (Fonte: O próprio autor) .....	54
Figura 32 - Exemplar de peça acabada (Fonte: O próprio autor) .....	55
Figura 33 - Peças horizontais prontas (Fonte: O próprio autor).....	57
Figura 34 - Peças verticais finalizadas (Fonte: O próprio autor).....	58
Figura 35 - Gráfico tensão x deformação das amostras impressas a 0° .....	59
Figura 36 - Gráfico tensão x deformação das amostras impressas a 90°.....	60
Figura 37 - Influência do tempo de retirada do extensômetro na mudança de inclinações das curvas tensão x deformação das peças verticais .....	62
Figura 38 - Influência do tempo de retirada do extensômetro no limite de resistência à tração das peças verticais .....	62
Figura 39 - Influência do tempo de retirada do extensômetro na mudança de inclinações das curvas tensão x deformação das peças horizontais.....	63
Figura 40 - Influência do tempo de retirada do extensômetro no limite de resistência à tração das peças horizontais .....	63

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos .....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Definição .....	18
2.2 Breve histórico.....	19
2.3 Tipos de impressora.....	21
2.3.1 Laser.....	22
2.3.1.1 <i>Stereolithography</i> (SLA).....	22
2.3.1.2 <i>Solid ground curing</i> (SGC) .....	22
2.3.1.3 <i>Liquid thermal polymerization</i> (LTP).....	23
2.3.1.4 <i>Beam interference solidification</i> (BIS) .....	23
2.3.1.5 <i>Holographic interference solidification</i> (HIS).....	23
2.3.1.6 <i>Selective laser sintering</i> (SLS) .....	23
2.3.1.7 <i>Selective laser melting</i> (SLM).....	24
2.3.1.8 <i>Laser engineered net shaping</i> (LENS) .....	24
2.3.2 Extrusão .....	25
2.3.2.1 <i>Fused deposition modelling</i> (FDM).....	25
2.3.2.2 <i>Robocasting</i> .....	26
2.3.3 Jateamento .....	26
2.3.3.1 <i>Inkjet printing</i> (IJP) .....	26
2.3.3.2 <i>Multijet modelling</i> (MJM) .....	27
2.3.3.3 <i>Thermojet</i> .....	28
2.3.4 Adesivos .....	28
2.3.4.1 <i>Laminated object manufacturing</i> (LOM) .....	28
2.3.4.2 <i>Solid foil polymerization</i> (SFP) .....	29
2.3.5 Feixe de elétrons .....	29
2.3.5.1 <i>Electron beam manufacturing</i> (EBM) .....	29
2.4 Aplicações mais comuns .....	29
2.4.1 Roupas .....	29

2.4.2 Casas .....	30
2.4.3 Carros .....	30
2.4.4 Comida .....	30
2.4.5 Tecidos do corpo humano.....	30
2.5 Vantagens e desvantagens .....	31
2.5.1 Vantagens.....	31
2.5.2 Desvantagens.....	32
2.6 Métodos construtivos das peças .....	33
2.7 Propriedades dos materiais .....	35
2.7.1 Deformações elástica e plástica.....	35
2.7.2 Ductilidade e fragilidade.....	35
2.7.3 Resiliência .....	36
2.7.4 Dureza .....	36
2.7.5 Anelasticidade .....	37
2.7.6 Tenacidade .....	38
2.7.7 Isotropia.....	38
2.8 Tipos de materiais e particularidades .....	39
2.8.1 Metais .....	39
2.8.2 Polímeros.....	40
2.9 Ensaio de resistência à tração.....	42
2.9.1 Curva tensão de engenharia - deformação .....	44
2.9.2 Módulo de elasticidade .....	45
2.9.3 Limite elástico-plástico.....	45
2.9.4 Limite de resistência à tração.....	46
2.10 Ensaio de tração em amostras fabricadas por manufatura aditiva .....	46
3 METODOLOGIA .....	48
3.1 - Descrição da amostra .....	48
3.2 – Número de amostras .....	49
3.3 – Descrição da impressora utilizada .....	50
3.4 – Projeto e fabricação dos corpos de prova.....	51
3.5 – Bancada de testes.....	53
3.6 Realização dos testes .....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	57
4.1 Condições da amostra impressa .....	57

4.2 O teste de tração.....	58
4.3 Síntese dos resultados .....	64
5 CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A tecnologia de manufatura aditiva, ou popularmente denominada de impressão tridimensional, é uma das pautas mais recorrentes entre o meio científico e industrial. Muito se espera desta modalidade de fabricação que surgiu por volta de 1980 com a modificação de uma impressora jato de tinta convencional, feita por dois estudantes de pós graduação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Charles W. Hull (Chuck Hull) é identificado como o pioneiro da impressão 3D. São incontáveis as possibilidades e aplicações que esta ferramenta pode ter. Nos mais diversos setores da indústria, como o automobilístico, o alimentício, o têxtil, o petrolífero e o farmacêutico, também o setor da saúde, como os hospitais e clínicas, até os setores das artes, têm presente o desenvolvimento de novas ideias e conceitos. O baixo custo e o pouco uso de mão de obra são grandes atrativos das pequenas produções que as impressoras podem fazer. Segundo o *The Economist* (2012) o custo trabalhista crescente da mão de obra chinesa, tem acabado com o grande atrativo do mercado chinês, que, quando somado à instabilidade de preço do petróleo leva a crer em uma tendência de que, agora, a produção seja feita não mais em locais centralizados, mas próximo ao consumidor. O auge do Just-in-time até então pode ser atingido e as empresas começam a se adaptar aos novos requisitos (FERNANDES, 2014).

### 1.1 Justificativa

Os estudos, a respeito da fabricação por prototipagem rápida, estão sendo desenvolvidos de forma a produzir evoluções nas produções fabris. Algumas pesquisas seguem produzindo avanços no que se diz respeito, por exemplo, ao design e à relação com o meio ambiente. A longo prazo, acredita-se que a impressão 3D possibilite que empresas

de pequeno porte e com pouco capital destinado à inovação tenham seus próprios produtos complexos destinados ao mercado.

Com esta consequência, trabalhos recentes mostram que a tendência é que novos modelos de logística e cadeia produtiva sejam formulados. Desta forma, não mais as produções sejam centralizadas e massificadas, mas sim que elas se aproximem cada vez mais do consumidor final. Outro aspecto relevante é que um grande volume da produção pode ser feito sob encomenda e, assim, esta nova dinâmica permite que as empresas, necessitem de menor capital de giro para o negócio e que se iniciem modelos de negócio com pouco custo inicial de produção (FERNANDES et al., 2014).

Em assim sendo, quando nos referimos a impressão 3D, tratamos de uma tecnologia disruptiva que é considerada emergente no mercado mundial. A nível industrial espera-se que, gradativamente, as peças que são produzidas por caríssimos processos de usinagem sejam produzidas por manufatura aditiva. Essa evolução não só afetaria fornecedores de materiais, como também prestadores de serviço e cadeias produtivas ligadas a usinagem. Contudo, há empecilhos que ainda comprometem o processo de substituição dos meios de produção, como por exemplo o acabamento e a velocidade com que se produz, além de outros fatores que serão discutidos posteriormente neste trabalho.

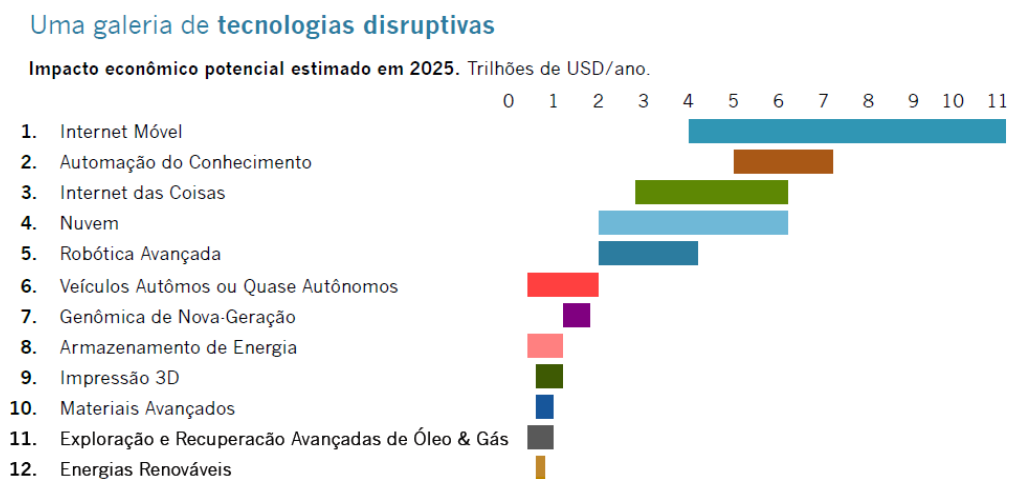
Como impacto ambiental, aponta-se que esta mudança da produção para perto do consumidor e, por vezes, no local do consumo (*in-loco*) deixaria de gastar muito combustível para o transporte de peças e ferramentas, o que certamente reduziria emissões de poluentes (KIETZMANN; PITT; BERTHON, 2015).

Além disso, estas máquinas utilizam somente o que é realmente necessário para a produção das peças, o que reduz drasticamente o volume de matéria prima. Esta redução no desperdício é parecida com uma das propostas iniciais do computador, ou seja, reduzir a quantidade de papel que é utilizado. O aspecto da reciclagem dos filamentos, matéria prima do modelo, é outro tema importante a ser citado. A ReDeTec® por exemplo, é uma empresa que produz trituradores de plástico capazes de produzir novos filamentos para serem reutilizados em novas criações (BAKER, 2018).

Do ponto de vista das mudanças sociais impulsionadas pelo modelo, indicam que uma melhoria na qualidade de vida da população rural poderá ser identificada na consolidação desse sistema. Com um alto grau de automação e um compartilhamento de dados eficiente, esta parcela da sociedade poderá suprir suas necessidades com maior rapidez e precisão, a um custo menor. Porém, de outro lado, em países desenvolvidos com um evidente envelhecimento da população, o elevado grau de conhecimento e uma exigência maior por qualificação profissional, em um primeiro instante, poderia causar desemprego e instabilidade social (GEBLER; UITERKAMP; VISSER, 2014).

Mas espera-se que as próximas gerações já cresçam vivenciando e desenvolvendo experiências com impressoras 3D nas escolas, de modo a se tornar corriqueiro, entre outras palavras, facilmente visto no dia a dia. Economicamente falando, a tendência é que a tecnologia gere um gigantesco negócio e mova, já em 2019, algo em torno de U\$ 6 bilhões. A medida com que os preços caíam, principalmente no que tange ao hardware, espera-se que este mercado comece a render em alto nível (KIETZMANN; PITT; BERTHON, 2015).

Em 2013, o *McKinsey Global Institute* classificou (Figura 1) a impressão 3D como uma das mais “disruptivas” tecnologias do mercado mundial até 2025. De acordo com o instituto, o esperado para o ano de 2025 é que se movimentem um montante de dinheiro na casa dos 200 até 600 bilhões de dólares.



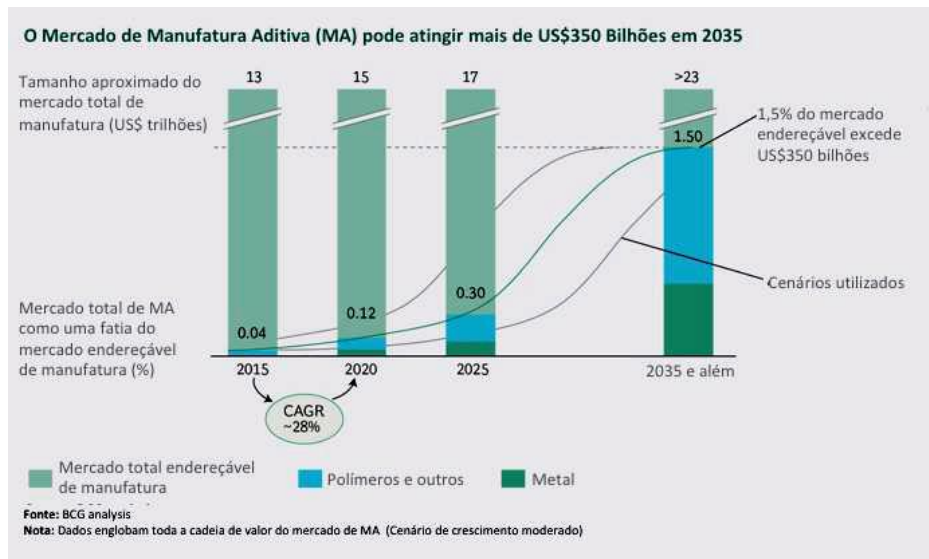
**Figura 1 - Impacto econômico (BRAGA, 2017)**

Uma outra pesquisa (Figura 2) conduzida pelo BCG (*Boston Consulting Group*) indica que, no ano de 2015 já eram movimentados 5 bilhões anuais e que, a estimativa é que, certamente, o mercado de manufatura aditiva circularia em torno dos 350 bilhões de dólares em 2035, uma estimativa um pouco mais conservadora do que o primeiro estudo.

Diante deste cenário, o assunto começa a ganhar destaque e algumas questões relacionadas à impressão 3D são recorrentes em discussões, tal como a necessidade de uma fiscalização e inspeção de qualidade das impressões feitas. Pois se para imprimir, apenas é necessário que se saiba desenhar, diversos produtos podem ser criados sem nenhum tipo de qualidade e segurança (BRAGA, 2017).

Com relação à segurança, destaca-se a produção de armas, tanto brancas quanto as de fogo, mas isso é algo a ser discutido nos contextos éticos e legais as quais este trabalho não abrange.





**Figura 2 - Mercado de manufatura (BRAGA, 2017)**

Por outro lado, diante da qualidade dos produtos, no Brasil, temos hoje o INMETRO que fiscaliza uma grande variedade de produtos fabricados e atesta a possibilidade de eles serem usados pela população com segurança e confiabilidade. É justo e necessário, portanto, que se conheçam os limites da manufatura aditiva, bem como meios de elevar a confiabilidade das peças. Para isso, caracterizar as peças mecanicamente, elaborar manuais de procedimentos de execução e normas técnicas, talvez façam parte do roteiro para a implementação completa desta nova tecnologia.

## 1.2 Objetivos

Partindo do pressuposto que a produção enxuta começa a se tornar realidade e que as impressoras extrusoras de plástico se tornam realidade na produção de peças, as propriedades e limitações deste sistema precisam ser bem conhecidas a fim de minimizar riscos e promover maior confiabilidade aos produtos obtidos por deposição de material fluido.

Sendo assim, o objetivo do trabalho é identificar comportamentos anisotrópicos nos corpos de prova produzidos por FDM (Fused Deposition Modeling ou Deposição de Material Fundido) e, dentre os ângulos de impressão utilizados identificar aquele com a maior resistência mecânica.

## Capítulo II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Importantes conceitos precisaram ser desenvolvidos para que se quantificasse a resistência dos materiais. O mesmo se diz das impressoras, que avançam em tecnologia com grande rapidez. As várias técnicas de impressão, os produtos dessa impressão, as vantagens e desvantagens de cada técnica serão abordadas neste capítulo sob o aspecto da impressão. Também serão abordados os parâmetros necessários para a caracterização mecânica e os modos de se medir ou calcular cada um deles.

#### 2.1 Definição

As impressoras 3D são máquinas desenvolvidas para dar origem a uma gama muito grande de peças. Dos nano componentes aos maquinários industriais, dos enfeites e utensílios aos carros e casas. Todo o processo é feito em algumas horas, ou até mesmo dias, dependendo da complexidade da peça e do processo utilizado. Algumas gravuras e pinturas mais modernas se intitulam tridimensionais por dar sensação de profundidade. Porém, “imprimir”, neste caso é realmente dar origem a um objeto com dimensões reais de largura, altura e profundidade.

A tecnologia, embora tenha ganhado destaque nos últimos anos, conforme já foi dito, é antiga e já conhecida pela indústria. A ideia, entretanto, se faz inovadora, pois antes era utilizada como prototipagem rápida, apenas uma visualização do que se pretende fazer, e, agora, trata-se de um produto acessível ao consumidor final. Já existem empresas que disponibilizam brindes e regalos ou então produções personalizadas e sob medida.

Nos últimos anos tem havido uma verdadeira evolução no aspecto tecnológico das impressoras. Tanto o barateamento do hardware, como o desenvolvimento de modelos mais

simples de softwares e de código aberto, permitiram que, aquilo que chegava a custar 30 mil dólares, hoje gira em torno de 300 dólares as mais baratas, de 500 a 2000 dólares uma intermediária, e as maiores e mais precisas atingem os 3000 dólares (KIETZMANN; PITT; BERTHON, 2015).

## 2.2 Breve histórico

Desde o final do século dezenove, a impressão 3D vem sendo desenvolvida. Isto, claro que como uma maneira de se pensar, pois a robótica e a informática não existiam, mas, em alguns dos casos, o princípio era o mesmo. Pesquisas apontam que em 1860, François Willème desenvolveu a fotoescultura. Este modelo (Figura 5) de impressão consistia em fotografar objetos com 24 câmeras espaçadas de 15 graus, e, com o auxílio de um pantógrafo (Figura 3), reproduzir as silhuetas geradas por cada uma das câmeras em um bloco de determinado material, de modo a usinar (Figura 4) este bloco e esculpir o objeto. Esta ferramenta ainda é muito utilizada atualmente (BRAGA, 2017).

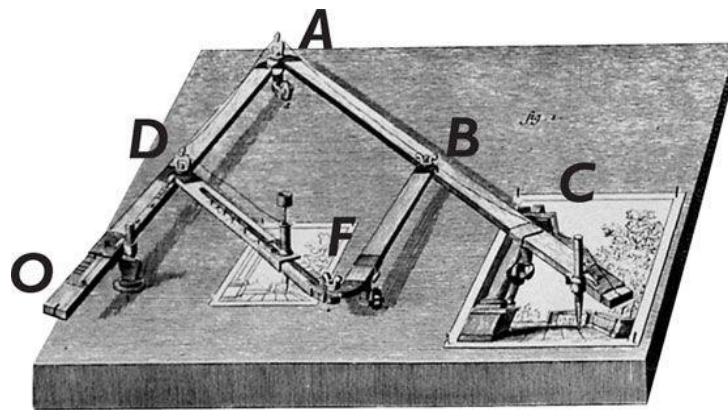


Figura 3 - Esquema de um pantógrafo



Figura 4 - Pantógrafo moderno real

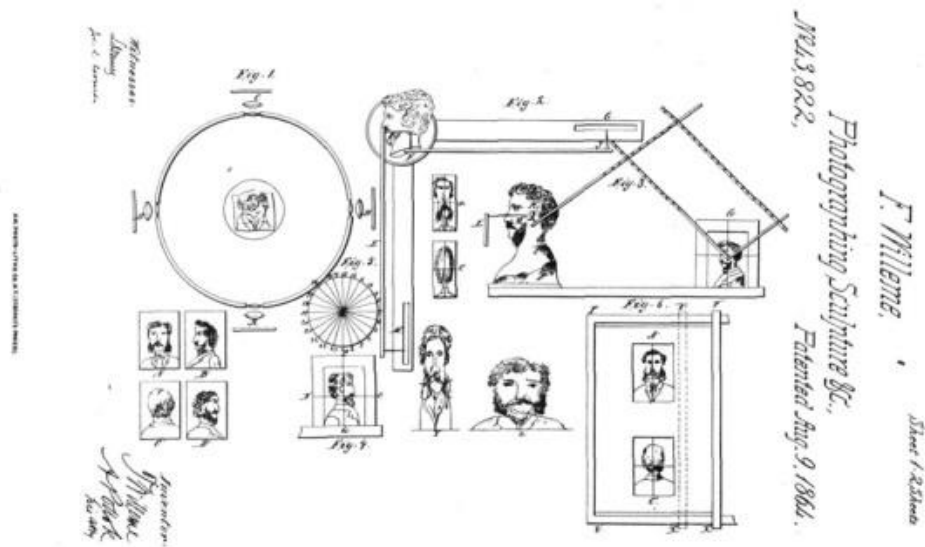


Figura 5 - Modelo utilizado por Willème

Posteriormente, a tecnologia (Figura 6) foi empregada na elaboração de perfis topográficos de propriedades (Blanther, 1892).

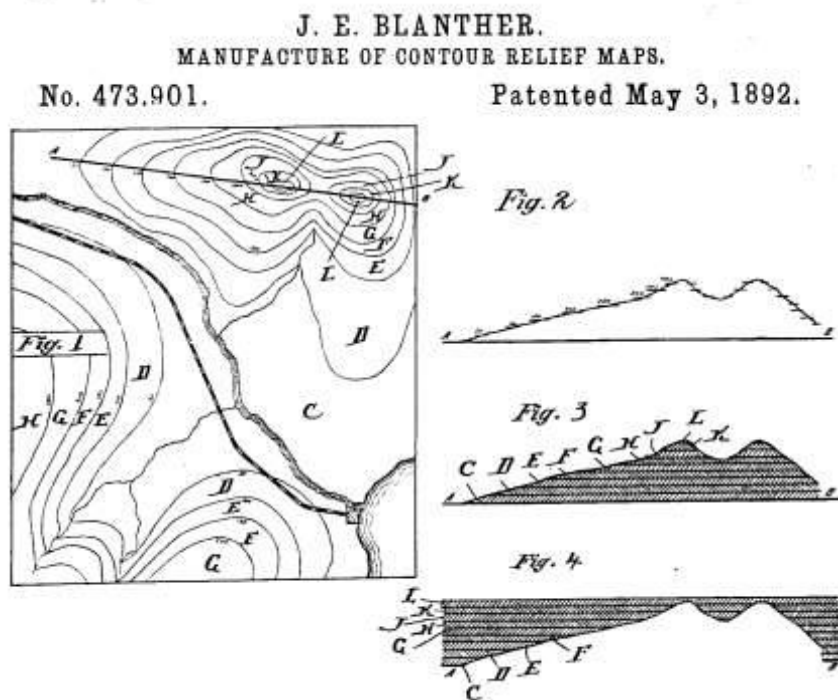


Figura 6 - Modelo de Blanther para perfis topográficos (adaptado de BRAGA, 2017)

Desenvolvimentos subsequentes nos trouxeram a 1972, onde K. Matsubara desenvolveu o que seria a fotopolimerização, que consiste na iluminação de locais específicos de uma camada composta por um polímero sensível à luz ultravioleta, que ganha resistência mecânica e o processo se repete para uma camada logo acima da antecessora. Em 1986, a primeira patente atribuída à prototipagem rápida foi concedida. Charles Hull deu origem à Estereolitografia (SLA), sendo também o pioneiro na interpretação de um sistema de prototipagem rápida com um arquivo CAD (*Computer Aided Design*), e, além disso, ainda foi um dos fundadores da 3D System Corporation que até hoje ainda figura entre as principais empresas no ramo de impressão 3D, com um grande valor de mercado (BRAGA, 2017).

Embora Hull tenha sido o pioneiro no depósito de patentes nesta área, um professor e seu aluno na Universidade do Texas deram origem à Sinterização Seletiva à Laser, ou *Selective Laser Sintering (SLS)*, em 1984. Trata-se da aplicação de um laser orientado a uma fina camada de pó (por vezes Nylon) de modo a fundir o material de maneira controlada. E então o processo se repete para novas camadas (BRAGA, 2017).

A tecnologia em torno do qual gira este trabalho, ou seja, a Deposição de Material Fundido, ou *Fused Deposition Modeling (FDM)*, foi criada por Scott e Lisa Crump em 1989. A FDM tem como princípio a fusão de um polímero do tipo termoplástico sob a forma inicial de fibra e a deposição controlada em camadas sucessivas (BRAGA, 2017).

Estes processos eram amplamente utilizados para a elaboração de protótipos, pois se tratavam de métodos restritos aos polímeros, nem sempre tão úteis na indústria. Com o passar do tempo, a tecnologia evoluiu e meios para imprimir em outros materiais já existem. Materiais dos mais diversos seja ele o titânio ou até tecidos do corpo humano. Uma revolução da indústria começava a tomar forma. Os diferentes princípios de impressão podem ser encontrados a seguir (BRAGA, 2017).

### **2.3 Tipos de impressora**

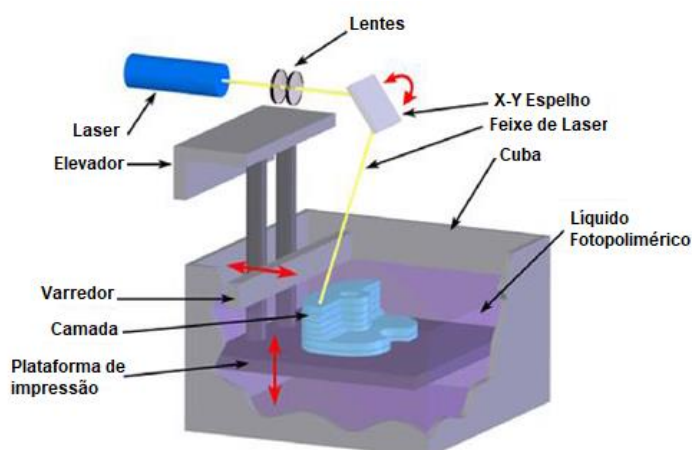
Dentre os vários tipos de impressoras que existem, podemos destacar os métodos utilizados por elas. Que, por sua vez, dividem-se entre: Laser, extrusão, jateamento, adesivo e feixe de elétrons. Dentro de cada categoria existem pelo menos dois processos diferentes, mas que obedecem ao mesmo princípio (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

### 2.3.1 Laser

Os processos baseados na utilização de laser para a fundição, solidificação ou cura do material, e normalmente são utilizados em aplicações onde não se há solicitações estruturais, ou simplesmente baixos níveis de tensão (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.1.1 Stereolithography (SLA)

Conforme citado anteriormente, a estereolitografia (Figura 7) foi o processo pioneiro em patentes e seu princípio de funcionamento é a fotopolimerização, onde a exposição da camada de resina polimérica é exposta a uma luz ultravioleta suave, ou então a um laser (nas máquinas modernas), em locais específicos, e ganha resistência mecânica. Normalmente há um recipiente repleto desta resina e a plataforma vai submergindo à medida que as camadas vão sendo constituídas (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).



**Figura 7 - Stereolithography (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).**

#### 2.3.1.2 Solid ground curing (SGC)

O processo em questão também funciona pela fotopolimerização, assim como o anterior, uma luz ultravioleta, agora, de alta intensidade, atinge o polímero que ganha consistência. Outra particularidade do processo é que, ao contrário do anterior, este processo utiliza uma máscara para selecionar os lugares específicos de cura, o que deixa o processo mais preciso e com uma taxa maior de produção, muito embora o processo seja mais caro devido à complexidade do sistema (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.1.3 *Liquid thermal polymerization (LTP)*

Este método de produção apresenta características parecidas com a estereolitografia, pois também atinge uma resina que se solidifica camada após camada. Contudo, existem diferenças. Uma diferença básica é que, não mais um polímero fotossensível é utilizado, mas sim um polímero com sensibilidade ao calor. De maneira que, pela transferência de calor que afeta a área próxima ao ponto atingido pelo laser, o processo fica menos preciso, e, por isso, torna-se indicado para solicitações de menor precisão dimensional (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.1.4 *Beam interference solidification (BIS)*

A solidificação do polímero líquido é feita por dois lasers que interceptam um ao outro no ponto que se pretende solidificar. Ambos os lasers têm comprimentos de onda diferentes de operação, sendo que, o primeiro apenas excita o polímero até um ponto onde ele é metaestável e o segundo o polimeriza por radiação. Várias dificuldades são encontradas nesse processo, que vão desde dificuldade de obter uma precisa intersecção dos dois lasers, até o fato de que, dependendo da velocidade da produção, a absorção da radiação, por parte do polímero, não seja suficiente (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

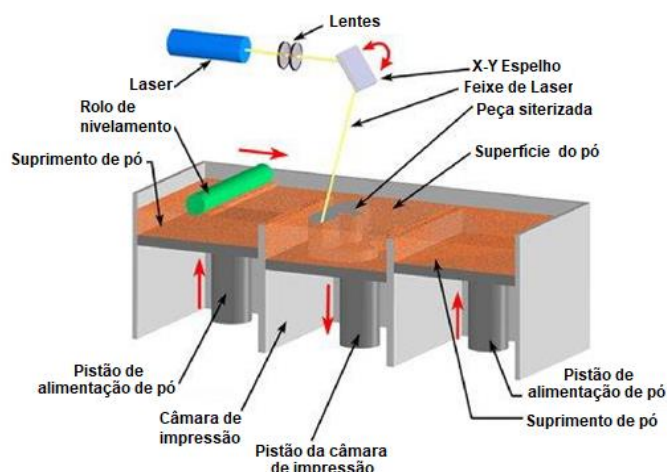
#### 2.3.1.5 *Holographic interference solidification (HIS)*

Muito parecido com a Cura Sólida na Base. O processo projeta, não mais um ponto na superfície do líquido fotossensível, mas sim uma imagem holográfica, e, assim, toda a superfície é solidificada (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.1.6 *Selective laser sintering (SLS)*

Contando com uma matéria prima sob a forma de pó, um feixe de laser (Figura 8) sinteriza o material da matéria prima. Para minimizar os efeitos de transferência de calor, a superfície da plataforma é aquecida, e, portanto, a camada subsequente não transfere tanto calor, aprimorando a precisão do processo, além de facilitar a fusão do material (menor energia gasta). A plataforma então é abaixada, um rolo aplica, sobre a mesa, uma nova camada de pó, que dará, por sua vez, início a um novo procedimento. A novidade do processo é que uma gama maior pode ser utilizada, desde metais e cerâmicas até polímeros. Algumas das desvantagens do processo são a baixa velocidade do processo e a possibilidade do aparecimento de trincas devido à dificuldade de troca térmica, ou em

alguns casos distorção da peça pela distribuição desigual do calor (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).



**Figura 8 - Sinterização seletiva a laser (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).**

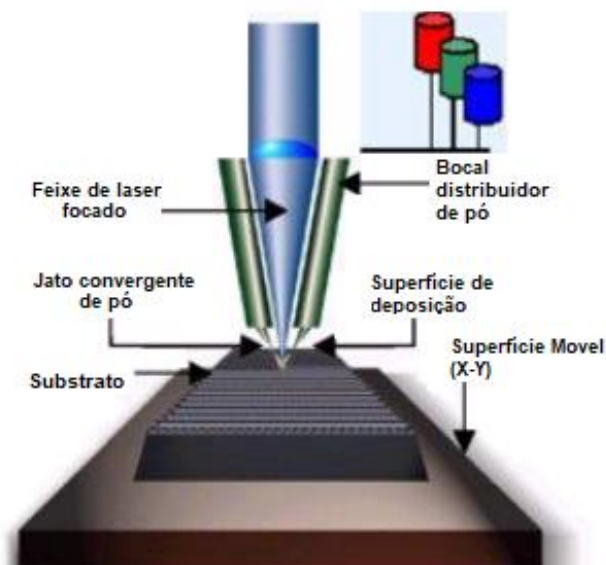
#### 2.3.1.7 *Selective laser melting* (SLM)

O processo é bem similar ao anterior, com a diferença que o laser não sinteriza o pó, mas funde os grãos, propriamente dito. Vale destacar a diferença entre sinterização e fusão, em que o primeiro promove a união entre partículas de contato mútuo com o efeito da temperatura e o segundo promove a mudança de fase do material para o estado líquido e retorna ao estado sólido posteriormente (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015). Na fundição, a potência do laser é maior.

#### 2.3.1.8 *Laser engineered net shaping* (LENS)

Um feixe de laser (Figura 9) direcionado para o contorno da peça a ser produzida é interceptado por um jato de pó, os grãos que entram em contato com o laser se solidificam instantaneamente, e os que não entram em contato, caem. A peça vai sendo formada camada por camada. O grande atrativo deste tipo de impressora é a possibilidade de trabalhar com metais muito duros. Em contrapartida, a precisão do processo não é muito grande, bem como sua qualidade superficial, uma vez que o controle do processo é de difícil execução. Outros processos produzem peças utilizando processos muito parecidos, com pequenas variações e recebem diferentes nomes, como a Deposição Direta de Metal ou a Deposição de Pó com Laser, ou até o Revestimento Seletivo por Laser. Estes métodos podem fazer uso de uma máquina CNC de diferentes graus de liberdade e podem inclusive realizar reparos em peças já prontas (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).





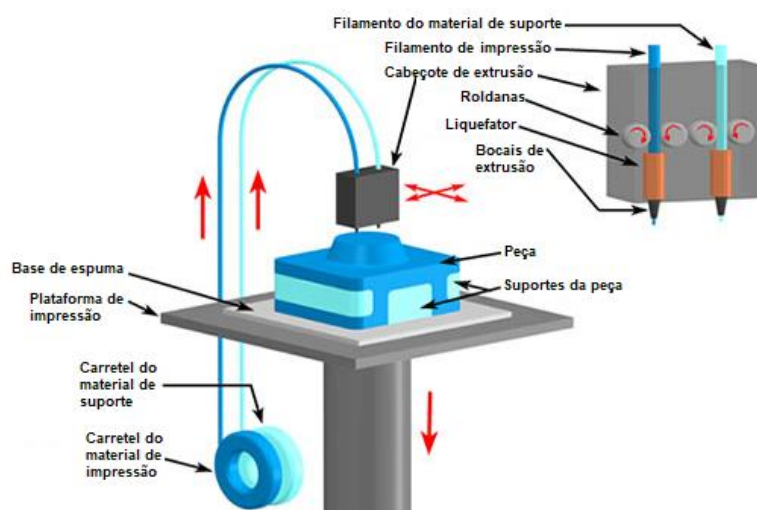
**Figura 9 - Laser engineered net shaping (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).**

### 2.3.2 Extrusão

Estes métodos de impressão consistem em aquecer um filamento de material através de um bico até que se atinja a fusão do material. Camada a camada, é feita a deposição até que a peça seja formada (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.2.1 *Fused deposition modelling* (FDM)

O método mais importante para o nosso trabalho é destacado aqui, trata-se do *Fused Deposition Modeling* (FDM) como é comumente visto na literatura. O método (Figura 10) representa um dos menores custos de produção do ramo da impressão 3D, sendo a sua simplicidade de construção e a matéria prima (usualmente polímeros termoplásticos) barata. Aquece-se o material a ser depositado a uma temperatura de, pelo menos, 1°C acima da temperatura de fusão, e imediatamente após a deposição, a transferência de calor garante a solidificação do material no substrato. A variedade de polímeros utilizados no método não apresenta toxicidade e ainda dispõe de diferentes cores, sendo amplamente utilizada para a produção de protótipos e brindes, ou seja, é presente em diversos ambientes. As desvantagens ficam por conta da limitação dimensional e de qualidade superficial, quando se comparam com os métodos de impressão com material polimérico sob a forma de pó (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).



**Figura 10 - Estrusão (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).**

### 2.3.2.2 Robocasting

Este outro tipo de processo com o princípio da extrusão trata de transformar alguns tipos de pastas coloidais (tal como um tubo de creme dental) em uma peça sólida. Este método pode ser útil para produções cerâmicas e de compósitos que exigem grande rapidez, pois o tempo de secagem é curto (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

### 2.3.3 Jateamento

Os processos de jateamento são muito semelhantes com os processos que fazem uso de laser para promover a ligação das partículas de pó, com a exceção que nenhuma mudança de fase é promovida nesta atividade. Os jateamentos utilizam bicos de jateamento de elementos adesivos para unir, de maneira bem controlada, as partículas de sólido (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.3.1 Inkjet printing (IJP)

No método IJP (Figura 11), temos um recipiente dividido em duas partes, uma contendo um pistão que alimenta o sistema com pó, e outra parte onde o elemento adesivo é depositado na camada de pó. A cada vez que uma camada é feita pela deposição de elemento de ligação, um rolo leva o pó existente na parte do pistão para a parte onde é feita a peça (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

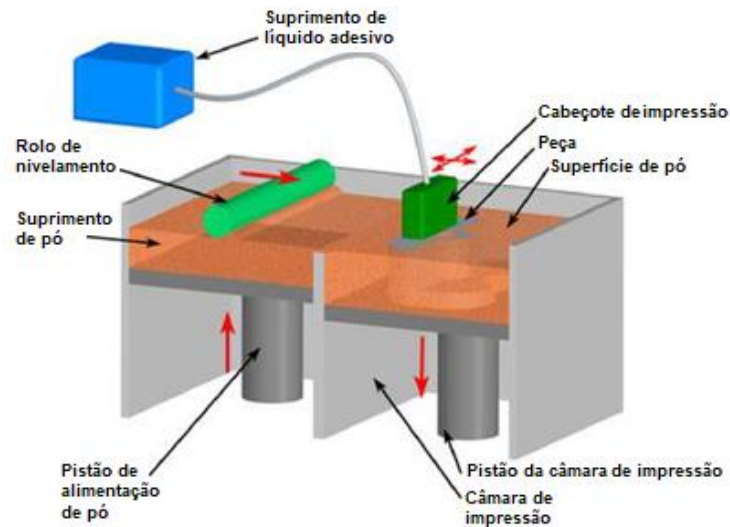


Figura 11 - Inkjet printing (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).

### 2.3.3.2 *Multijet modelling* (MJM)

Diferentemente do método anterior, a peça é construída por um ou mais jatos de polímeros sensíveis à luz, sobre a plataforma, formando a camada (Figura 12). Assim que depositado todo o polímero, a luz ultravioleta, que ilumina constantemente o sistema, promove a cura do polímero e então a nova camada pode ser iniciada. Este método, diferentemente do IJP, permite mover o cabeçote em 3 dimensões, ou seja, quando a máquina faz a primeira camada, o cabeçote move-se para cima para confeccionar a segunda camada (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

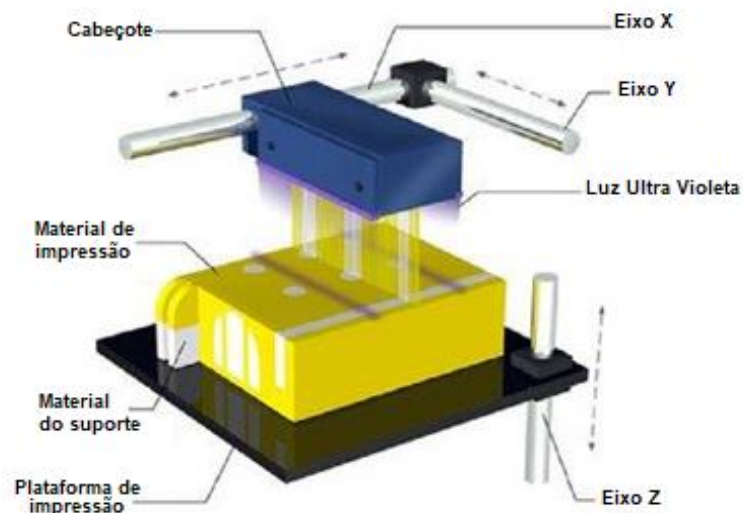


Figura 12 - Jateamento múltiplo (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).

### 2.3.3.3 Thermojet

Semelhante ao *Multijet (MJM)*, o método produz as peças com o seu cabeçote de 3 graus de liberdade, porém a cura do material não mais é feita pela radiação ultravioleta. Neste caso utiliza-se de finos jatos de material líquido que se solidificam durante o toque com a nova peça produzida. Vários bicos podem ser utilizados neste processo (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

### 2.3.4 Adesivos

Os adesivos são processos com uma gama de possibilidades limitada. Neste tipo de impressão, existe um rolo composto de um filme de plástico que é cortado (geralmente por um laser) e um compactador transfere calor suficiente para a camada cortada ativar o adesivo presente na face de baixo do filme de plástico, que, por sua vez, se une à plataforma ou à camada anterior (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.4.1 Laminated object manufacturing (LOM)

O material utilizado neste processo é um tipo de papel com um adesivo sensível ao calor aplicado em uma de suas faces. O rolo (Figura 13) é cortado por um laser e, posteriormente, esta parte cortada sofre a ação de outro rolo que transfere calor e promove a cura do material. O laser é cuidadosamente calibrado para cortar materiais da espessura do papel utilizado, e, para facilitar a remoção, o laser também faz cortes retangulares no material sobressalente. Assim que o rolo térmico passa sobre o papel, o adesivo é ativado pela temperatura e uma camada se une a outra. Ao final, todo o material excedente é retirado, restando apenas a peça pretendida (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

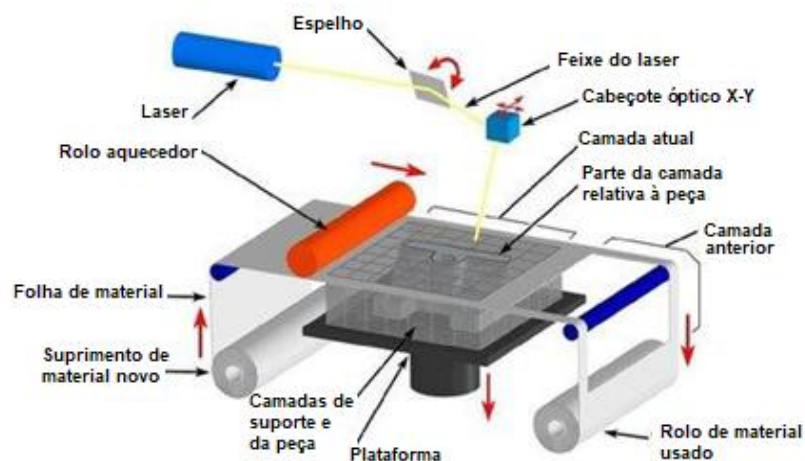


Figura 13 - Laminação (Adaptado de FERNANDES et. al., 2014).

#### 2.3.4.2 *Solid foil polymerization* (SFP)

Para a confecção da peça por este processo, utiliza-se de uma lâmina semi-polarizada e solúvel em resina. Quando exposta a radiação ultravioleta, a lâmina solidifica e se une à camada anterior, e se torna insolúvel na resina. Depois que a lâmina foi solidificada, uma nova camada pode ser aplicada. As áreas que não fazem parte da peça e que, portanto, não foram iluminadas, podem ser facilmente removidas por dissolução (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

#### 2.3.5 Feixe de elétrons

O princípio de funcionamento deste tipo de impressora é idêntico ao princípio dos processos da fundição por laser. Em lugar do laser, um feixe de elétrons fornece energia ao local sobre a qual se deseja trabalhar (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

##### 2.3.5.1 *Electron beam manufacturing* (EBM)

O processo acontece em uma câmara de vácuo (para evitar oxidações), onde o feixe de elétrons, promovido por uma alta tensão elétrica funde partículas metálicas para dar origem a uma peça sólida. É importante ressaltar que apenas metais são utilizados como matéria prima deste processo, pois a energia entregue pelo feixe de elétrons é alta. Este processo tem uma alta taxa de deposição de material e maior uniformidade na distribuição de temperatura, entretanto, suas desvantagens ficam por conta da falta de precisão do sistema e qualidade superficial prejudicada (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

## 2.4 Aplicações mais comuns

### 2.4.1 Roupas

Danit Peleg é uma designer de moda que mergulhou no universo da impressão 3D. O objetivo dela é que, no futuro, quando a tecnologia possibilitar, qualquer pessoa possa comprar os arquivos com as roupas desenhadas por ela e imprimir em casa. Um dos grandes diferenciais é que, em seu site, é disponibilizada uma ferramenta de customização das roupas pretendidas (GOEHRKE, 2017).

A Adidas, multinacional do ramo dos calçados, também têm linhas de pesquisa neste método de produção. Já produziram protótipos do Futurecraft 4D em que a sola é produzida inteiramente por impressoras 3D (TOMASSON; MICHALSKA, 2017).

#### 2.4.2 Casas

A Urban 3D é uma startup brasileira que promete construir casas impressas em 3D, agora no Brasil. Outras empresas do exterior já são capazes de produzir casas a partir de misturas de argamassa e outras matérias primas (SOUZA, 2019).

#### 2.4.3 Carros

Durante o Salão do Automóvel de Detroit, nos Estados Unidos, no ano de 2015, a impressão de toda a carroceria foi feita ao vivo. O modelo Local Motor Strati, na época, era estimado entre 18 e 30 mil dólares. A expectativa era que o tempo de produção do carro fosse de menos de 24 horas (MUNIZ, 2015).

Outro projeto ousado do mesmo tipo é o LSEV (Low-Speed Electric Vehicle), pertencente à empresa Polymaker. O veículo concilia a sustentabilidade de um motor elétrico com a tecnologia da impressão 3D. Segundo a empresa, somente os pneus, vidros, motor, chassi e assentos não são produzidos por impressão. A expectativa é que o produto chegue ao mercado no segundo trimestre de 2019 (SHEEHAM, 2018).

#### 2.4.4 Comida

O Food Ink é uma espécie de restaurante que produz desde mousse de chocolate até massa de pizza. Todos os pratos são feitos com ingredientes frescos e utilizam as técnicas da gastronomia molecular. O restaurante é o primeiro do mundo a ter um cardápio inteiro de produtos produzidos por impressão 3D (RENNICK, 2018).

#### 2.4.5 Tecidos do corpo humano

Pesquisadores da Wake Forrest School of Medicine fizeram implantes de peças produzidas por impressão 3D com materiais biodegradável, e após duas semanas, os implantes de músculos começaram a criar terminações nervosas. Dois meses depois, as próteses de orelhas começaram a criar cartilagem, e em cinco meses, vasos sanguíneos foram formados em torno dos ossos impressos e transplantados (LISTEK, 2019).

Outros produtos também podem ser criados. Atualmente, existe uma grande variedade de possibilidades de produção. Contudo, existem vantagens e desvantagens do uso desta tecnologia, e muito ainda precisa ser discutido e melhorado. Algumas das vantagens e desvantagens serão destacadas a seguir.

## 2.5 Vantagens e desvantagens

### 2.5.1 Vantagens

Trabalhos a respeito da impressão 3D indicam que esta tecnologia oferece um número grande de benefícios em comparação com métodos tradicionais de manufatura. A saber:

- a) Melhoria na complexidade das peças: Geometrias complexas como alguns canais de refrigeração internos, que não poderiam ser feitos por nenhum outro processo, podem ser confeccionados. Artistas e designers podem buscar inspiração na natureza e produzir peças leves, mas preservando a rigidez (CAMPBELL et al., 2011);
- b) Design e manufatura digital: Todos os processos anteriormente mencionados neste trabalho requerem modelos gráficos computacionais. Geralmente estes modelos exigem um grau não tão elevado de habilidade, e, uma vez que a grande maioria das máquinas opera sem monitoramento constante, torna-se mais simples a produção. Além disso, o grau de precisão do sistema pode ser aprimorado nesta técnica, uma vez que o sistema reproduz o modelo computacional com relativa precisão. (CAMPBELL et al., 2011);
- c) Livre de complexidades na produção: Em diversas produções, ferramentais, moldes, máquinas e etc. devem ser trocados a cada nova produção (set-up). A inexistência de set-up, possibilita a produção de peças customizadas mais facilmente (CAMPBELL et al., 2011);
- d) Produção rápida em escala global: A democratização dos arquivos via internet, ou seja, em escala global, potencializa a distribuição dos produtos. Algo semelhante com o que foi feito no contexto musical. Além disso, uma empresa que possua uma impressora, que atenda aos níveis de exigência do produto, localizada em qualquer lugar do mundo, pode produzir qualquer produto representado em um desenho computacional, o que agilizaria o escoamento da produção, uma vez que o produto é feito próximo ao consumidor (CAMPBELL et al., 2011);
- e) Redução no desperdício: Se, para a produção de um artefato, a impressora utiliza apenas o necessário, adicionando camadas sucessivas, o desperdício se aproxima de zero. Alguns processos, que necessitam mais material do que o que compõe a peça, podem reaproveitar o excedente na próxima produção, como é o exemplo da sinterização. Se, por sua vez, o desperdício de material diminui substancialmente, espera-se que o preço siga o mesmo caminho (CAMPBELL et al., 2011);

- f) Reciclagem: Novas tecnologias têm sido desenvolvidas a fim de agregar valor à impressão 3D. A ReDeTec®, por exemplo, já produz equipamentos capazes de reaproveitar peças antigas de plástico e fabricar um novo filamento, que servirá para alimentar novamente o processo, dando origem a uma nova peça (BAKER, 2018).

### 2.5.2 Desvantagens

Algumas das principais desvantagens do processo de impressão 3D são destacadas como:

- a) Falta de conhecimentos de design do produto: Após décadas de domínio de métodos convencionais, geralmente subtrativos, é necessário que se mude a forma de pensar a produção. Um treinamento de profissionais aptos para a área deveria ser feito de maneira a aproveitar a particularidades da manufatura aditiva (BRAGA, 2017);
- b) Crimes cibernéticos: Como a fabricação exige o uso de computadores, torna-se susceptível o roubo de informação entre empresas e outros usuários da tecnologia. A falta de regulamentação e segurança digital são problemas a serem contornados (BRAGA, 2017);
- c) Produção em massa: A tecnologia surgiu para a prototipagem rápida, e não para a produção em massa. Dessa forma, detalhes como a velocidade lenta do processo e os altos custos de matéria prima e operação (quando calculados para as grandes produções) são empecilhos significativos (BRAGA, 2017);
- d) Problemas ambientais: Quando se utiliza de alguns métodos de impressão, especialmente aqueles que utilizam nanomateriais, alguns problemas ambientais e de saúde dos produtores e consumidores podem ser considerados (CAMPBELL et. al., 2011);
- e) Precisão da impressão: Dentre os diversos processos de fabricação, existem alguns que produzem peças com melhor precisão e acabamento superficial, o que ainda é uma limitação da impressão 3D (BERMAN, 2011);
- f) Condições ambiente: Alguns métodos utilizados na impressão 3D produzem peças que são sensíveis à exposição ao calor e à umidade, por exemplo (BERMAN, 2011).



## 2.6 Métodos construtivos das peças

As peças podem ser fabricadas de diferentes maneiras. O preenchimento da camada e a orientação de impressão, por exemplo, variam entre impressoras e também entre projetos. Devem-se selecionar os parâmetros que se mostrarem mais convenientes ao projeto, diretamente na impressora.

### 2.6.1 Estratégia de preenchimento

Pode-se optar por diferentes percursos do cabeçote. Algumas das estratégias de preenchimento mais comuns (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) são a retilínea, a concêntrica (MARTINS, 2018).

- Retilínea: Caracteriza-se pela trajetória em zig-zag, cujos filamentos são notavelmente paralelos, podendo, estes, serem alternados ou não em diferentes ângulos;
- Concêntrica: O preenchimento interno é feito conforme o perímetro da camada em ciclos equidistantes;

Os ângulos descritos pela trajetória do cabeçote são conhecidos como ângulo de varredura (*raster angle*).

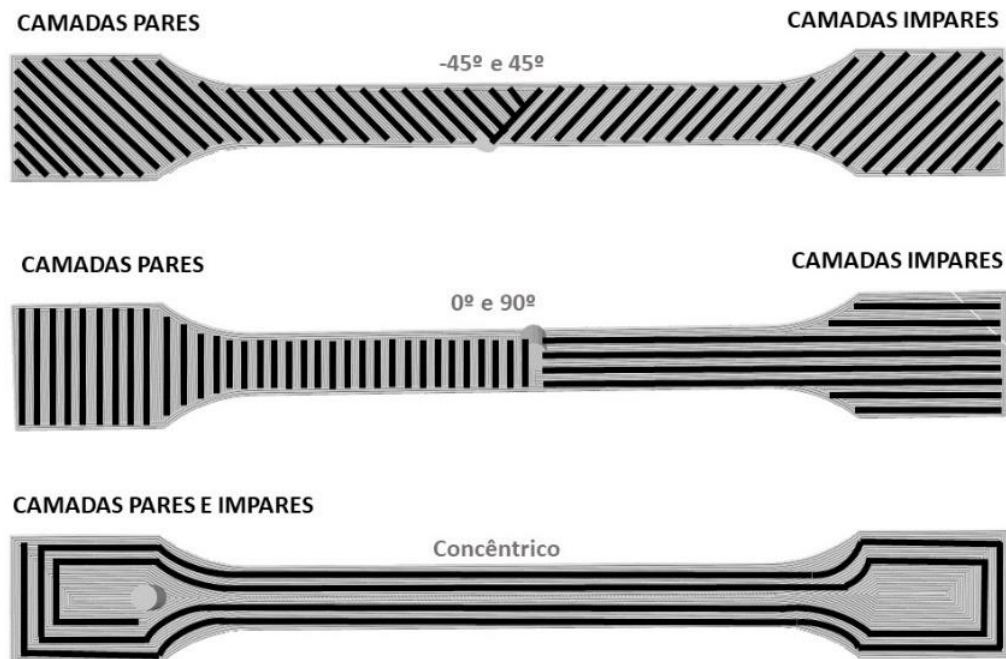
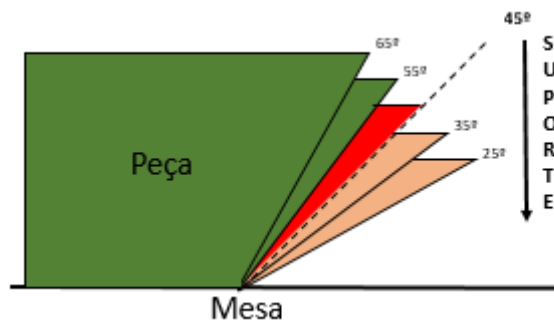


Figura 14 - Estratégias de preenchimento internos das camadas (Adaptado de Martins, 2018)

### 2.6.2 Orientação da impressão

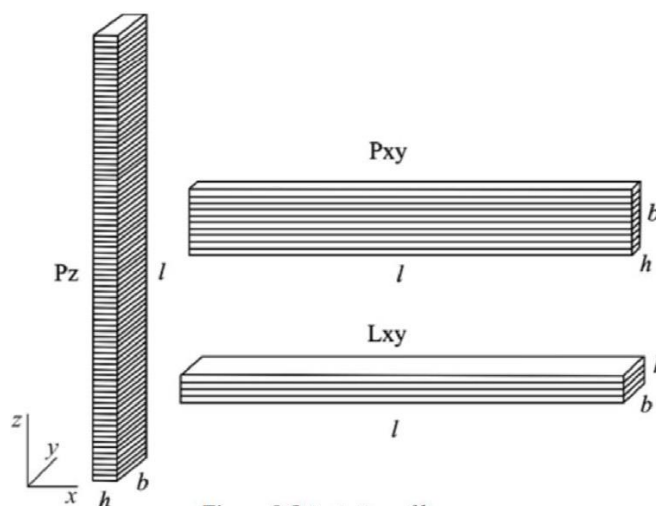
As peças impressas podem ser fabricadas em pé, deitadas, na diagonal e etc. Existem diversas maneiras e isso tem reflexos nos métodos de fabricação. Há manuais que recomendam o uso de suporte, ou seja, material depositado que servirá de apoio físico às partes suspensas da peça, para impressões em determinadas angulações.

A Cliever®, por exemplo, recomenda em seu manual (Figura 15) que, para peças que apresentam ângulos menores do que  $45^\circ$  com a superfície da mesa de deposição, devem ativar a geração de suporte.



**Figura 15 - Regra dos  $45^\circ$  para a geração de suporte (Adaptado do manual de instruções da Cliever CL2 Pro)**

E, assim, torna-se possível a impressão (Figura 16) em diversas posições. Algumas delas, que serão importantes para a compreensão deste trabalho, são a vertical ( $90^\circ$ ) e a horizontal ( $0^\circ$ ).



**Figura 16 - Orientações de impressão (Adaptado de Dizon et. al., 2018)**

A orientação denominada na figura por Pz representa a vertical ( $90^\circ$ ). É possível ver o fatiamento da peça em camadas e a existência delas em maior número. Já a peça

denominada na figura por  $L_{xy}$  representa a horizontal ( $0^\circ$ ) e é possível ver que existem camadas em menor número.

Neste ponto do trabalho, o foco será mudado para as propriedades dos materiais. Após fabricar as peças padrão com uma impressora 3D, serão efetuados testes nelas. É preciso, portanto, descrevê-los.

## 2.7 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais são necessárias para desenvolver qualquer projeto mecânico. Diversas medidas precisam ser feitas antes, durante e depois da fabricação de peças. Estas propriedades serão abordadas a seguir.

### 2.7.1 Deformações elástica e plástica

Desde quando o teste de tração foi desenvolvido, muitos pesquisadores contribuíram para a identificação de padrões nos gráficos, tais como: Os pontos de limite de escoamento e o limite de resistência à tração. O primeiro delimita o ponto que o material apresenta deformação permanente (plástica), que, para os metais, é estimado em 0,002 (ou 0,005 dependendo do tipo do material) de deformação. Já o segundo, determina o limite de resistência à tração, ou seja, a máxima tensão que o material suporta antes de ocorrer estricção e posterior ruptura da peça (NORTON, 2011).

### 2.7.2 Ductilidade e fragilidade

A ductilidade e a fragilidade são eventos ligados ao mesmo parâmetro. Este parâmetro é a capacidade que o material tem de se deformar plasticamente antes de apresentar ruptura. A ausência desta capacidade é entendida como fragilidade, explica Norton (2011).

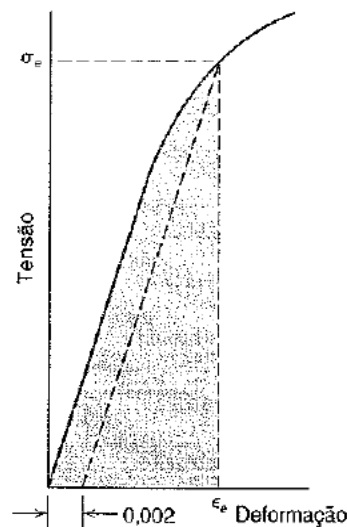
A ductilidade é medida com uma porcentagem de estiramento até a ruptura ou então a porcentagem de redução na área de ruptura. Quando a medida desse alongamento no comprimento da peça padrão excede 5%, classifica-se o material como dúctil, de acordo com Norton (2011).

Segundo o Callister (2000), a ductilidade do material é medida por:

$$AL\% = \frac{(L_f - L_i)}{L_i} * 100 \quad (1)$$

### 2.7.3 Resiliência

A resiliência de um material diz muito a respeito das deformações do material e dão um parâmetro importante para os projetos. Este parâmetro é a área sob a curva (Figura 17) de tensão de engenharia versus deformação dentro do regime elástico. Esta área representa a capacidade que o material tem de absorver energia antes de atingir a fase plástica, esclarece Callister (2000).



**Figura 17 - Área sob a fase elástica (adaptado do CALLISTER, 2000)**

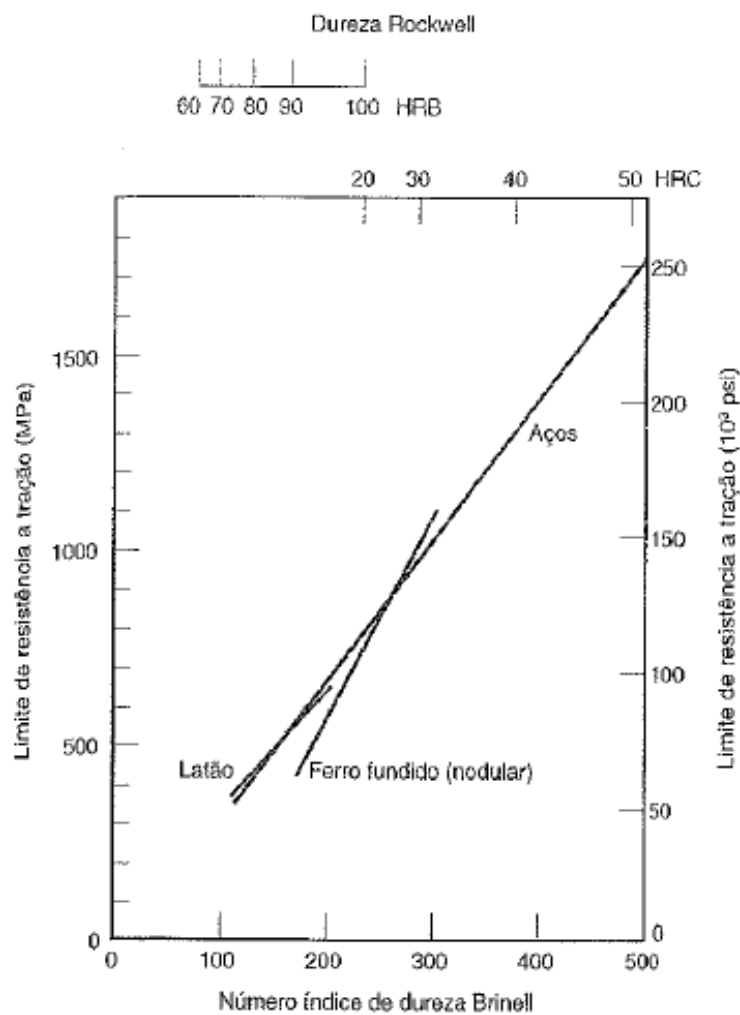
### 2.7.4 Dureza

Para a caracterização mecânica do material, a dureza pode ser um dos parâmetros necessários. Norton (2011) explica que a dureza tende a mensurar a resistência ao desgaste de certo material. No geral, materiais como o aço, têm sua resistência ao desgaste relacionada com a dureza, assim, qualquer aumento de dureza, provoca aumento de resistência ao desgaste. Shigley (2004) define que a dureza de um material é a resistência à deformação plástica provocada (usualmente) por penetração.

Há alguns tipos de ensaios utilizados, entre eles, podemos destacar quatro: Shore, Brinell, Vickers e Rockwell. Os três últimos são amplamente utilizados na indústria, pelo seu fácil uso e pela reprodutibilidade do teste.

A dureza pode influenciar nos testes de tração. Em seu livro, Callister (2000) define que o módulo de elasticidade  $E$  (normalmente dado em GPa para os metais), ou módulo de Young, é a constante de proporcionalidade entre tensão e deformação. Com isso, quanto maior tivermos o módulo de elasticidade, mais rígido, ou seja, menor será a deformação

elástica resultante da aplicação de uma força. Para um mesmo material, não é possível mudar o módulo de elasticidade, uma vez que este é uma propriedade do próprio material. Contudo, um material endurecido por algum mecanismo como por exemplo o encruamento e a têmpera (nos metais), tem uma maior capacidade de suportar tensões. Geralmente o limite de resistência à tração, ou seja, a máxima tensão que o material pode suportar antes de chegar à ruptura, pode ser estimado através da dureza (Figura 18).



**Figura 18 – Correlação entre dureza e limite de resistência à tração (adaptado do CALLISTER, 2000).**

### 2.7.5 Anelasticidade

Ainda, podemos destacar que alguns tipos de materiais tem um comportamento anelástico. Isso quer dizer que, em resposta à aplicação de tensão, uma deformação elástica que é dependente do tempo será dada, ou seja, ela irá continuar após a aplicação da tensão, e com a liberação, ainda será necessário um tempo para que se dê a

recuperação completa do material. Para alguns metais essa componente anelástica é desprezada com frequência, mas alguns tipos de polímeros apresentam magnitudes significativas.

### 2.7.6 Tenacidade

A tenacidade é uma propriedade bem semelhante com a resiliência. Ambos representam a capacidade do material em absorver energia. A diferença básica é que, em vez de ser ligada somente à fase elástica, como é a resiliência, a tenacidade é a capacidade de um material de absorver energia por unidade de volume até a sua ruptura, sem que, de fato, esta ocorra (NORTON, 2011).

A tenacidade é definida como:

$$U_T \cong \left( \frac{S_y + S_{ut}}{2} \right) \varepsilon_f \quad (2)$$

Sua unidade é dada geralmente é Joules/m<sup>3</sup>, uma unidade numericamente equivalente à Pa. Assim, podemos destacar que materiais dúcteis com resistência à tração semelhantes à de um material frágil, terão maiores níveis de tenacidade.

### 2.7.7 Isotropia

A isotropia é a semelhança nas propriedades dos materiais quando se consideram os vários eixos ou orientações da peça (NORTON, 2011).

Assim, propriedades como, a resistência à tração, ou o módulo de elasticidade, são os mesmos independentemente de como se ensaia o material. Metais, em sua grande maioria, são considerados isotrópicos, bem como alguns ametais que recebem status de macroscopicamente isotrópicos.

Há ainda o caso dos ortotrópicos, ou seja, materiais onde certa orientação é favorecida seja por particularidades construtivas, ou por natureza. Chapas laminadas a frio e madeira são respectivos exemplos disso.

Nos metais, essa propriedade está associada à diferença do espaçamento atômico ou iônico em função da orientação cristalográfica. A extensão e a magnitude dos efeitos dessa anisotropia dependem da simetria da estrutura cristalina, ou seja, quanto maior for a semelhança dos cristais, menores serão os efeitos da anisotropia (CALLISTER, 2000).

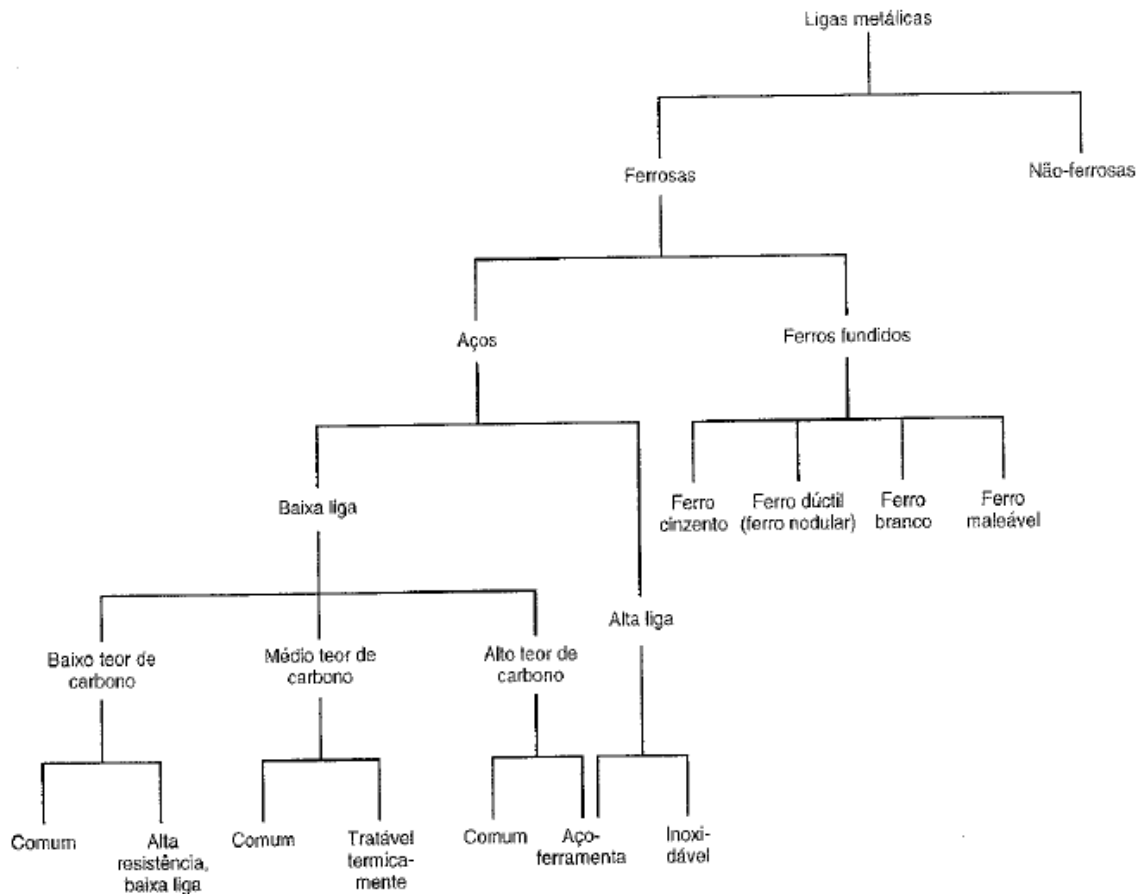
Dependendo do material, diferentes comportamentos, propriedades e composições podem ser encontrados. Estas particularidades fazem com que exista uma gama enorme de

possibilidades quando se vai executar um projeto. A seguir será abordado um pouco dessas particularidades.

## 2.8 Tipos de materiais e particularidades

### 2.8.1 Metais

Os metais podem ser classificados de várias formas, contudo, aqui serão classificados quanto aos elementos que os compõem. Assim, podemos dividir entre elementos ferrosos e não ferrosos, ou seja, a diferença fundamental é existência ou não do elemento Ferro na sua composição (Figura 19).



**Figura 19 - Classificação de ligas metálicas (adaptado do CALLISTER, 2000).**

Os ferrosos são extremamente utilizados na engenharia, desde os aços aos ferros fundidos.

Os aços são ligas de ferro e carbono (este normalmente inferior a 1%), e cada incremento de carbono na composição pode alterar drasticamente o comportamento das

peças, tamanha é a sensibilidade à adição de carbono. Aços com menor quantidade são mais dúcteis, e os com maior quantidade, são mais duros e, portanto, mais utilizados em casos em que o desgaste é maior (CALLISTER, 2000).

Os ferros fundidos têm em sua composição mais de 2,14% de carbono, assim precipitados de carbono (grafita) formam o material. Os ferros-fundidos alteram muito as suas propriedades em função da adição de elementos ligantes. Silício, Magnésio, e outros ligantes, somados aos tratamentos térmicos, conferem propriedades diferentes e geram também as classes de ferro fundido cinzento, nodular, branco, vermicular e etc. (CALLISTER, 2000).

Os materiais não ferrosos são ainda mais variados. Existe um enorme número de opções e tipos de materiais não ferrosos, como o cobre, o alumínio, o latão, o titânio e todas as ligas que podem ser formadas entre esses (CALLISTER, 2000).

No geral, estes materiais têm boa resistência mecânica, alguns têm durezas elevadas, outros nem tanto. Alguns são mais dúcteis, outros mais frágeis. E existem exemplos de materiais que também podem servir de matéria prima para a impressão 3D, muito embora não seja o foco deste trabalho (CALLISTER, 2000).

Muito do que se conhece e se desenvolveu a respeito dos materiais e as propriedades mecânicas, motivado pela revolução industrial e a necessidade de produção em massa, foi orientado aos metais. Produções de diferentes tipos de materiais, como os compósitos, os polímeros e as cerâmicas são mais recentes e ainda são objetos de pesquisa e desenvolvimento.

### 2.8.2 Polímeros

Para a caracterização mecânica dos polímeros, são usados alguns dos mesmos parâmetros que são úteis para os metais. Um ensaio de tração, por exemplo, pode determinar o módulo de elasticidade e o limite de resistência à tração. Mas, como os elastômeros, geralmente, apresentam deformações elásticas muito significativas, como é o caso das borrachas, se torna dever modificar as técnicas de ensaio e os padrões dos corpos de prova.

Os Polímeros apresentam três diferentes configurações da curva tensão-deformação. Esses comportamentos dizem muito sobre as propriedades dos materiais a serem analisados. Estes diferentes grupos (em relação ao comportamento mecânico) de materiais em questão, são (CALLISTER, 2000):



#### a) Elastômeros

Os materiais que se enquadram nesta categoria apresentam uma característica marcante, que influencia no maior grau de deformação dentre os polímeros. As cadeias moleculares com poucas ligações cruzadas entre as cadeias conferem maiores graus de liberdade. Um representante dessa classe de materiais é a borracha (CALLISTER, 2000).

As cadeias moleculares dos elastômeros apresentam um aspecto altamente emaranhado, retorcido e dobrado. Sob um regime de aplicação de tensão, o material se adequa na direção da tensão ao desenrolar, desdobrar e retificar as cadeias. Em uma situação onde o nível de tensão não é suficiente para deformar plasticamente o material, e este permanece em regime elástico, a liberação a tensão promove o retorno da peça para a forma original, ou seja, antes da aplicação da tensão (CALLISTER, 2000).

#### b) Termoplásticos

Nesta categoria de polímeros, a temperatura é quem exerce papel importante na ductilidade do material. Quando a temperatura aumenta, as vibrações moleculares tornam-se grandes o suficiente para quebrar as ligações covalentes principais da cadeia, e o polímero amolece, podendo, inclusive, se liquefazer. Se, antes disso, ele for resfriado novamente, ele endurece. Alguns destes processos podem ser totalmente reversíveis.

No geral, os polímeros com cadeia ramificada (que possuem cadeia flexível) e também os polímeros lineares, são termoplásticos (CALLISTER, 2000).

#### c) Termofixos

Os termofixos são polímeros com características bem particulares. Geralmente, quase metade das unidades mero da cadeia possuem ligações cruzadas entre uma cadeia e outra, que são formadas após um aquecimento inicial. Assim, a estrutura molecular tem uma melhor estabilidade dimensional e resistem às vibrações, ou seja, são mais consistentes (duros). A aplicação excessiva de calor promove o rompimento das ligações cruzadas e degradação do polímero sem que este apresente aumento da ductilidade.

São termofixos, os polímeros que tem ligação cruzada em rede. Como exemplo, temos as diversas resinas fenólicas e as borrachas que passam pelo processo de vulcanização são exemplos bem ilustrativos desta classe de polímeros (CALLISTER, 2000).

#### d) Plásticos

A gama de materiais que se enquadra nesta categoria de polímeros é vasta. Tanto os materiais termoplásticos, quanto os termofixos tem exemplares de plásticos. Contando com uma variedade de combinações mecânicas, que variam desde os rígidos e frágeis até

os que apresentam grandes deformações antes da fratura. Quanto à cadeia polimérica, também temos variedade, pois todas as estruturas moleculares e todos os graus de cristalinidade são encontrados dentro desta classificação de polímeros.

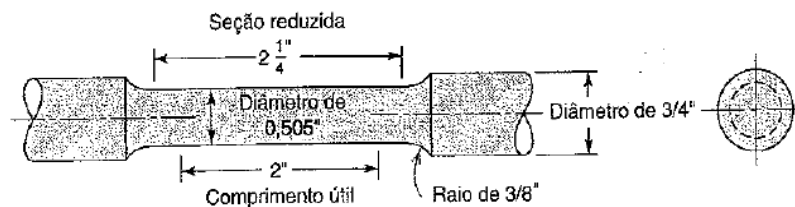
Dentre os exemplares de termoplásticos, que também é classificado como plástico, o que mais interessa a este estudo é o Políácido Lático (PLA), pois é o material que é mais utilizado nas impressoras que operam por extrusão. Eles apresentam excepcional resistência (Tabela 1) e tenacidade, resistência à distorção térmica, solúvel em alguns solventes orgânicos e etc. São muito utilizados em revestimentos de refrigeradores e brinquedos, por exemplo (CALLISTER, 2000).

**Tabela 1 - Propriedades de alguns tipos de plástico (Fonte: Stratasys).**

<b>Tipo</b>	<b>Limite de escoamento</b>	<b>Modulo de elasticidade</b>	<b>Estiramento</b>
<b>ABSi</b>	37 MPa	1920 MPa	4,4 %
<b>ABSplus</b>	33 MPa	2200 MPa	6 %
<b>ABSESD7</b>	36 MPa	2400 MPa	3 %
<b>PCABS</b>	41 MPa	1900 MPa	6 %
<b>PLA</b>	45 MPa	3038 MPa	2,5 %

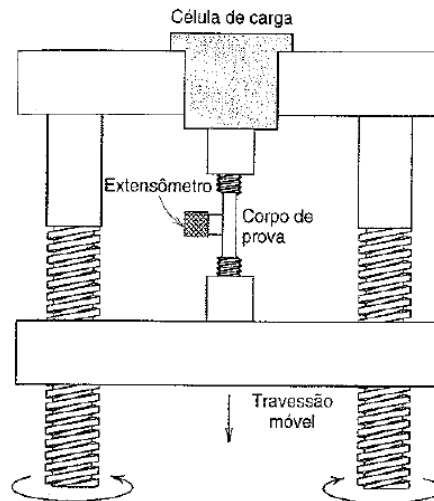
## 2.9 Ensaio de resistência à tração

Efetuar ensaios de resistência à tração requer uma série de preparativos. As normas de ensaio de tração recomendam o uso de corpos de prova padronizados (Figura 20) devem ser utilizados na máquina de ensaios. Dependendo da máquina, diferentes fixações do corpo de prova podem ser adotadas.



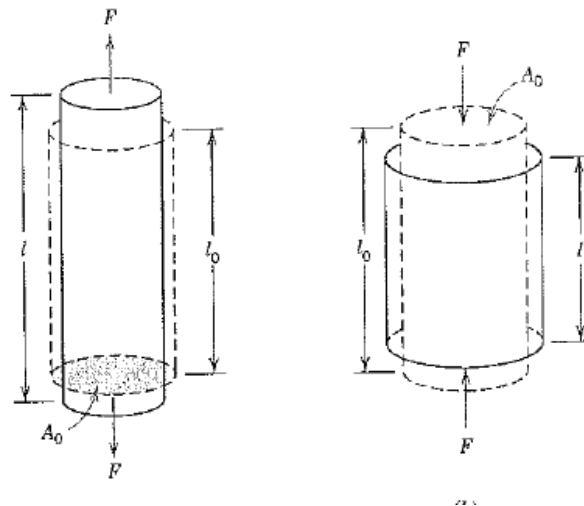
**Figura 20 - Um exemplo de corpo de prova (adaptado do CALLISTER, 2000)**

Esta máquina (Figura 21) deve aplicar tensão sobre o material de forma lenta e gradual. Em metais, um acabamento é conferido à superfície do corpo de prova na intensão de eliminar concentradores de tensão.



**Figura 21 - Tipo de máquina para ensaios de tração (adaptado do CALLISTER, 2000).**

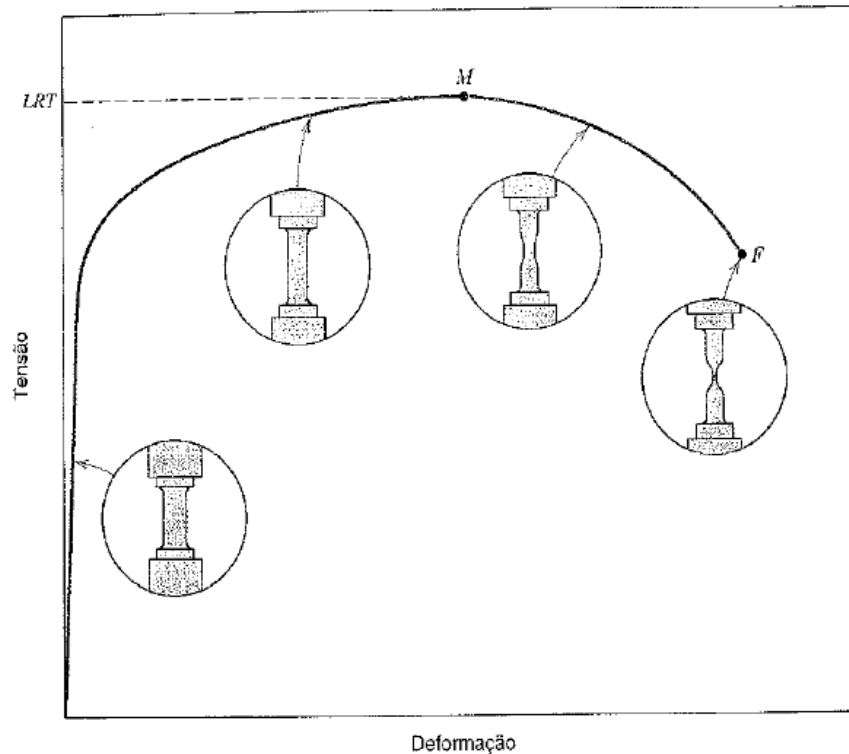
Além disso, é necessário medir o estiramento da peça (Figura 22). Nos metais, por exemplo, há uma fase elástica bem definida, assim, existe uma porcentagem de deformação em que o material consegue se recompor completamente (NORTON, 2011).



**Figura 22 – Estiramento no teste de tração (adaptado do CALLISTER, 2000).**

A partir desta hipótese, é elaborada a curva de tensão-deformação.

### 2.9.1 Curva tensão de engenharia - deformação



**Figura 23 - Exemplo de curva tensão-deformação (adaptado do CALLISTER, 2000).**

O diagrama tensão-deformação (Figura 23) é fruto das medições feitas através da instrumentação do sistema. A tensão é a razão da força, que é medida pela célula de carga, pela área inicial do corpo de prova. Podendo ser calculada por:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3)$$

P representa a força aplicada ao material, e  $A_0$  é a área inicial da seção transversal do corpo de prova utilizado no ensaio de tração (NORTON, 2011).

Já a deformação do sistema é encontrada através da leitura do extensômetro, por exemplo. Outros sistemas também podem ser utilizados, inclusive a adoção de dois pontos de referência a uma distância arbitrária, que serão novamente medidos após a aplicação da tensão, ou então após a ruptura da peça. Esta deformação pode ser calculada através de:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

Note que  $L_0$  é o comprimento inicial do corpo de prova e  $L$  é o comprimento medido após a aplicação da tensão no material. Como temos uma relação entre duas unidades de comprimento, a deformação é adimensional (NORTON, 2011).

### 2.9.2 Módulo de elasticidade

Um dos principais parâmetros, encontrados no diagrama em questão, é o módulo de elasticidade. A lei de Hooke expressa que há proporcionalidade entre a tensão e a deformação sob um regime elástico, como segue a fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

O resultado desta relação, identificado como E na equação, é o módulo de Young, ou simplesmente módulo de elasticidade. Em alguns casos, é mais fácil identificar seu valor pelo diagrama, pois o módulo de elasticidade é a inclinação da reta característica do regime elástico do material, ou seja, anterior ao limite de escoamento. Uma vez que a deformação é adimensional, o módulo de elasticidade apresenta as mesmas unidades da tensão (NORTON, 2011).

### 2.9.3 Limite elástico-plástico

O fim do regime elástico é marcado pela intersecção de uma reta paralela (Figura 24) à porção elástica do diagrama, a partir de uma pré-deformação específica, que geralmente é de 0,002 ou 0,005, ou seja, menor do que 0,5%.

A magnitude do valor da tensão de escoamento é, portanto, a resistência à deformação plástica do material (NORTON, 2011).

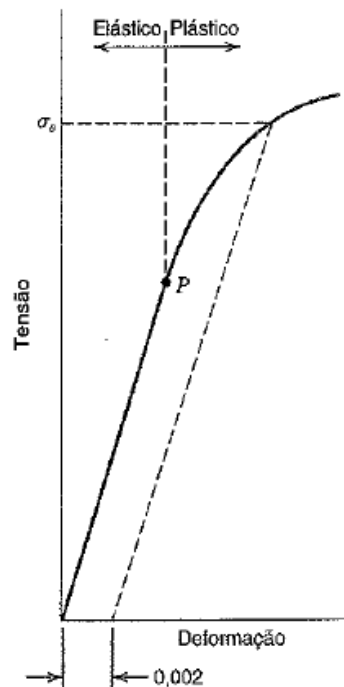


Figura 24 - Limite elástico (adaptado do CALLISTER, 2000).

#### 2.9.4 Limite de resistência à tração

Após o limite de escoamento, a tensão continua aumentando, porém de maneira não linear. O valor máximo encontrado no gráfico é conhecido como limite de resistência à tração, posterior a esse ponto, a peça sofre uma redução na área (próximo ao local da ruptura), também conhecida como estrição, e apresenta uma aparente redução na tensão. Como calculamos a tensão com base na área da secção transversal inicial, e é complicado medir as mudanças na secção transversal durante o ensaio, o que se extrai do ensaio de tração é o diagrama tensão de engenharia-deformação.

Conforme já foi dito, os valores mais importantes desse diagrama são: O Módulo de Elasticidade, que fornece uma noção da rigidez do material; O limite de escoamento que fornece as tensões em que o material irá deformar plasticamente; E o limite de resistência à tração, que fornece a tensão em que o material estará muito próximo à ruptura. Estes dados, quando relacionados à densidade do material, podem ser úteis para os projetos de peças cada vez mais leves preservando a resistência mecânica (NORTON, 2011).

#### 2.10 Ensaio de tração em amostras fabricadas por manufatura aditiva

Com a intenção de comparar tipos de material e orientações de impressão, Cordeiro (2014), em estudo afim de otimizar os parâmetros de impressão, realizou testes em amostras descritas na norma EN ISO 527-2. Para construir as amostras, utilizou-se três tipos de altura de camada (0,1 / 0,2 / 0,3), três diferentes taxas de preenchimentos (25%, 50% e 100%) e três diferentes orientações de impressão (X, Y e Z). Em cada combinação, foram utilizadas três amostras, e o resultado apresentado foi a média aritmética delas.

Letcher e Waytashek (2014), fizeram testes em amostras de PLA utilizando-se de corpos de prova padrão descritos pela mesma norma a que se baseia este trabalho, porém do tipo I. Para tal, variou o ângulo de varredura das amostras produzidas em três diferentes valores (0°, 45° e 90°). Adicionalmente, realizaram testes de fadiga quanto à flexão e um teste de tração do filamento de PLA ensaiado à quatro diferentes taxas de deformação (5, 50, 200 e 500 mm/min).

Já Castelo Branco e Martins (2016), pensando na avaliação de performance dos materiais produzidos por FDM, testou o PLA em duas temperaturas de extrusão, três percentuais de preenchimento das amostras e duas orientações de impressão (X e Y). Isso gerou 12 diferentes configurações, e, em cada configuração, realizou três ensaios, totalizando 36 amostras.

Raney (2017), por sua vez, utilizando-se de impressões feitas em ABS variou a orientação da impressão em três eixos diferentes (X, Y e Z). A intenção do estudo foi caracterizar experimentalmente as peças de ABS produzidas por FDM.

Jiang e Smith (2017), em estudo comparativo dos filamentos compósitos com fibra de carbono, ensaiaram quatro diferentes materiais (ABS, PLA, PETG e Amphora), puros e compostos por fibras de carbono, sob quatro diferentes ângulos de varredura ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). No estudo em questão ela utilizou 2mm/min como taxa de deformação.

Koch, Hulle e Rudolph (2017), testaram peças produzidas em diferentes ângulos de raster ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  e  $90^\circ$ ) com outras produzidas por injeção em molde. Utilizando-se uma taxa de deformação de 5 mm/min, com a mesma norma de tração nos plásticos a que este trabalho se baseia, porém feito com amostras do tipo I e preenchimento de 100%, foram executados os testes.

Por fim, Martins et. al. (2018) executou testes de tração em amostras produzidas por FDM. Utilizando-se amostras descritas na norma ISO 527-1/2:2012, variou entre três tipos de estratégias de preenchimento ( $\pm 45^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  e concêntrica) para cada um dos três diferentes materiais (ABS, PETG e PLA).

O próximo capítulo tem o objetivo de apresentar a metodologia utilizada para imprimir as amostras e testá-las em ensaio de tração.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e equipamentos utilizados neste trabalho. Vale ressaltar que os métodos utilizados são baseados em normas técnicas vigentes. Os desvios da norma, quando necessários, também são destacados.

#### 3.1 - Descrição da amostra

Para que fossem realizados os testes, foram disponibilizados, gentilmente, alguns metros de filamento que se encontravam sob forma de bobina em estoque no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM- UFU). Os filamentos do laboratório são destinados às impressões referentes aos projetos de pesquisa dos estudantes e dos professores que trabalham por lá. Por convenção, e compatibilidade com os equipamentos disponíveis para impressão, são adquiridas bobinas de plástico PLA disponíveis em variadas cores. Para os ensaios, foram utilizadas amostras de cor cinza.

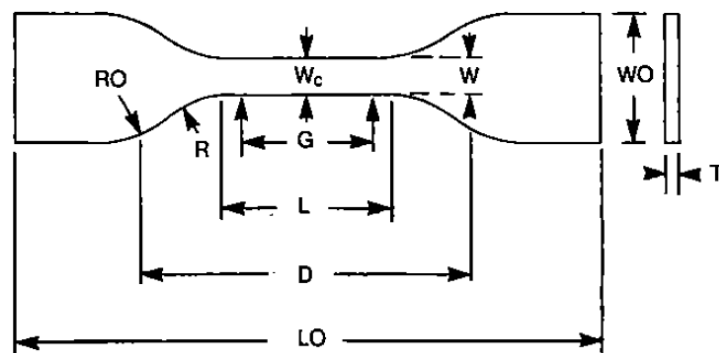


Figura 25 - Amostra do Tipo IV segundo a ASTM D638-02a

A peça padrão a ser utilizada nos testes (Figura 25) é descrita de acordo com a norma técnica dos ensaios de tração nos plásticos (ASTM D638-02a). De acordo com esta norma, recomenda-se a utilização de corpos de prova com diferentes medidas para cada um dos tipos de polímero. Para os plásticos mais dúcteis, destaca-se o uso da amostra (Tabela 2) do tipo IV.



Tabela 2 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D638 - 02a)

Corpo de prova tipo IV	Dimensões (mm)	Tolerâncias (mm)
W – Largura da parte estreita	6	±0,5
L – Comprimento da parte estreita	33	±0,5
WO – Largura total	19	+ 6,4
LO – Comprimento total	115	Sem limite máx
G – Comprimento de teste	25	±0,25
D – Distância entre superfícies das garras	65	±5
R – Raio do filete	14	±1
RO – Raio externo	25	±1
T – Espessura da amostra	4	±0,4

### 3.2 – Número de amostras

O número de amostras foi limitado, tanto pelos recursos disponibilizados para os testes deste trabalho, quanto pela suficiência dos resultados segundo as especificações da norma ASTM supracitada.

Os fatos que inviabilizaram a fabricação de um grande lote de peças para teste, e, assim, a formação de um maior conjunto estatístico para a análise, foram:

- a) Custo de cada uma das amostras produzidas por FDM;
- b) Alta taxa de utilização da impressora devido ao número de alunos e professores que desenvolvem testes, aliado à quantidade de horas necessárias para a impressão de uma única amostra, sob risco de falha e consequente necessidade de nova impressão;
- c) Maior dificuldade de adequação das amostras feitas em ângulos diferentes de 0° e de 90°, uma vez que estas requerem a formação de suporte para correta impressão da amostra. Cada corte nos suportes da peça pode gerar avarias e inutilizar a amostra, principalmente pelo fato de o preenchimento da peça ser ajustado em 100%, o que implica em grande quantidade de suporte gerado.

Foram utilizadas 10 amostras impressas do Tipo IV, sendo que cinco delas foram impressas horizontalmente, isto é, com a face maior voltada para a plataforma de impressão (ou mesa), e as outras cinco, verticalmente, o que significa que a peça foi impressa em pé.

Embora a quantidade de amostras não seja grande, ela é suficiente. Esta mesma norma em questão, recomenda que, para materiais isotrópicos, realize-se, ao menos, cinco experimentos. Caso haja a suspeita de anisotropia do material, que é o caso do nosso experimento, torna-se útil a realização do ensaio de mais cinco amostras não paralelas ao mesmo eixo.

### 3.3 – Descrição da impressora utilizada

Para este trabalho, utilizou-se uma impressora do Laboratório de Projetos Mecânicos da UFU (LPM – UFU). Este equipamento é da Fabricante Cleiver, modelo CL2 Pro (Figura 26). Para este equipamento, é possível configurar alguns importantes parâmetros de projeto, valendo destacar o preenchimento da amostra, espessura das paredes, espessura das camadas, ângulo de ativação do suporte, temperatura do extrusor, temperatura da mesa, densidade do filamento, tipo de preenchimento, diâmetro do bico e o espaçamento entre as linhas de suporte.



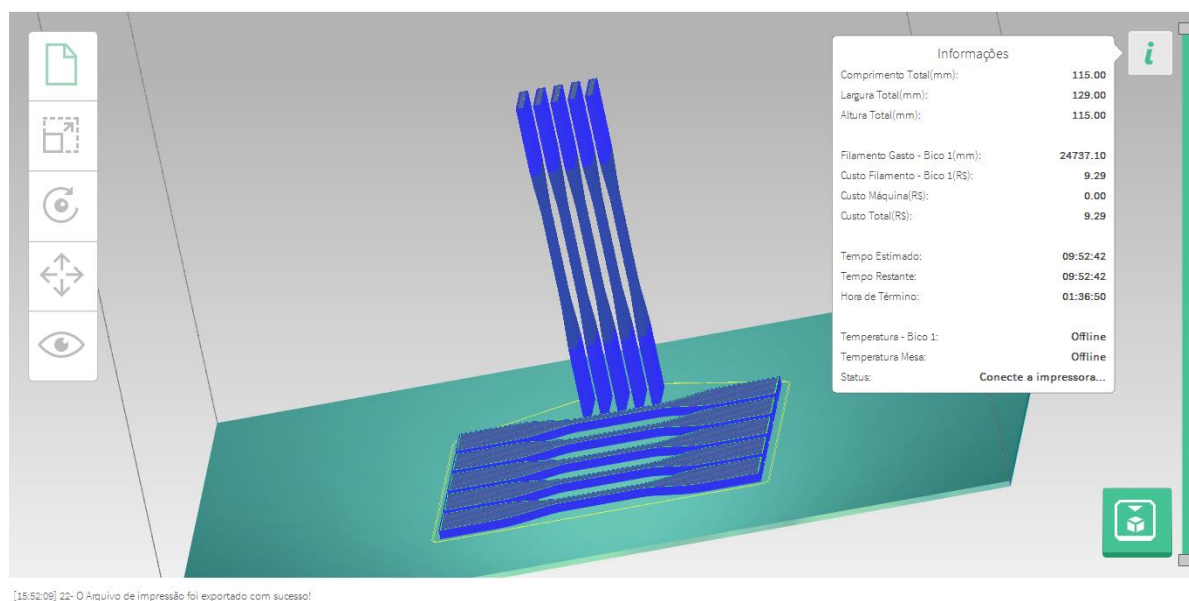
Figura 26 - Impressora utilizada no trabalho (Fonte: O próprio autor)

Segundo o manual da impressora, a resolução da altura da camada no equipamento é de 0,3 a 0,1 mm. Além disso, a tolerância dimensional da impressão é de 0,2 mm. Assim, é certo dizer que todas as amostras estiveram dentro das tolerâncias dimensionais.

### 3.4 – Projeto e fabricação dos corpos de prova

Para o projeto dos corpos de prova, fez-se uso do software SolidWorks® para modelagem do corpo de prova padrão, do software próprio da Cliever para simulação de produção das peças.

De acordo com a simulação (Figura 27), estima-se que foram necessários quase 25 metros de filamento para a fabricação dos 10 corpos de prova e aproximadamente 09h53min para completar o trabalho.



**Figura 27 - Simulação da impressão**

Os parâmetros mais importantes do experimento (Tabela 3) foram definidos e configurados diretamente no mesmo software supracitado, o qual comanda a máquina. Alguns parâmetros, como por exemplo, a temperatura do bico e a temperatura da mesa, foram definidas com base empírica por parte do técnico de laboratório, advindo de trabalhos anteriores. Já o preenchimento, por exemplo, foi exigência do próprio experimento.

Tabela 3 - Parâmetros de impressão (Fonte: O próprio autor)

Parâmetro	Valor
Tipo de preenchimento	Retilínea
Diâmetro do bico (mm)	0,35
Espessura da base (Camadas)	2
Espessura do topo (Camadas)	2
Espaçamento entre as linhas de suporte (mm)	3,00
Engrossar paredes quando necessário	SIM
Habilitar recuo de camadas	SIM
Diâmetro do filamento (mm)	1,75
Temp. Extrusor (°C)	195
Temp. Mesa (°C) – Camada inicial	40
Temp. Mesa (°C) – Demais camadas	50
Densidade (g/mm <sup>3</sup> )	1,20
Preenchimento (%)	100
Espessura das paredes (mm)	2
Altura entre camadas (mm)	0,190
Ângulo de ativação do suporte (°)	0

Sob estas configurações, a impressora produz amostras (Figura 28) com contorno (da secção transversal) de espessura com 2 milímetros e constrói uma camada com deposições paralelas à direção  $-45^\circ$  nas camadas ímpares e  $+45^\circ$  nas pares.

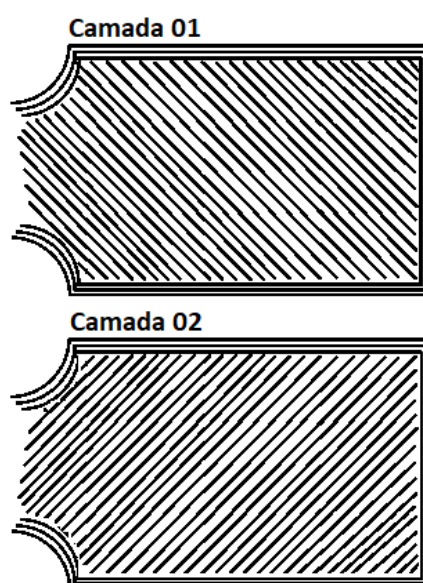


Figura 28 - Construção das camadas da amostra (Fonte: O próprio autor)

Desta forma, foram confeccionadas as dez amostras pertinentes ao ensaio, sendo 5 na horizontal ( $0^\circ$ ) (Figura 29) e outras 5 na vertical ( $90^\circ$ ). Todas foram nomeadas para que houvesse facilidade de identificação da peça no caso de ocorrência de problemas de ensaio e/ou de outra origem. As amostras foram nomeadas com uma letra e um índice. A letra representa a orientação à qual foi impressa, e o índice refere-se à ordem à qual foi testada. Segundo a orientação temos duas opções H ( $0^\circ$ ) e V ( $90^\circ$ ). Cada uma das orientações dispõe de cinco amostras. Desta forma, as 10 peças são respectivamente H1, H2, H3, H4, H5, V1, V2, V3, V4 e V5.



Figura 29 - Exemplos de corpo de prova impresso (Fonte: O próprio autor)

### 3.5 – Bancada de testes

Para que esta etapa fosse realizada, o Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU (LTM – UFU) disponibilizou sua máquina de testes de tração (Figura 30) da fabricante MTS Landmark, modelo 370.10.



**Figura 30 - Máquina utilizada no ensaio de tração (Fonte: O próprio autor)**



**Figura 31 - Extensômetro (Fonte: O próprio autor)**

Com relação à medição do Módulo de Elasticidade e da deformação do corpo de prova, foi utilizado um extensômetro (Figura 31) cuja fabricante também é a MTS e o modelo do equipamento é 634.31F-24. Não foi necessário outro dispositivo de medição durante o ensaio de tração.

### **3.6 Realização dos testes**

Primeiramente, foi necessário aparar as rebarbas geradas durante o processo de impressão e dar um suave acabamento (Figura 32) com uma lixa nos locais onde a rebarba apareceu, para que isso não influenciasse nos resultados.

Separaram-se as peças pertencentes aos dois grupos (horizontal e vertical). Marcaram-se todas com um pequeno ponto para auxiliar na centralização da máquina e duas outras pequenas marcas nas laterais da peça para que a pinça pegasse de maneira mais exata possível todas as amostras.

Posteriormente, foram levadas à máquina de tração sob condições bem semelhantes entre o grupo em termos de acabamento, dimensão e completamente dentro das tolerâncias descritas na norma técnica supracitada (ASTM D638-02a).



**Figura 32 - Exemplar de peça acabada (Fonte: O próprio autor)**

Foi configurado o valor nominal do extensômetro como 20 mm. A velocidade de teste foi regulada para 2 mm/min por questões de segurança da máquina. Além disso, sob condição de 0,7% de deformação, programou-se a máquina para interromper o movimento, manter a tensão, para que fosse retirado o extensômetro sem que houvesse algum dano ao dispositivo por conta de uma ruptura ou algo similar. Contudo, durante esta pausa, o software não deixou de funcionar e gerou pontos com valores de tensão e deformação praticamente constantes durante o intervalo de tempo.

Para melhorar um pouco o aspecto dos gráficos que seriam elaborados, excluiu-se estes pontos com valores de tensão e deformação relativos ao momento em que a deformação permaneceu estática em 0,7%, deixando os pontos posteriores onde a deformação voltava a crescer.

Conforme destacado anteriormente, todas as amostras foram impressas dentro da tolerância exigida pela norma. Todas as peças foram medidas (Tabela 4) e os dados mais importantes para a execução do ensaio (espessura e largura da parte estreita), foram medidos com o auxílio de um paquímetro. A partir de então, calculou-se a área da secção transversal da peça.

**Tabela 4 - Medidas da secção transversal da peça**

Corpo de prova	Espessura (mm)	Largura da parte estreita (mm)	Área da secção transversal (mm <sup>2</sup> )
H - 1	3,70	6,25	23,12
H - 2	3,70	6,35	23,49
H - 3	3,70	6,35	23,49
H - 4	3,70	6,35	23,49
H - 5	3,80	6,35	24,13
V - 1	3,75	6,31	23,67
V - 2	3,70	6,30	23,33
V - 3	3,75	6,31	23,67
V - 4	3,70	6,23	23,07
V - 5	3,75	6,31	23,67

Além disso, o tempo para retirada do extensômetro em todos os ensaios foi medido pelo próprio software da máquina. Para fins de comparação e conhecimento foram relacionados (Tabela 5) os tempos relativos a cada amostra.

**Tabela 5 - Tempos de retirada do extensômetro**

<b>Corpo de prova</b>	<b>Tempo de retirada do extensômetro (s)</b>
H - 1	25,9
H - 2	24,2
H - 3	45,2
H - 4	30,8
H - 5	25,5
V - 1	25,0
V - 2	47,8
V - 3	32,3
V - 4	38,2
V - 5	77,9

Ao apresentar ruptura, parou-se o teste, encerrando assim a aquisição de pontos por parte do software. Ao final do teste, obtiveram-se os pares coordenados de tensão e deformação. O Módulo de Elasticidade foi calculado pelo próprio software antes da retirada do extensômetro.

O próximo capítulo apresenta os resultados e discussões acerca dos testes realizados.



## Capítulo IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Condições da amostra impressa

Todas as amostras foram impressas de uma só vez. As cinco amostras horizontais apresentaram diferenças entre o acabamento superficial da face em contato com a mesa e a face superior. A face em contato com a mesa apresentou um melhor acabamento superficial, isto é, apesar de ser possível identificar as linhas de deposição, existe menor rugosidade. Já a face superior (Figura 33), apresentou as marcas das linhas por onde o extrusor depositou material, além de algumas rebarbas nas bordas da peça.

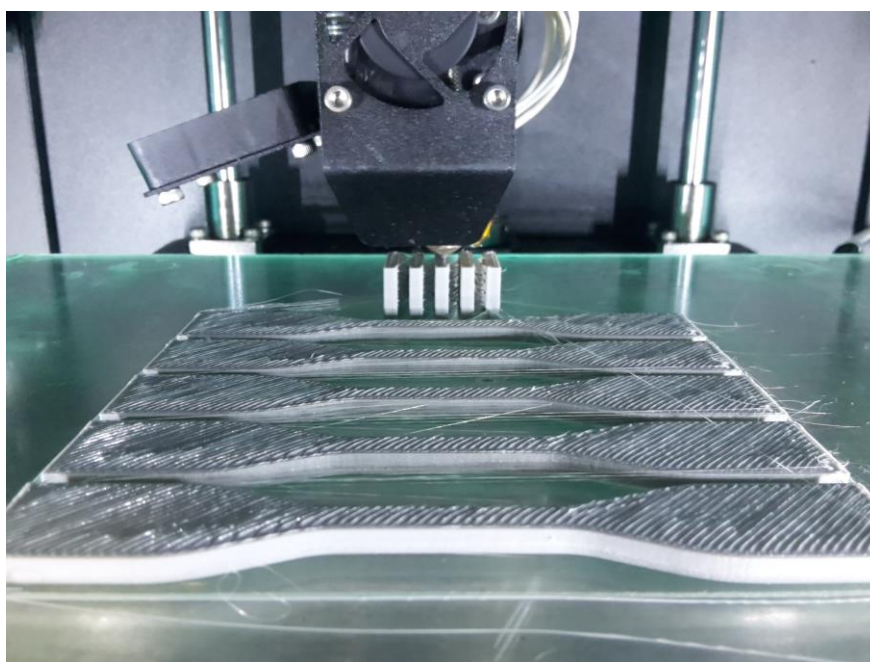


Figura 33 - Peças horizontais prontas (Fonte: O próprio autor)

As cinco amostras verticais (Figura 34), por sua vez, devido ao fato de terem sido produzidas próximas umas às outras, acabaram apresentando rebarbas na porção central das faces maiores.



**Figura 34 - Peças verticais finalizadas (Fonte: O próprio autor)**

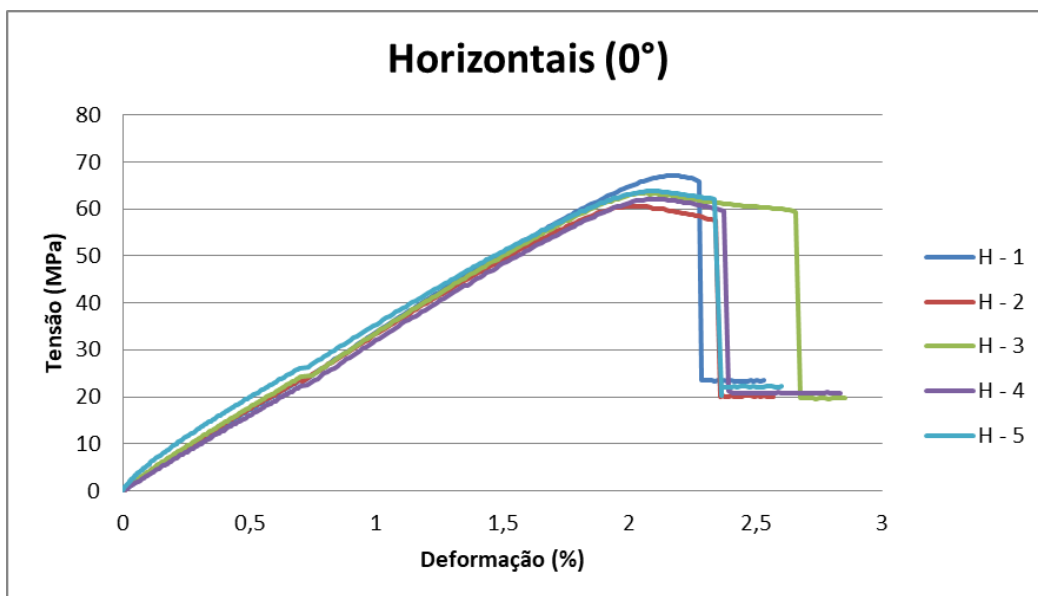
Todas as faces da peça apresentaram acabamento semelhante, sendo possível ver distintamente todas as camadas produzidas ao longo da peça.

#### 4.2 O teste de tração

Os pontos gerados pela máquina de tração foram reunidos em dois gráficos e os dados principais dos ensaios foram dispostos em duas tabelas. De acordo com o ensaio de tração, as amostras impressas horizontalmente apresentaram (Figura 35) melhores propriedades mecânicas. Pela Tabela 6, é possível identificar que as cinco amostras tem, em média, Módulo de Elasticidade de 2,58 GPa, um Limite de Escoamento de 63,00 MPa e um Limite de Resistência à tração de 63,38 MPa.

**Tabela 6 - Resultados principais das amostras horizontais**

<b>Amostra</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à tração (MPa)</b>
<b>H – 1</b>	2380	66,61	67,06
<b>H – 2</b>	2720	60,42	60,55
<b>H – 3</b>	2580	63,20	63,44
<b>H – 4</b>	2300	61,69	62,08
<b>H – 5</b>	2910	63,11	63,78
<b>Média</b>	2578	63,00	63,38
<b>Desvio Padrão</b>	190	1,56	1,65



**Figura 35 - Gráfico tensão x deformação das amostras impressas a 0°**

Em seu trabalho, Letcher e Waytashek (2014), partindo de uma orientação de impressão à 0° e ângulo de varredura de  $\pm 45^\circ$ , encontrou um limite de resistência à tração médio de 64,03 MPa e Módulo de Elasticidade 3600 MPa.

Já Castelo Branco e Martins (2016), considerando um corpo de prova impresso com ângulo de varredura de  $\pm 45^\circ$  e orientação de impressão de 0°, encontrou um limite de resistência à tração de  $60,05 \pm 1,20$  MPa e um Módulo de Elasticidade de  $651,20 \pm 15,74$  MPa.

Por sua vez, Martins et. al. (2018), partindo do corpo de prova com orientação de impressão de 0° e ângulo de raster de  $\pm 45^\circ$ , encontrou um limite de resistência à tração de 50,73 MPa. O estudo não descreveu resultados para o Módulo de Elasticidade.

Jiang e Smith (2017), para uma orientação de impressão de 0°, ângulo de raster de  $\pm 45^\circ$ , encontrou um valor médio de 52,20 MPa para o limite de resistência à tração e 3300 MPa para o Módulo de Elasticidade.

Cordeiro (2014), sem destacar o ângulo de varredura utilizado, considerando uma altura da camada de 0,2 mm, densidade de 100% e uma orientação de impressão de 0°, obteve-se limite de resistência à tração de 55,271 MPa e Módulo de Elasticidade de 3318 MPa.

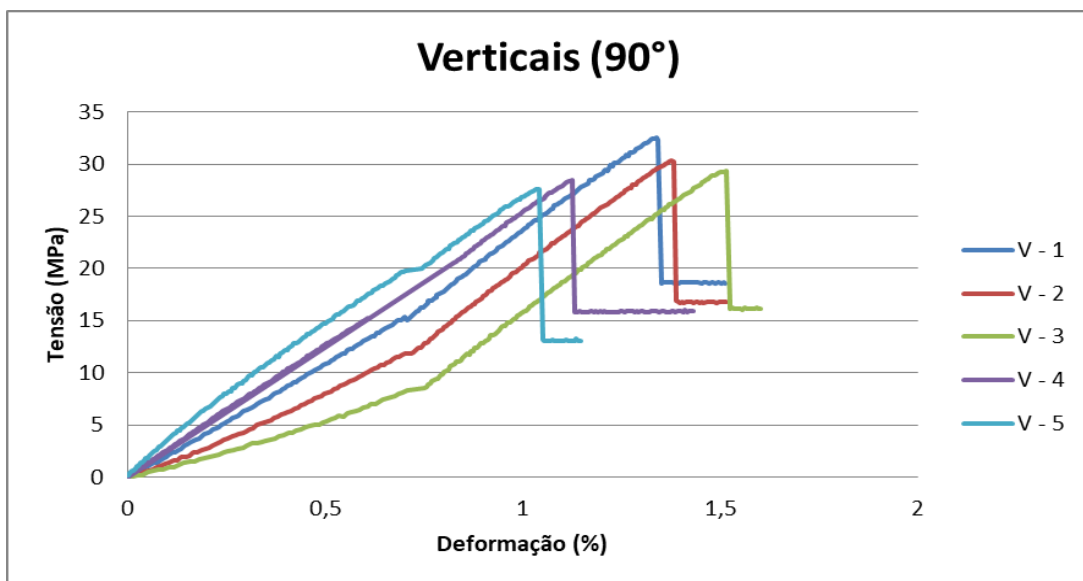
Em adição, Letcher e Waytashek (2014), destacaram que fatores como a taxa de deformação podem influenciar os valores de tensão encontrados. Outra hipótese para as disparidades com relação ao limite de resistência à tração é a questão do intervalo utilizado para remover o extensômetro. É possível que ele tenha proporcionado tempo suficiente para

o material se modificar a nível micro estrutural. Além disso, a real taxa de preenchimento, isto é, considerando as lacunas deixadas durante a impressão, pode influenciar nos resultados.

A Tabela 7 indica que as amostras verticais apresentaram, em média, Módulo de Elasticidade de 1,93 GPa e um Limite de Resistência à tração de 30,00 MPa.

**Tabela 7 - Resultados principais das amostras verticais**

Amostra	Módulo de Elasticidade (MPa)	Limite de Resistência à tração (MPa)
V - 1	2130	32,57
V - 2	1550	30,36
V - 3	940	29,34
V - 4	2130	30,10
V - 5	2930	27,63
<b>Média</b>	1936	30,00
<b>Desvio Padrão</b>	553	1,21



**Figura 36 - Gráfico tensão x deformação das amostras impressas a 90°**

Raney (2017), evidencia, em seus estudos, que as amostras geradas verticalmente (no caso, as que foram ensaiadas perpendicularmente à camada depositada) apresentam valores de limite de resistência à tração de cerca de 58% daquelas geradas horizontalmente (ensaiadas no plano de deposição da camada). Destaca, ainda, que a baixa adesão das camadas justifica a diferença encontrada.

Cordeiro (2014), obteve um limite de resistência à tração de 35,692 MPa e Módulo de Elasticidade de 3517 MPa na orientação de impressão de 90°, ou seja, para amostras impressas na vertical. No trabalho, não são destacados valores de ângulo de varredura.

Koch, Hulle e Rudolph (2017), encontraram valores de limite de resistência à tração que se assemelham, em muito, com as peças impressas neste estudo a partir de um ângulo de impressão de 90° (verticais). Como resultado, encontrou-se um valor médio de limite de resistência à tração de 29,75 MPa. À respeito, destaca-se a semelhança dos valores com este trabalho, pois foi encontrado um valor de  $30,00 \pm 1,21$  MPa. Isso reforça a hipótese de que os testes elaborados em peças obtidas nesta orientação e/ou ângulo de varredura, atestam a baixa adesão das camadas.

Percebe-se que o limite de escoamento das peças impressas na horizontal (0°) é bem maior do que o limite de resistência à tração das peças impressas na vertical (90°). Outro ponto interessante a se destacar é o aumento do limite de resistência à tração de 211 %, em média, comparando as mesmas orientações de impressão.

Uma nota sobre os gráficos (Figura 36) é de que a pausa para retirar o extensômetro durante a taxa de deformação 0,7% ocasionou ruído no gráfico apresentado. É possível que algum efeito na microestrutura tenha acontecido durante esta pausa, porém, não foram abordadas estas questões. É fato também que a taxa com que a tensão cresce, por volta deste intervalo referido, é afetada, pois podemos visualizar graficamente.

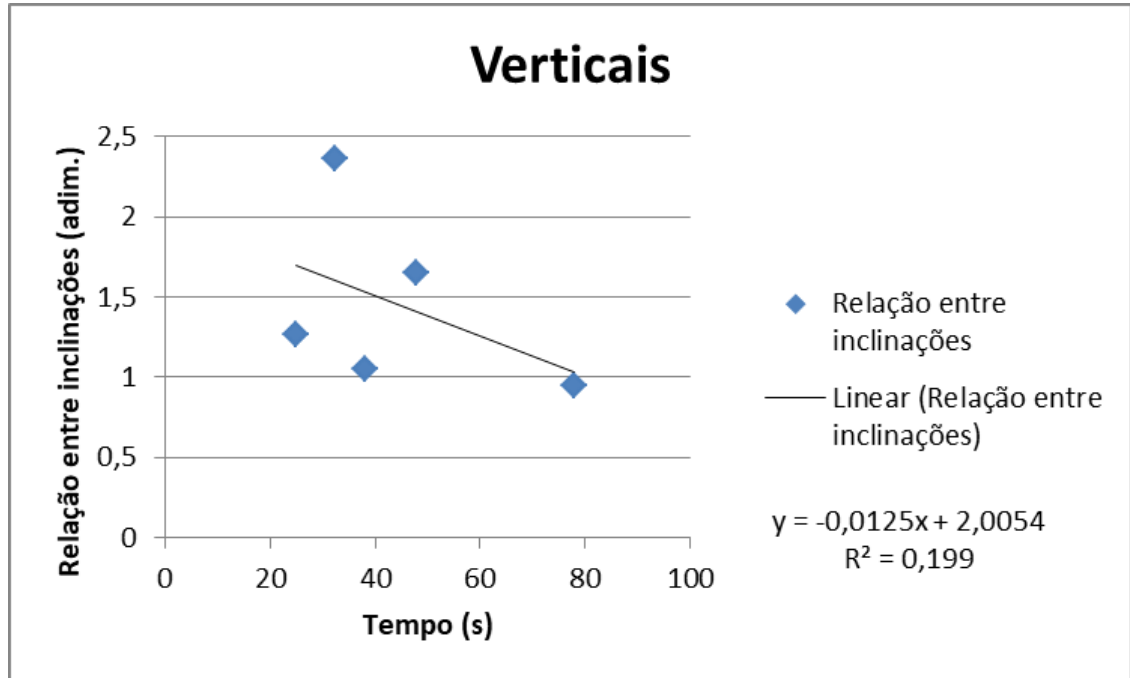
É possível destacar que as peças verticais não apresentaram fase plástica. A baixa adesão das camadas promove a ruptura do corpo de prova, antes mesmo dele apresentar deformação plástica. Já nas peças horizontais, o limite de escoamento é bem próximo do limite de resistência à tração, o que indica que a fase plástica é breve, e, o corpo de prova rompe pouco depois de se deformar permanentemente.

Pode-se dizer que a significativa diferença de valores entre as duas orientações indica claramente qual deveria o sentido de impressão dos filamentos. Ao testar as amostras verticais, os concentradores de tensão entre duas camadas distintas da peça e a baixa adesão destas, dão origem à falha muito mais rapidamente. Quando ensaiamos as peças horizontais, os filamentos tendem a se alinhar com a direção de tração e, só mais tarde, é que o material começa a falhar.

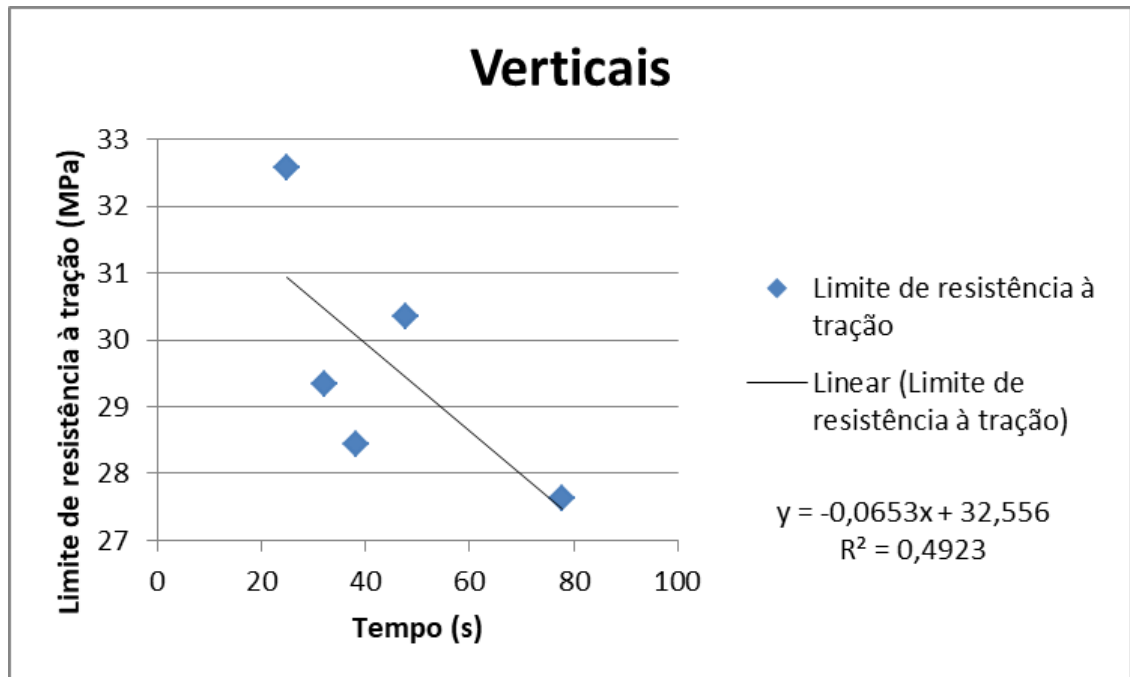
O polímero de impressão comporta-se de maneira semelhante à um material compósito. A orientação das “fibras” (filamentos, neste caso), interfere diretamente no resultado. Desta forma, ao que parece, a resistência mecânica da peça se eleva caso todos os filamentos sejam depositados alinhados à direção de tração.

Analizou-se, também, a influência do tempo necessário para a retirada do extensômetro. Para a análise, foram consideradas as hipóteses deste tempo modificar a

inclinação da curva tensão x deformação das peças, ou então, alterar o limite de resistência à tração das amostras.



**Figura 37 - Influência do tempo de retirada do extensômetro na mudança de inclinações das curvas tensão x deformação das peças verticais**



**Figura 38 - Influência do tempo de retirada do extensômetro no limite de resistência à tração das peças verticais**

Pelo que se pode notar, a relação entre os parâmetros (Figura 37 e Figura 38) é muito fraca e, portanto, não podemos dizer que este fator influencia nos resultados experimentais das peças verticais.

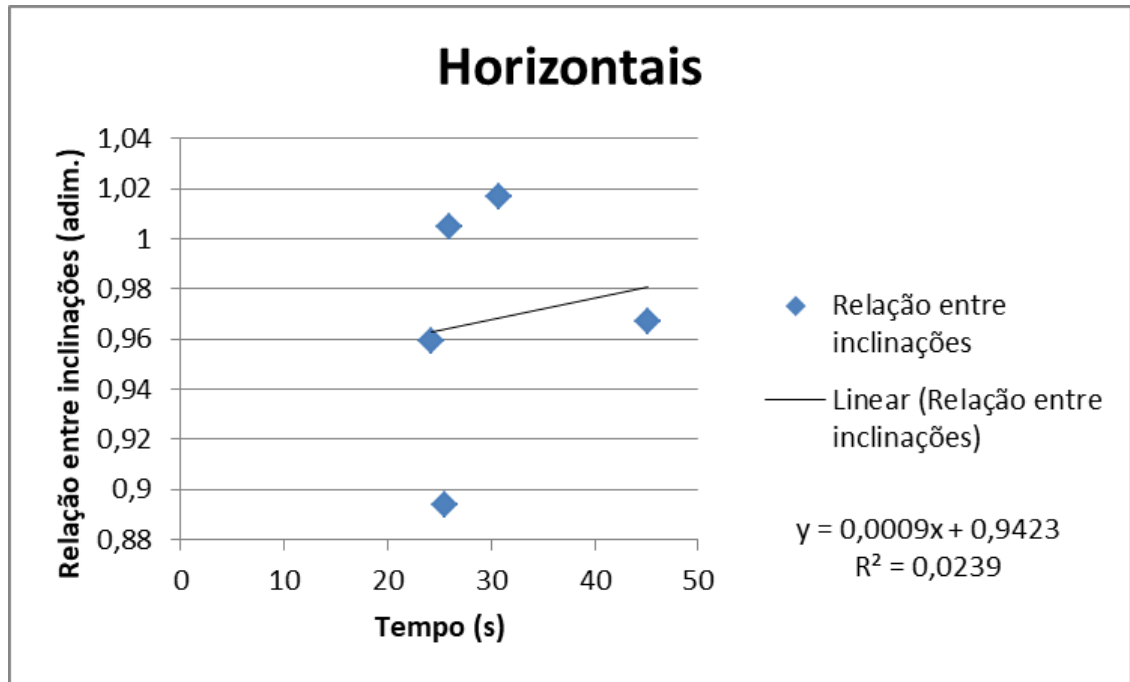


Figura 39 - Influência do tempo de retirada do extensômetro na mudança de inclinações das curvas tensão x deformação das peças horizontais

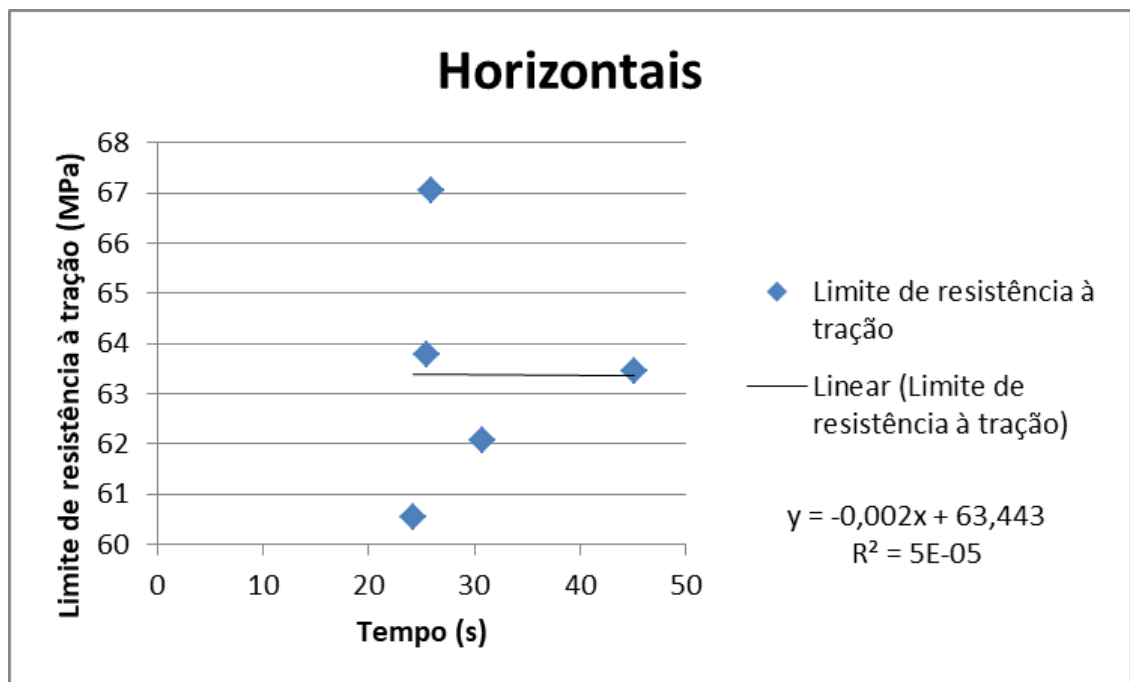


Figura 40 - Influência do tempo de retirada do extensômetro no limite de resistência à tração das peças horizontais

Semelhante ao conjunto de peças verticais, o das horizontais (Figura 39 e Figura 40) também não apresentou nenhuma correlação entre o tempo de retirada do extensômetro e os parâmetros analisados.

### 4.3 Síntese dos resultados

Em suma, os resultados indicam (Tabela 8) que os valores obtidos para o limite de resistência à tração estão próximos dos dados da literatura. Com exceção do valor do limite de resistência à tração fornecido pelo fabricante Stratasys para o filamento, todos os estudos estão relativamente próximos dos valores encontrados. Há variações de até 20% que podem ter sido influenciadas por parâmetros de impressão, material do filamento e pelo procedimento de ensaio de tração, que não são os mesmos para todos os autores.

Os valores do Módulo de Elasticidade (Tabela 9) foram bem discrepantes. A explicação talvez se dê por conta da construção do corpo de prova. Este deixa de se comportar como material puro e único para se comportar como compósito. Mudanças na própria estrutura e pequenos detalhes e variações podem fazer a diferença nos resultados.

**Tabela 8 - Dados comparativos para a orientação 0°**

	Módulo de Elasticidade (MPa)	std.	Limite de Resistência à Tração (MPa)	std.
<b>Dados Experimentais</b>	2578	190	63,38	1,65
<b>Letcher e Waytashek (2014)</b>	3604	29	64,03	0,93
<i>Dif %</i>	+ 39,80%		+ 1,03%	
<b>Castelo Branco e Martins (2016)</b>	651,2	15,74	60,05	1,20
<i>Dif %</i>	- 74,74%		- 5,25%	
<b>Jiang e Smith (2017)</b>	3300	95	52,20	1,51
<i>Dif %</i>	+ 28,01%	-	- 17,64%	
<b>Cordeiro (2014)</b>	3318	-	55,27	-
<i>Dif %</i>	+ 28,70%	-	- 12,80%	
<b>Martins et. al. (2018)</b>	-	-	50,73	-
<i>Dif %</i>	-	-	- 19,96%	
<b>Stratasys</b>	3038	-	48,00	-
<i>Dif %</i>	+ 17,84%	-	- 24,26%	-



Tabela 9 - Dados comparativos para a orientação de 90°

	Módulo de Elasticidade (MPa)	std.	Limite de Resistência à Tração (MPa)	std.
<b>Dados Experimentais</b>	1936	553	30,00	1,21
<b>Cordeiro (2014)</b>	3517	-	35,69	-
<i>Dif %</i>	+ 81,66%	-	+ 18,97%	-
<b>Koch, Hulle e Rudolph (2017)</b>	-	-	29,75	-
<i>Dif %</i>	-	-	- 0,83%	-

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSÕES**

O objetivo deste trabalho é verificar o comportamento mecânico de amostras impressas em PLA em diferentes orientações de impressão. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica dos métodos de impressão, das propriedades mecânicas e dos ensaios de tração.

Os resultados experimentais mostram que a resistência à tração das amostras impressas é próxima daquelas encontradas na literatura. No entanto, existem disparidades de até 20% em relação aos dados fornecidos pelo fabricante dos filamentos. Já em relação ao Módulo de Elasticidade, existem discrepâncias de até 74% nas amostras horizontais e de aproximadamente 82% na amostra vertical. Estas disparidades podem ser reflexo de parâmetros construtivos da amostra ou das condições de ensaio.

Além disso, comprovou-se a anisotropia da amostra. Amostras impressas em posição horizontal em relação à mesa de impressão suportam mais de duas vezes os valores de tensão em relação às peças produzidas verticalmente. Sendo assim, conclui-se que existem condições mais favoráveis na hora de parametrizar a impressão em relação à resistência a cargas.

Por fim, existem um grande potencial de estudo para compreender melhor os limites da manufatura aditiva pois, muitos trabalhos focam somente nos ensaios de tração em relação aos parâmetros de impressão. Trabalhos futuros devem focar em outros ensaios de propriedades mecânicas tais como: ensaio de dureza, de flexão, medição de rugosidade, etc. Para que os estudos sejam melhor estruturados, vale a pena utilizar de métodos estatísticos (ANOVA, Turkey, etc.) para melhor compreender os parâmetros influentes e verificar comportamentos correlacionados entre parâmetros de impressão e de propriedades dos materiais dos filamentos. Além disso, seria de extrema utilidade comparar outros métodos de impressão e quantificar a diferença de resistência mecânica de peças devido às peculiares destes processos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D638 – 10. “**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**”. ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/D0638-10.

BAKER, M. How to Eliminate Plastic Waste and Plastic Pollution with Science and Engineering. **Interesting Engineering**, 2018. Disponível em: <<https://interestingengineering.com/how-to-eliminate-plastic-waste-and-plastic-pollution-with-science-and-engineering>>

BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**. Hempstead, United States, 55, 155-162, Nov. 2011.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. In: **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** Atenas, Grécia, v. 83, p. 389-405, Jul. 2015. DOI 10.1007/s00170-015-7576-2

BRAGA, L. M. **Manufatura aditiva: uma análise de aplicações atuais**. 2017. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – PUC/RJ.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 5. ed. Salt Lake City: John Wiley & Sons, 2000. 620p.

CAMPBELL, T. et. al. **Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing**. In: Atlantic Council, October, 2011.

CASTELO BRANCO, R. R.; MARTINS, K. Y. N. Elaboração de protocolo de ensaios mecânicos para avaliação da performance do material PLA através da manufatura aditiva por meio do processo FDM. In: II CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM CIÊNCIAS, 2, 2016, Campina Grande. **V. 1, 2017, ISSN 2525-3999**

CORDEIRO, M. J. E. **Análise e otimização dos parâmetros processuais e dos sistemas funcionais de uma impressora 3D, que se baseia na técnica Deposição de Plástico Fundido (FDM)**. 2014. 86 f. Dissertação de Mestrado – Instituto Técnico de Lisboa.

DIZON, J. R. C. et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. In: **Additive Manufacturing**. United States. 20, 44-67, Jan. 2018.

FERNANDES, A. F. et al. **Supply Chain e o Impacto da Impressora 3D**. 2014. 82 f. Trabalho final de disciplina – Poli/ USP.

GEBLER, M.; UITERKAMP, A. J. M. S.; VISSER, S. A global sustainability perspective on 3D printing Technologies. In: **Energy Policy**. Groningen, Holanda, 74, 158-167, 2014.

GOEHRKE, S. A. 3D Printing Goes Ready to Wear as Danit Peleg's Bomber Jacket Becomes the First Commercially Available 3D Printed Garment. **3DPrint.com**, 2017. Disponível em: <<https://3dprint.com/182312/danit-peleg-3d-printed-jacket/>> Acesso em: 29 de set. de 2018.

JIANG, D.; SMITH, D. E. Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication. **Additive Manufacturing**. United States. 18, 84-94, Aug. 2017.

KIETZMANN, J.; PITT, L.; BERTHON, P. Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. **Business Horizons**. Waltham, United States, 58, 209-215, Nov. 2014.

KOCH, C.; HULLE, L. V.; RUDOLPH, N. Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation. **Additive Manufacturing**. Madison, United States, 16, 138-145, Jun. 2017.

LETCHER, T.; WAYTASHEK, M. Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer In: PROCEEDINGS OF THE ASME 2014 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION IMECE2014. Montreal, Quebec, Canada, Nov. 2014.

LISTEK, V. Bioprinting for Regenerative Medicine at Wake Forest. 3Dprint.com, 2019. Disponível em: <<https://3dprint.com/242602/dr-anthony-atala-explains-the-frontiers-of-bioprinting-for-regenerative-medicine-at-wake-forest/>> Acesso em: 20 de jun. de 2019

MARTINS, O. A. et al. Influência da orientação de deposição e do tipo de material polimérico na resistência mecânica de peças produzidas por impressão 3D In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 23, 2018, Foz do Iguaçu.

MUNIZ, G. B. Pegamos carona no strati, o primeiro carro feito em impressora 3D do mundo. **Auto Esporte**, 2015. Disponível em: <<https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2015/04/pegamos-carona-no-strati-o-primeiro-carro-3d-do-mundo.html>> Acesso em: 15 de nov. de 2018.

NORTON, R. L. **Machine Design**. 4. ed. Mattapoisett: Pearson Education, 2011. 1055p.

RANEY, K.; LANI, E.; KALLA, D. K. Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process. **Materials Today: Proceedings**. Denver, v. 4, n. 8, p. 7956-7961, 2017.

RENNICK, L. From pixels to printer to plate - this is how multinational 3D printing restaurant Food Ink cooks and serves your food. **SBS**, 2018. Disponível em: <<https://www.sbs.com.au/food/article/2018/02/12/are-you-ready-eat-worlds-first-3d-printed-restaurant>> Acesso em: 31 de set. 2018.

SHEEHAN, S. World's first 3D printed car due on roads in 2019. **Auto Car**, 2018. Disponível em: <<https://www.autocar.co.uk/car-news/motor-shows-beijing-motor-show/world%E2%80%99s-first-3d-printed-car-due-roads-2019>> Acesso em: 31 de set. 2018.

SHIGLEY, J. E. **Mechanical Engineering Design**. 7. Ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2004. 957p.

SOUZA, M. É mais barato: falta muito para nossa casa ser feita com uma impressora 3D? **UOL**, 2019. Disponível em <<https://noticias.uol.com.br/tecnologia/noticias/redacao/2019/05/22/a-sua-proxima-casa-pode-ser-construida-por-uma-impressora-3d.htm>> Acesso em: 20 de jun. de 2019.

STRATASYS Specific DataSheet, 2017. Disponível em: <[https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss\\_fdm\\_pla\\_0118a.pdf](https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_pla_0118a.pdf)> Acesso em: 30 de jun. de 2019

THOMASSON, E.; MICHALSKA, A. Adidas to mass-produce 3D-printed shoe with Silicon Valley start-up. **Reuters**, 2017. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 29 de set. de 2018.