

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

TIAGO CASAGRANDE

INFLUÊNCIA DA COR NO POLI (ÁCIDO LÁTICO) EM PEÇAS OBTIDAS PELO
PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

Joinville

2018

TIAGO CASAGRANDE

INFLUÊNCIA DA COR NO POLI (ÁCIDO LÁTICO) EM PEÇAS OBTIDAS PELO
PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Carlos Maurício Sacchelli

Joinville

2018

TIAGO CASAGRANDE

INFLUÊNCIA DA COR NO POLI (ÁCIDO LÁTICO) EM PEÇAS OBTIDAS PELO
PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Mauricio Sacchelli
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Sueli Fischer Beckert
Professora
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Professor
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Alcionir Casagrande e Iraci Loffi Casagrande, e minha irmã Caroline Casagrande, por toda educação, carinho e apoio incondicional.

A minha noiva Julia Boing da Rocha, por toda ajuda, amor e companheirismo.

A meu orientador Dr. Carlos Maurício Sacchelli pela atenção e dedicação, que ajudaram a fazer esse trabalho possível.

Aos demais professores que de alguma forma contribuíram para meu desenvolvimento tanto pessoal quanto profissional.

A Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade a mim concedida, aos meus amigos de classe e a todos que me apoiaram.

RESUMO

A manufatura aditiva é uma tecnologia que permite a fabricação de peças diretamente de um modelo 3D desenhado com auxílio do computador, sem a necessidade de muitos processos intermediários. Pode ser considerada um processo relativamente novo, que só nos últimos anos tornou-se de fácil acesso a população com o surgimento de impressoras menores e mais baratas, chamadas de impressoras de mesa. Hoje muitos tipos de materiais estão disponíveis para uso na impressão 3D, sendo um dos mais utilizado o Poli (Ácido Lático) (PLA), devido ao seu preço e facilidade de utilização. Como as impressoras de mesa possibilitam que o usuário possa escolher os parâmetros de fabricação, existem muitas variáveis no processo que podem influenciar nas propriedades mecânicas e que necessitam de maiores estudos. Desta maneira, este trabalho apresenta um estudo abordando a resistência a tração do PLA, utilizando cores diferentes em diferentes temperaturas. Para a realização do trabalho, produziu-se corpos de provas, pelo processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), nas cores preto e amarelo em três temperaturas de impressão, 200°C, 210°C e 215°C. Realizou-se um ensaio de tração seguindo a norma ASTM D638 e depois examinou-se a cristalinidade através de um ensaio de DRX. Com base nos resultados obtidos evidenciou-se que a temperatura de impressão e a cor da matéria prima são fatores que influenciam na resistência a tração e a porcentagem cristalina.

Palavras-chave: Cristalinidade; PLA; FDM; Impressão 3D; Resistência a tração.

ABSTRACT

Additive manufacturing is a technology that allows the fabrication of physical models directly from a computer-aided 3D model, without the need for many intermediate processes. It can be considered a relatively new process, which only in recent years has become easily accessible to the population with the emergence of smaller and cheaper printers, called desktop printers. Today many types of materials are available for use in 3D printing, being one of the most widely used Polylactic Acid (PLA) because of its price and ease of use. Because desktop printers allow the user to choose manufacturing parameters, there are many process variables that can influence mechanical properties and require further study. In this way, this work presents a study addressing the tensile strength of PLA, using different colors at different temperatures. For the accomplishment of the work, test bodies were produced, by the process of Fusion Deposition Modeling (FDM), in black and yellow colors in three printing temperatures, 200 ° C, 210 ° C and 215 ° C. A tensile test was performed following ASTM D638 and then the crystallinity was examined by a x-ray diffraction (XRD). The results show a strong relationship between the tensile strength and the crystalline percentage with the printing temperature and color of the raw material.

Key-words: Crystallinity; PLA; FDM; 3D printing; Tensile strength.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Modelo CAD fatiado..... | 14 |
| Figura 2 – Máquina SLS..... | 16 |
| Figura 3 – Processo LENS..... | 17 |
| Figura 4 – Máquina SLA..... | 19 |
| Figura 5 – Máquina “Polyjet”..... | 20 |
| Figura 6 – Máquina LOM..... | 21 |
| Figura 7 – Máquina FDM..... | 22 |
| Figura 8 – Máquina com dois bicos de extrusão..... | 25 |
| Figura 9 – Máquina com um bico extrusor..... | 25 |
| Figura 10 – Perfil do ABS..... | 26 |
| Figura 11 – Perfil do PLA..... | 27 |
| Figura 12 – Parâmetros de construção..... | 29 |
| Figura 13 – Orientação de construção..... | 29 |
| Figura 14 – Estratégias de preenchimento..... | 30 |
| Figura 15 – Porcentagens de preenchimento..... | 32 |
| Figura 16 – Regiões amorfas e cristalinas..... | 35 |
| Figura 17 – Impressora de mesa 3DCloner DH..... | 34 |
| Figura 18 – Corpo de prova padrão..... | 35 |
| Figura 19 – CP’s para ensaio de tração..... | 35 |
| Figura 20 – CP’s para ensaio por DRX..... | 36 |
| Figura 21 – Máquina para ensaio de tração..... | 39 |
| Figura 22 – Máquina de DRX Siemens D5005..... | 39 |
| Figura 23 – Média das tensões máximas..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 – Média das tensões de escoamento..... | 43 |
| Figura 25 – Média da deformação antes da quebra..... | 44 |
| Figura 26 – Entrada Minitab®..... | 45 |
| Figura 27 – Interação dos fatores para tensão máxima..... | 46 |
| Figura 28 – Efeitos principais para tensão máxima..... | 46 |
| Figura 29 – Normalização dos efeitos..... | 47 |
| Figura 30 – Difrátogramas amarelo..... | 48 |
| Figura 31 – Difrátogramas preto..... | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Classificação dos processos de MA..... | 15 |
| Tabela 2 – Resumo SLS..... | 17 |
| Tabela 3 – Resumo LENS..... | 18 |
| Tabela 4 – Resumo SLA..... | 19 |
| Tabela 5 – Resumo “PolyJet”. | 20 |
| Tabela 6 – Resumo LOM..... | 22 |
| Tabela 7 – Resumo FDM..... | 23 |
| Tabela 8 – Comparação ABS x PLA..... | 28 |
| Tabela 9 – Combinação das amostras..... | 37 |
| Tabela 10 – Parâmetros fixos..... | 37 |
| Tabela 11 – Resultado pré-estudo..... | 40 |
| Tabela 12 - Referência das amostras..... | 41 |
| Tabela 13 – Tensão Máxima..... | 42 |
| Tabela 14 – Tensão de escoamento..... | 43 |
| Tabela 15 – Deformação antes da quebra..... | 44 |
| Tabela 16 – Porcentagem cristalina das amostras..... | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno
ALC – Automotive Learning Center
APME – Association of Plastic Manufactures in Europe
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAD – Desenho auxiliado por computador
CP – Corpos de prova
DOE – Planejamento de Experimentos
DP – Densidade de preenchimento
DQ – Deformação antes da quebra
DRX – Difração de raio-x
EC – Espessura da camada
FDM – Modelagem por Fusão e Deposição
IJP – Impressão a jato de tinta “PolyJet”
LATECME – Laboratório de Caracterização Mecânica
LCE – Laboratório de caracterização estrutural
LENS – *Laser Engineering Net-Shape*
LiD – Laboratorio de inovação e desenvolvimento de produtos e processos
LOM – *Laminated Object Manufacturing*
MA – Manufatura Aditiva
NC – Número de camadas
NP – Número de perímetros
PLA – Ácido polilático
PR – Prototipagem Rapida
SLA – *Stereolithography Apparatus*
SLS – Selective Laser Sintering
SPE – Society of Plastic Engineers
TE – Tensão de escoamento
TM – Tensão máxima
UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos
VD – Velocidade de deposição

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS..... | 13 |
| 2. MANUFATURA ADITIVA..... | 14 |
| 2.1 PRINCIPAIS PROCESSOS..... | 15 |
| 2.1.1 Processos baseados em pó..... | 15 |
| 2.1.1.1 <u>Sinterização Seletiva a Laser</u> | 15 |
| 2.1.1.2 <u>Fabricação da forma final a Laser</u> | 17 |
| 2.1.2 Processos baseados em líquido..... | 18 |
| 2.1.2.1 <u>Estereolitografia</u> | 18 |
| 2.1.2.2 <u>Impressão a jato de tinta “PolyJet”</u> | 19 |
| 2.1.3 Processos Sólidos..... | 21 |
| 2.1.3.1 <u>Manufatura Laminar de Objetos</u> | 21 |
| 2.1.3.2 <u>Processo de Modelagem por Fusão e Deposição</u> | 22 |
| 2.2 PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO..... | 23 |
| 2.2.1 Máquinas Industriais e de Mesa..... | 23 |
| 2.2.2 Bicos de Extrusão..... | 24 |
| 2.2.3 Materiais utilizados no processo FDM..... | 25 |
| 2.2.3.1 <u>ABS</u> | 25 |
| 2.2.3.2 <u>PLA</u> | 26 |
| 2.2.4 Parâmetros de fabricação..... | 28 |
| 2.2.4.1 <u>Orientação de construção</u> | 29 |
| 2.2.4.2 <u>Espessura da camada</u> | 30 |
| 2.2.4.3 <u>Ângulo de varredura</u> | 30 |
| 2.2.4.4 <u>Número de contornos</u> | 31 |
| 2.2.4.5 <u>Largura de varredura e de contorno</u> | 31 |
| 2.2.4.6 <u>Porcentagem de preenchimento</u> | 31 |
| 2.2.4.7 <u>Velocidade de extrusão</u> | 32 |
| 2.2.4.8 <u>Temperatura de extrusão</u> | 32 |
| 2.2.4.9 <u>Cor do filamento</u> | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 3 METODOLOGIA..... | 34 |
| 3.1 PARÂMETROS DE PROCESSO FIXOS..... | 36 |
| 3.2 PARÂMETROS DE PROCESSO VARIÁVEIS..... | 37 |
| 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO..... | 38 |
| 3.4 OBTENÇÃO DA CRISTALINIDADE..... | 39 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 40 |
| 4.1 PRÉ-ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS FIXOS..... | 40 |
| 4.2 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS CORES E DA TEMPERATURA..... | 41 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 51 |
| REFERÊNCIAS..... | 53 |

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia que tem o propósito de não utilizar a retirada de material durante a manufatura, logo, a quantidade de resíduos é significativamente reduzida. Segundo Volpato et al. (2007) este processo consiste na construção pela sobreposição de camadas subsequentes de material.

A Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) é um dos processos de MA mais utilizados devido ao baixo custo e fácil implantação.

Esse processo é baseado em matéria prima sólida, podendo estar na forma mais usual de filamento. Durante a moldagem, a resina termoplástica é aquecida e extrusada a partir de um bico extrusor que se move em um plano X-Y. A cada camada concluída a base se move no eixo Z e uma nova camada é depositada, a repetição desse processo resulta em um produto final tridimensional (VOLPATO et al., 2007)

As máquinas de FDM são divididas em dois tipos, a industriais, que são maiores, mais robustas e mais caras, e as de mesa, que são menores e devido ao grande aumento de popularidade nos últimos anos teve seu preço reduzido, facilitando cada vez mais o seu acesso (ALKAIOS, 2017). Os fabricantes das máquinas de mesa não estabelecem parâmetros fixos de fabricação, deixando a critério do usuário a escolha dos mesmos. Esse fator alinhado a grande popularidade das máquinas traz uma demanda de estudo de como escolher esses parâmetros da melhor maneira possível e de possíveis influencias nas propriedades mecânicas das peças obtidas.

Atualmente existem vários materiais disponíveis para uso na impressão de mesa, incluindo ABS, Nylon, Policarbonato, PLA e outros. O PLA surgiu como um dos favoritos devido a seu baixo ponto de fusão, requerendo menos energia para imprimir o material, além de ser mais seguro que o ABS por não ser tóxico (HUNT et al., 2015).

Inicialmente a MA era utilizada na produção rápida de protótipos, sem se preocupar com as características mecânicas das peças, porém nos últimos anos esse processo tem sido aperfeiçoado e começou a ser utilizado para criação de produtos finais, gerando uma demanda pelo conhecimento das variáveis de processo para a obtenção das características mecânicas desejadas (VOLPATO et al., 2007).

Com a grande popularidade das máquinas de mesa, facilitou-se a pesquisa devido as máquinas e materiais estarem mais baratos e segundo Tymrak et al. (2014), embora as impressoras de mesa possam apresentar resultados de resistência a tração superiores as impressoras comerciais, podem haver inconsistências fazendo com que os resultados variem devido a diversas condições de impressão e parte dessa variação pode ser devido a cor do filamento, por isso, neste trabalho será analisada a influência da cor e da temperatura de extrusão nas propriedades mecânicas dos produtos obtidos pela MA.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo principal desse estudo é analisar a influência da cor e da temperatura de impressão na resistência a tração das peças de PLA obtidas pelo processo FDM. Tendo como objetivos específicos:

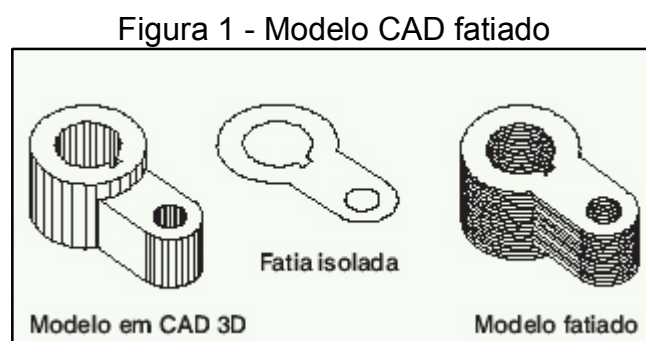
- Medir as propriedades mecânicas dos corpo de prova preparados a partir dos pré estudos.
- Identificar quais os valores de processo para um maior resultado na resistência a tração.
- Otimizar as condições para melhores propriedades mecânicas através do Planejamento de Experimentos (DOE).

2 MANUFATURA ADITIVA

Para Volpato et al. (2007) os processos de fabricação mecânicos normalmente são separados em grupos, os derivados da fusão, (ex. fundições de metais em moldes, moldagem por injeção de plástico), os da remoção do material (ex. torneamento, fresamento, usinagem, etc.), os da conformação (ex. forjamento, conformação metalurgia do pó, etc.) e os da adição de material (ex. soldagem, colagem, etc.). Ainda segundo Volpato et al. (2007) no fim dos anos 80, um novo processo de adição foi criado, tendo como base a adição de camadas planas, possuindo um grande diferencial em relação aos demais processos existentes, que era a sua capacidade de automação e a não necessidade da utilização de moldes e ferramentas. Esse processo foi chamado de prototipagem rápida (PR).

Contudo, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), começou a usar o termo Manufatura Aditiva (MA) a partir da norma F2792 (2010), para produtos obtidos pela adição de materiais por camadas.

Segundo Liou (2007), a manufatura aditiva é um processo de prototipagem rápida de fabricação de forma livre, que permite ao usuário a fabricação da peça real apenas com um modelo de Desenho Auxiliado por Computador (CAD), esse desenho tridimensional, através de um software específico, é dividido em diversas camadas, Figura 1, e a peça é construída camada a camada sem a necessidade de outras ferramentas específicas.



Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

Os processos de MA e suas variações são tantas que foram classificados em vários tipos diferentes (UPCRAFT; FLETCHER, 2003). Porém segundo Silva e Kamienski (2007), seis desses processos podem ser destacados como sendo os principais, devido a tecnologia e a disponibilidade no mercado nacional, e ainda podem ser divididos em três grandes grupos, conforme representado na Tabela 1.

A classificação dos grupos é baseada no estado inicial da matéria-prima, que pode ser pó, líquido ou sólido.

Tabela 1 – Classificação dos processos de MA

| Baseados em pó | Baseados em líquido | Baseados em sólido |
|--|--|---------------------------------------|
| Sinterização seletiva a laser (SLS) | Estereolitografia (SLA) | Manufatura Iminar de objetos (LOM) |
| Fabricação de forma final a laser (LENS) | Impressão a jato tinta “PolyJet” (IJP) | Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) |

Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

2.1 PRINCIPAIS PROCESSOS

Será abordado neste tópico os principais tipos de MA disponíveis e usuais no mercado.

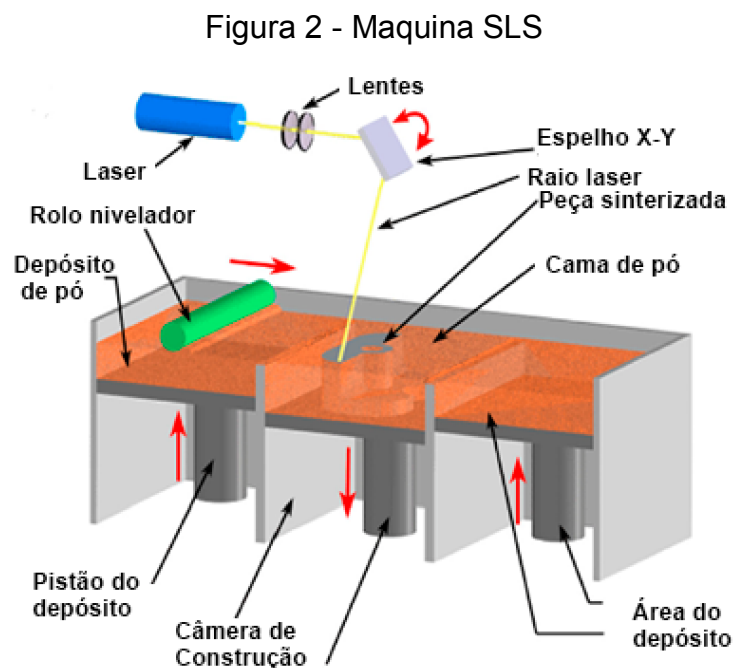
2.1.1 Processos baseados em pó

Nesse grupo a matéria prima utilizada encontra-se na forma de pó. Devido a esse fato uma grande variedade de materiais pode ser utilizada, tendo uma disponibilidade superior à dos outros grupos. (VOLPATO et al., 2007).

2.1.1.1 Sinterização Seletiva a Laser

A sinterização seletiva a laser ou *Selective Laser Sintering* (SLS), foi desenvolvida e patenteada pela Universidade do Texas, EUA, tendo sua comercialização realizada pela empresa DTM Corporation, fundada em 1987 para esse único objetivo de acordo com Volpato et al. (2007).

Volpato et al. (2007) explicam que o processo de SLS utiliza um laser para sinterizar a matéria prima que está na forma de pó. O processo tem início com o material sendo nivelado em uma câmara com auxílio de um rolo, essa câmara tem sua temperatura e atmosfera controladas, ficando um pouco abaixo do ponto de fusão do material utilizado. Um sistema de feixe de laser desloca-se sobre a superfície do material espalhado, fornecendo a energia restante para que ocorra sinterização do material. Logo após a plataforma desce no eixo Z, um incremento igual a espessura de camada definida anteriormente pelo CAD fatiado, uma nova camada de pó é espalhada sobre a anterior e o processo se repete. Por fim o pó não sinterizado é removido e pode ser usado novamente. Um desenho esquemático da máquina e seu funcionamento é representado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de Chang e Long (2011).

A construção de peças com material na forma de pó resulta em um acabamento superficial áspero e poroso. Porém um dos grandes problemas desse processo é o encolhimento, a parte sinterizada geralmente tem menor volume do que a parte não sinterizada, gerando vazios que não podem ser removidos completamente. (VOLPATO et al., 2007)

A Tabela 2 resume as principais vantagens e desvantagens do processo SLS.

Tabela 2 – Resumo SLS

| Vantagens | Desvantagens |
|---|---|
| Utilização de vários materiais | Custo Elevado do equipamento |
| Fabricação de múltiplas peças simultaneamente | Consumo elevado de energia devido ao laser |
| Não necessita de pós-cura | Não é adequada para ambientes de escritório |

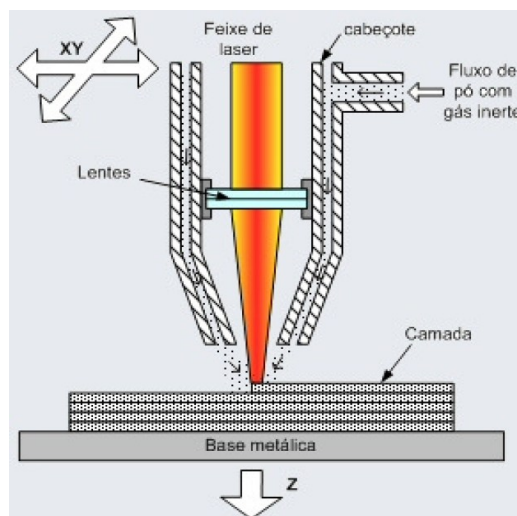
Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

2.1.1.2 Fabricação da forma final a laser

O processo de fabricação da forma final a laser ou *Laser Engineering Net-Shape* (LENS), foi desenvolvido no final dos anos noventa e apresenta um grande potencial para obtenção de peças complexas metálicas. (Volpato et al., 2007).

Segundo Parollas (2013), o processo em si é baseado na adição através de fusão de partículas que são lançadas sobre um potente feixe de laser, que funde as partículas formando as camadas desejadas, gerando peças com baixa porosidade mas com precisão dimensional pequena. Ainda segundo Volpato et al. (2007) a mesa das máquinas permitem movimentos de rotação e inclinação, permitindo a fabricação de vários detalhes sem a necessidade de suportes. A Figura 3 mostra uma simplificação de um processo de LENS.

Figura 3 – Processo de LENS



Fonte: Parollas (2013).

A Tabela 3 resume as principais vantagens e desvantagens do processo LENS.

Tabela 3 – Resumo LENS

| Vantagens | Desvantagens |
|--|--|
| Não necessita de suportes | Custo Elevado do equipamento |
| Obtenção de material denso e com alta qualidade mecânica | Consumo elevado de energia devido ao laser |
| Não necessita de pós-cura | Acabamento superficial não muito bom |

Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007) e Liou (2007).

2.1.2 Processos baseados em líquido

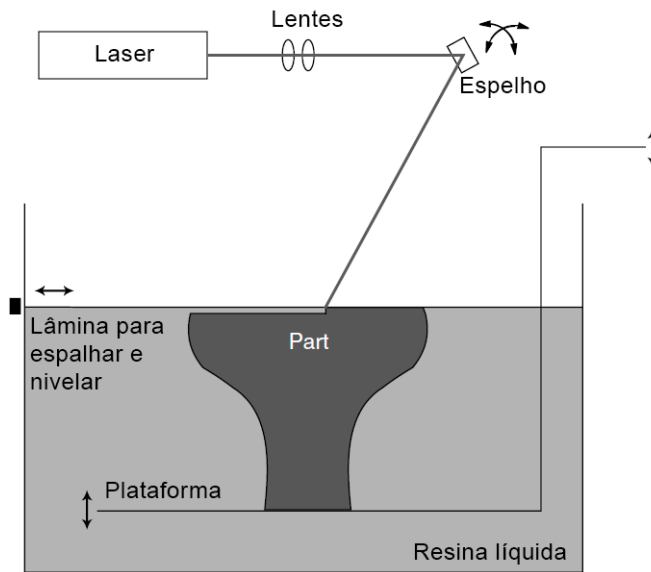
Nesse grupo a matéria prima utilizada encontra-se na forma de líquido. Devido a esse fato uma grande variedade de materiais pode ser utilizada, tendo uma disponibilidade superior a dos outros grupos. (VOLPATO et al., 2007).

2.1.2.1 Estereolitografia

Patenteada em 1986, a Estereolitografia ou *Stereolithography Apparatus* (SLA) foi o começo da revolução da manufatura aditiva. (LIU, 2007).

O princípio do processo é a solidificação de uma resina fotossensível utilizando um laser UV camada a camada até o objeto 3D ficar pronto. Na Figura 4, tem-se o esquema de como funciona uma máquina SLA, consiste em uma plataforma que se move para baixo assim que cada camada é formada no tanque contendo a resina, para a formação das camadas o laser se move no plano X-Y, similar aos outros processos já descritos.

Figura 4 – Máquina SLA



Fonte: Adaptado de Liou (2007).

A Tabela 4 resume as principais vantagens e desvantagens do processo SLA.

Tabela 4 – Resumo SLA

| Vantagens | Desvantagens |
|--|--|
| Alta resolução | Resina Tóxica |
| Suporte e assistência em grande parte dos países | Necessidade de uma pós-cura para cara garantir a qualidade estrutural |
| Considerada uma das melhores qualidades superficiais dos processos de MA | Necessidade de suportes para regiões não conectadas, utilizando a mesma resina da peça |

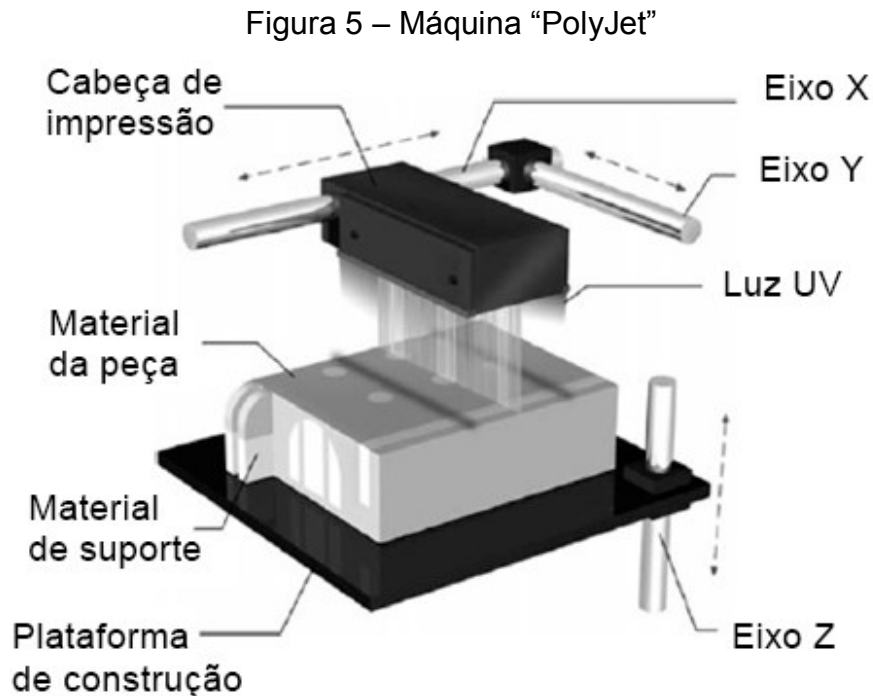
Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007) e Liou (2007).

2.1.2.2 Impressão a jato de tinta "PolyJet"

A tecnologia de impressão jato de tinta "PolyJet" foi desenvolvida por uma empresa fundada em 1998. Semelhante ao processo de SLA, essa tecnologia também trabalha com resinas foto-curáveis (VOLPATO et al. 2007).

Como mostrado na Figura 5, neste processo, a cabeça de impressão se move ao longo do eixo X-Y depositando uma camada muito fina de foto-polímero, logo a deposição da cama uma luz ultravioleta, curando e endurecendo essa camada, eliminando assim a necessidade de pós-cura como no SLA. A plataforma de

construção se move no eixo Z e o processo se repete até que a peça esteja pronta (LIOU, 2007).



Fonte: Adaptado de Liou (2007).

A Tabela 5 resume as principais vantagens e desvantagens do processo “PolyJet”.

Tabela 5 – Resumo PolyJet

| Vantagens | Desvantagens |
|---|--|
| Não utiliza Laser | Poucos materiais disponíveis |
| Ótima precisão e qualidade superficial | Pós processamento para remover suportes |
| Não precisa de um processo pós-cura da resina | Necessidade de suportes para regiões não conectadas. |

Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007) e Liou (2007).

2.1.3 Processos Sólidos

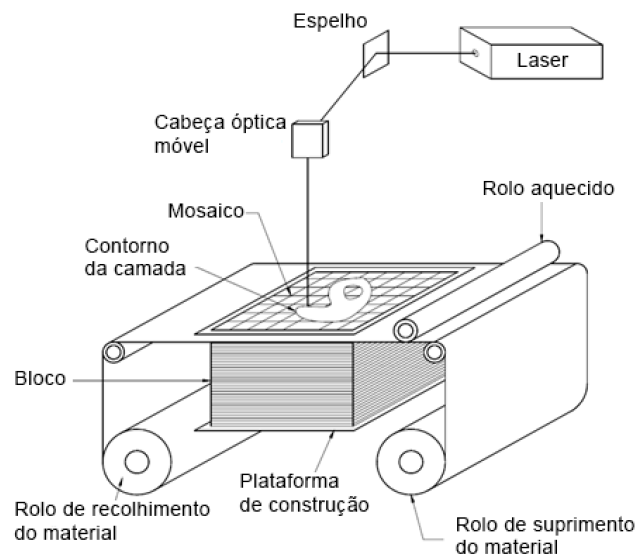
Os métodos de fabricação baseados em sólidos começam com materiais que são mais comum na forma de filamento, folha, rolos ou nenhuma forma específica já que serão fundidos quando forem depositados. (CHANG; LONG, 2011)

2.1.3.1 Manufatura Laminar de Objetos

Segundo Volpato et al. (2007) a Manufatura Laminar de Objetos ou *Laminated Object Manufacturing* (LOM) baseia-se na disposição de folhas de material com adesivo em um dos lados para compor as camadas da peças a ser construída, observado na Figura 6. Após essa etapa um rolo aquecido desliza sobre a superfície com intuito de ativar o adesivo para unir-se a parte inferior, logo após um feixe de laser CO2 em um deslocamento X-Y corta o perfil da peça na camada atual e fatia o resto do material, que não faz parte da peça, em pequenos pedaços para facilitar sua remoção no fim do processo. A plataforma se move em Z e uma nova folha de material é disposta sobre a peça, o processo se repete até o que a peça esteja pronta.

Uma característica da LOM é o fato de não existir nenhuma transformação de fase, física ou química, permitindo a interrupção do construção da peça e sua reinicialização sem afetar a qualidade da mesma.

Figura 6 – Máquina LOM



Fonte: Adaptado de Liou (2007).

A Tabela 6 resume as principais vantagens e desvantagens do processo LOM.

Tabela 6 – Resumo LOM

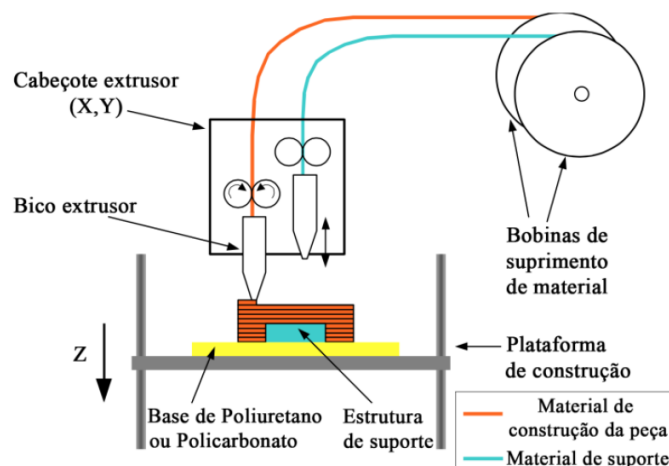
| Vantagens | Desvantagens |
|--|---|
| Velocidade do processo | Poucos materiais disponíveis |
| Não necessita de uma processo de pós-cura | Material não é flexível, dificultando uso em algumas aplicações |
| Não precisa de suporte em regiões não conectadas | Não indicado para obtenção de pequenos detalhes |

Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

2.1.3.2 Modelagem por Fusão e Deposição

Segundo Volpato et al., (2007) na Modelagem por Fusão e Deposição ou *Fusion Deposition Modeling* (FDM), a matéria prima, um termoplástico, encontra-se na forma de filamentos enrolados em uma bobina. Como representado na Figura 7, um par de polias traciona o filamento da bobina e empurra-o por um canal aquecido, até atingir um estado semi-líquido ou pastoso. O material nessa forma é expulso através de um bico extrusor de diâmetro bem definido. O cabeçote extrusor, onde se encontra o bico, se move nos eixos X e Y, depositando o filamento extrudado no plano atual, entrando em contato com superfície da peça, solidificando e aderindo a camada anterior. Após a camada estar completa a mesa se move no eixo Z e o processo se repete.

Figura 7 – Máquina FDM



Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

A Tabela 7, identifica as principais vantagens e desvantagens do processo de FDM.

Tabela 7 – Resumo FDM

| Vantagens | Desvantagens |
|---|--|
| Não utiliza laser | Muitos parâmetros de fabricação |
| Não necessita de uma processo de pós-cura | Poucos materiais disponíveis, resumindo-se a resinas poliméricas |
| Boa qualidade superficial | Necessidade de suportes para regiões não conectadas. |

Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

2.2 PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

Como este processo é o foco do presente trabalho, possui uma descrição mais detalhada do seu funcionamento assim como uma explicação mais detalhada das variáveis de fabricação.

2.2.1 Máquinas Industriais e de Mesa

Quando se aborda o tema de máquinas de FDM, pode-se separá-las em dois grupos, as máquinas industriais e as máquinas de mesa. O processo de funcionamento de ambas são muito semelhantes, porém a diferença entre elas está na capacidade. As máquinas industriais são maiores, significando que podem completar impressões maiores mais rapidamente, por serem maiores também podem produzir peças maiores ou vários modelos ao mesmo tempo (ALKAIOS, 2017)

Ainda segundo Alkaios, (2017) outra diferença chave entre os dois tipos está associado ao custo. Devido ao grande aumento da popularidade das impressoras de mesa nos últimos anos, houve uma enorme redução no custo para se obter uma impressora, como no custo e disponibilidade das matérias primas utilizadas, especialmente o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Poli Ácido Lático (PLA).

Os fabricantes dos equipamentos industriais disponibilizam configurações de impressão fechadas, sem possibilidades de alterar parâmetros de processo, pois

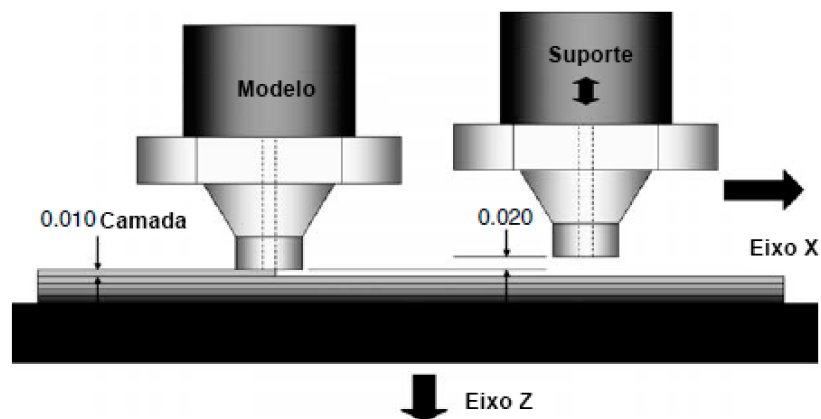
estes são determinados automaticamente, buscando a melhor qualidade possível com dados previamente determinado por estudos feitos pelo fabricante.

Já nas impressoras de mesa o fabricante disponibiliza muitas vezes softwares abertos, onde é possível definir os parâmetros de impressão, o que requer um conhecimento da tecnologia, a fim de combinar as diversas opções disponível da melhor forma possível (BASICS..., 2017)

2.2.2 Bicos de extrusão

Algumas máquinas possuem um segundo bico extrusor, Figura 8, para a extrusão de materiais diferentes, utilizado na construção de suportes. O suporte é necessário para construção de camadas que não estão conectadas ao material já impresso. Nesses tipos de impressora podem haver dois tipos diferentes de matérias para suporte, no primeiro o material é frágil e de fácil remoção devendo ser retirado manualmente ao final do processo, o segundo é mais recente e é um material que pode ser removido quando imerso em uma solução líquida aquecida (VOLPATO et al., 2007).

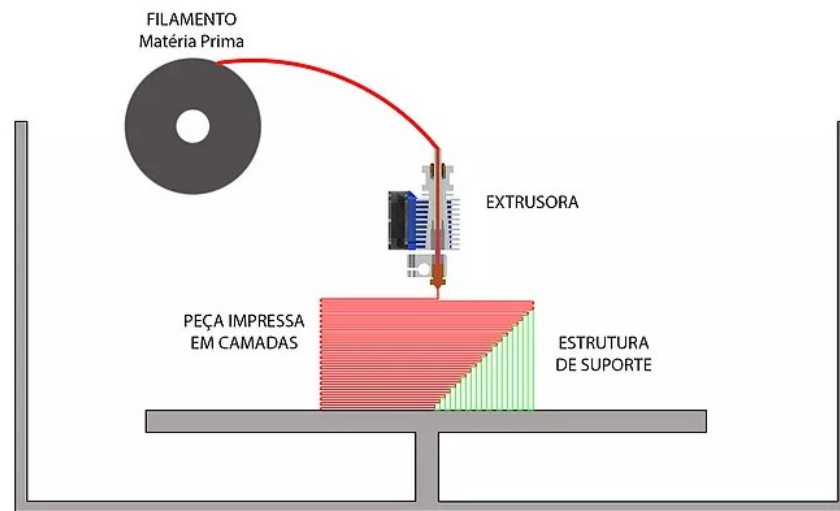
Figura 8 – Máquina com dois bicos de extrusão



Fonte: Liou (2007).

Em outras máquinas entretanto, como no caso da maioria das máquinas de mesa, só existe um bico de extrusão (Figura 9) e na necessidade de criação de um suporte a máquina utiliza o próprio material, porém com uma configuração de forma que ele fique frágil e seja facilmente removido ao fim do processo de forma manual.

Figura 9 – Máquina com um bico extrusor



Fonte: Adaptado de Alkaios (2017).

2.2.3 Materiais utilizados no processo FDM

Segundo Rohringer (2018) os tipos de filamentos mais comuns utilizados na FDM em máquinas de baixo custo são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Ácido polilático (PLA), devido a ambos serem termoplásticos acessíveis aos usuários de máquinas de impressão FDM.

2.2.3.1 ABS

O ABS é um termoplástico amorfo derivado do petróleo, é conhecido por suas características de engenharia com boas propriedades mecânicas e por ter aplicações em várias áreas industriais e domésticas, por esses fatores foi o primeiro material utilizado em grande escala nas impressoras FDM de baixo custo. (ALBUQUERQUE, 2014).

Segundo Salinas (2014) os filamentos de ABS tem duas características ideais para fabricação de componentes mecânicos, são flexíveis e resistentes, as peças também possuem boas propriedades pós processo, podendo ser lixadas, coladas e pintadas.

A temperatura média quando utilizado na impressão 3D é de 225°C, mas pode variar de acordo com o fabricante, devido ao ABS ter uma tendência a empenar recomenda-se a utilização de uma mesa aquecida com uma temperatura máxima de

120°C, no entanto, o ABS quando aquecido libera monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, que apesar de serem toleráveis, podem ser tóxicos em altas quantidades. (SALINAS, 2014).

Segundo a Alkaios (2017), o perfil do ABS na impressão 3D é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Perfil do ABS



Fonte: Adaptado de Alkaios (2017).

O ABS é escolhido no lugar do PLA quando é necessário maior resistência a abrasão e maior resistência ao impacto, que são dois pontos onde o ABS se destaca. A resistência a abrasão se refere a temperatura máxima suportável antes da peça amolecer e deformar e a resistência ao impacto se refere a energia necessária para quebrar a peça com um impacto repentino.

2.2.3.2 PLA

O PLA é um termoplástico com origem de amidos vegetais, como milho, trigo, entre outros e em condições corretas é biodegradável (SALINAS, 2014).

Os filamentos de PLA no processo de impressão possuem uma boa adesão e também possuem boas propriedades pós processo, podendo serem lixadas, coladas e pintadas. Estão disponíveis em diversas cores e tem como características uma superfície mais brilhante. A temperatura média de impressão é de 200°C, mas pode variar de acordo com o fabricante como por exemplo a fornecedora chinesa E-Sun recomenda uma faixa entre 190-215°C, já a fornecedora 3D LAB recomenda uma

faixa de 200-220°C. O PLA não tem tendência a empenar e por isso não necessita de uma mesa aquecida, caso utilizada a temperatura recomendada é de 60°C. (SALINAS, 2014).

Devido à alta fluidez e baixa contração, os filamentos de PLA produzem peças mais precisas e com cantos mais acentuados, detalhes precisos e melhor acabamento de superfície, porém apresentam uma elevada fragilidade, com alongamento menor que 10% na ruptura, limitando sua aplicação em alguns casos. (BRITO et al., 2012).

O perfil do PLA na impressão 3D, segundo Alkaios (2017), é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Perfil do PLA



Fonte: Adaptado de Alakios (2017).

Os pontos fortes do PLA são sua facilidade de impressão e qualidade visual comparado aos outros materiais disponíveis, também apresenta uma boa resistência máxima. Todos esses fatores somados explicam a ascensão do PLA a material preferencial nos processos de FDM (BARNATT, 2014).

Comparando algumas propriedades entre o ABS e o PLA temos a Tabela 8, classificando em menor e maior entre os dois materiais.

Tabela 8 – Comparação ABS x PLA

| Propriedade | Menor | Maior |
|-----------------------|--------------|--------------|
| Rigidez/Dureza | ABS | PLA |
| Resistência impactos | PLA | ABS |
| Flexibilidade | PLA | ABS |
| Precisão em detalhes | ABS | PLA |
| Qualidade superficial | ABS | PLA |
| Ecológico | ABS | PLA |

Fonte: Adaptado de What... (2018).

Devido as características descritas, e maior facilidade de impressão do que o ABS, os filamentos de PLA se tornaram muito populares entre os entusiastas de impressão 3D (BARNATT, 2014).

2.2.4 Parâmetros de fabricação

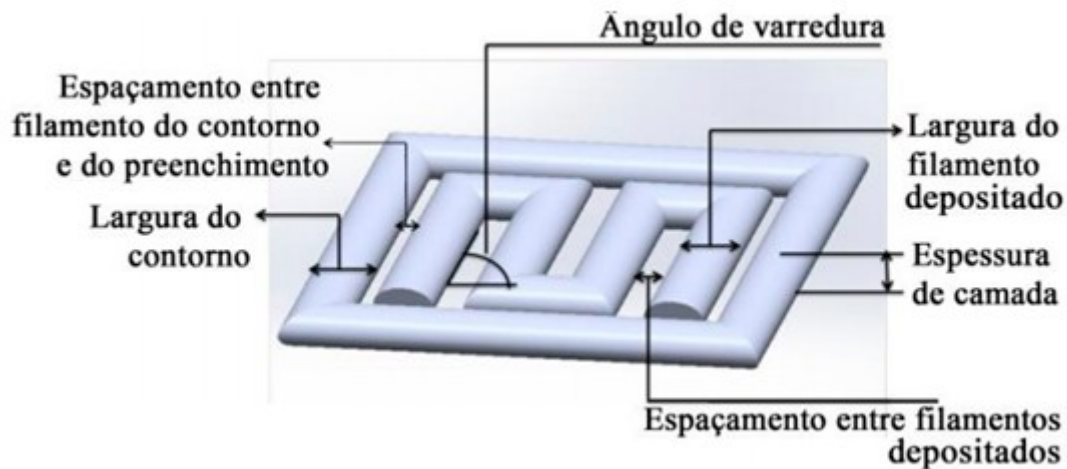
Segundo Sood et al. (2011), os produtos finais de um processo de FDM podem ser avaliados sobre dois conjunto de índices diferentes São eles:

- Índices técnicos (resistência a tração, flexão e impacto, a precisão dimensional e de forma).
- Índices econômicos (tempo de fabricação e quantidade de material e suporte utilizados).

Os índices são influenciados pelos parâmetros de fabricação, e suas combinações, e podem ser controlados através da interface da máquina, direta ou indiretamente.

Nos índices técnicos, os parâmetros são: orientação de construção, ângulo de varredura, espessura de camada, largura de varredura, largura de contorno, número de contornos, porcentagem de preenchimento, velocidade de extrusão e temperatura de extrusão, alguns desses parâmetros podem ser vistos na Figura 12. O termo varredura corresponde ao filamento depositado no processo de extrusão

Figura 12 – Parâmetros de construção

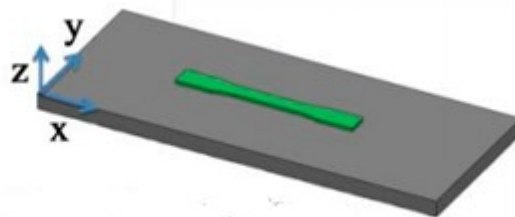


Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

2.2.4.1 Orientação de construção

A orientação de construção é o posicionamento da peça na mesa de construção em relação aos eixos X, Y e Z, como mostrado na Figura 13. (SOOD et al., 2011).

Figura 13 – Orientação de construção



Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

Na literatura são apresentados alguns estudos, com intuito de descobrir qual a melhor orientação para se imprimir uma peça, como é o caso do artigo publicado por Afrose et al. (2015), que identificou que as peças construídas na orientação X (0°) apresentam a maior resistência a tração, apresentando em torno de 60 a 64% da resistência do PLA natural. No mesmo estudo foi mostrado que as peças construídas em uma orientação mista (45°) possuem a maior vida em fadiga e a melhor capacidade de armazenar energia.

Em outro estudo apresentando por Grasso e Martorelli (2015), também mostra os mesmos resultados para resistência a tração, tendo a maior resposta na orientação X (0°), seguido pela orientação mista (45°) e em último a orientação Y (90°), apresentando uma diferença de até 25% entre X e Y.

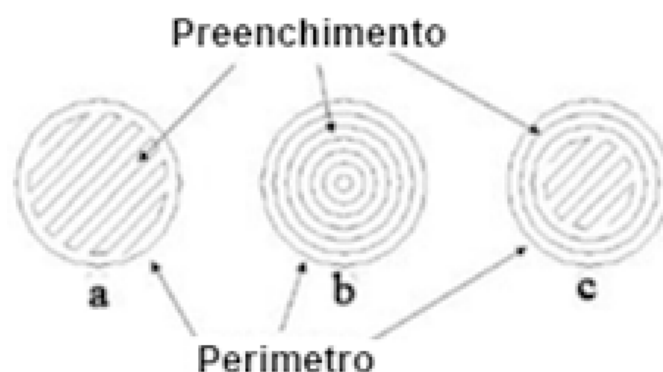
2.2.4.2 Espessura da Camada

A espessura da camada é a altura da camada medida na direção Z (SOOD et al., 2011). No artigo de Santana (2015), ele apresenta os resultados do ensaio de tração para peças com diferentes espessuras de camada, sendo os melhores resultados nas peças com 0,25 mm e 0,3 mm de espessura de cama. Ainda conclui que atingiu a recomendação de se utilizar uma espessura menor que 80% do diâmetro do bico extrusor, nesse caso 0,4 mm.

2.2.4.3 Ângulo de varredura

O ângulo de varredura é a caminho em que o preenchimento da peça é feito em relação ao eixo X da máquina, a alteração desse caminho define estratégias de preenchimento, segundo Volpato et al., (2007) as três formas mais utilizadas são mostradas na Figura 14, ou sejam: Varredura, Contorno e Contorno com Varredura.

Figura 14 – Estratégias de preenchimento



Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

De acordo com a Figura 14, tem-se:

- a) Varredura, como sendo o caminho de preenchimento, é feito em zig-zag com as linhas de filamentos paralelas entre uma e outra e uma alteração de 90° a cada camada.
- b) Contorno, caminho de preenchimento segue o contorno da camada e continua preenchendo com ciclos equidistantes.
- c) Varredura com Contorno, é a combinação das duas estratégias, sendo a estratégia mais utilizada.

2.2.4.4 Número de contornos

É o número de contornos que haverá quando se é utilizado a estratégia de preenchimento contour e raster, também conhecida como número de perímetros.

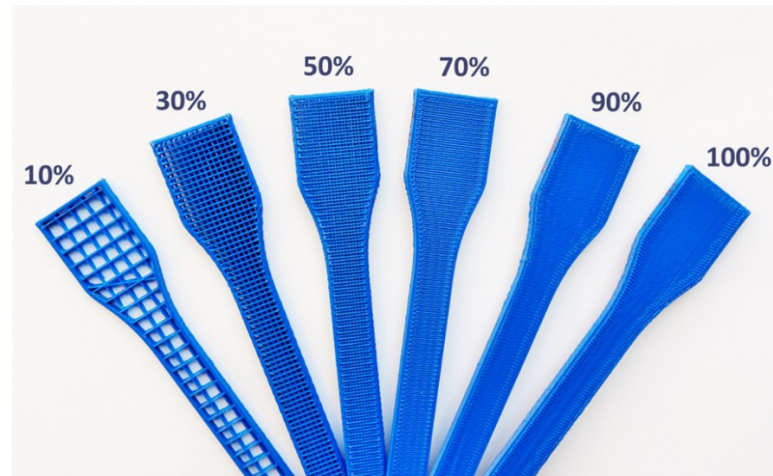
2.2.4.5 Largura de Varredura e de Contorno

A largura de varredura é a largura utilizada no preenchimento da parte interna da peça, Raster. Similiar a largura de varredura, a de contorno define a largura utilizada na extrusão da geometria que limita o contorno da peça, Contour. (FOGGIATTO, 2005).

2.2.4.6 Porcentagem de preenchimento

A porcentagem de preenchimento de uma peça, é a quantidade de material impresso que a peça terá dentro dela. Esse parâmetro pode variar de 0% até 100%, quando é definido 0% a peça terá apenas o contorno, definida pelo número de perímetros. Para cada porcentagem acima de 0% a máquina define padrões de impressão variando a distância entre as linhas de impressão, como pode se ver na Figura 15.

Figura 15 – Porcentagens de preenchimento



Fonte: What... (2018).

Os padrões de impressão variam de acordo com a máquina, e algumas até permitem a escolha de padrões diferentes.

2.2.4.7 Velocidade de extrusão

Segundo Stephen et al., (2014) a velocidade de extrusão é a velocidade com que o bico extrusor se movimenta durante a impressão, o processo é relativamente lento pois a velocidade é limitada pelo fluxo de material.

Um estudo apresentando por Santana (2015), comparou três diferentes velocidades de deposição: 20 mm/s; 40 mm/s; 60 mm/s tendo como resultado o maior valor de modulo de ruptura na utilização de menor velocidade de deposição, como conclusão ele aponta que deve haver um sincronismo entre a deposição do material e o deslocamento do cabeçote extrusor com a relação de volume (espessura da camada) e velocidade de extrusão.

2.2.4.8 Temperatura de extrusão

A temperatura de extrusão é definida com base em três necessidades, (a) baixa viscosidade do material, para facilitar a extrusão através do bico, (b) amolecer as camadas depositadas para garantir a união entre elas, (c) garantir que o filamento depositado se sustente com características de adesão adequadas (BELLINI, 2002).

A temperatura ideal altera de acordo com o tipo de matéria prima utilizada e cada fabricante recomenda uma faixa de utilização, tomando como exemplo o fabricante de filamento E-sun, a recomendação é utilizar de 220-260°C para impressão com ABS e de 190-220°C quando utilizado o PLA.

2.2.4.9 Cor do filamento

Além dos fatores já descritos, existem fatores que ainda são pouco estudados, como por exemplo a cor do filamento. Um estudo da Universidade Tecnológica de Michigan, USA, Wittbrodt e Pearce (2015), mostra que existe influência da cor do filamento nas propriedades mecânicas das peças impressas. Esse estudo, em ordem de aprimorar os conhecimentos em torno do efeito da cor e da temperatura de extrusão sobre as características mecânicas de peças feitas pelo processo de FDM, apresentou peças criadas em cinco cores diferentes (branco, preto, azul, cinza e natural) usando uma impressora TAZ Lulzbot (baixo custo). As amostras foram testadas quanto a cristalinidade usando um processo difração de raio-x (DRX) e resistência a tração seguindo a norma ASTM D638-14 (2014). Os resultados apresentados mostraram o efeito da temperatura e da cor nas propriedades do material impresso e com base nos resultados do filamento branco parece haver uma temperatura crítica de impressão para cada cor de filamento que otimiza a cristalinidade e sugeriu-se, em trabalho futuros, realizar-se análises similares para outras cores.

3 METODOLOGIA

Para a confecção dos corpos de prova (CP) foi utilizado uma máquina de mesa, pelo processo FDM, presente no laboratório de inovação e desenvolvimento de produtos e processos (LiD) da UFSC, modelo 3DCloner DH, desenvolvida pelas Indústrias Schumacher, Figura 17, e como matéria prima foi utilizado o PLA fornecido pela E-Sun, nas cores amarelo e preto.

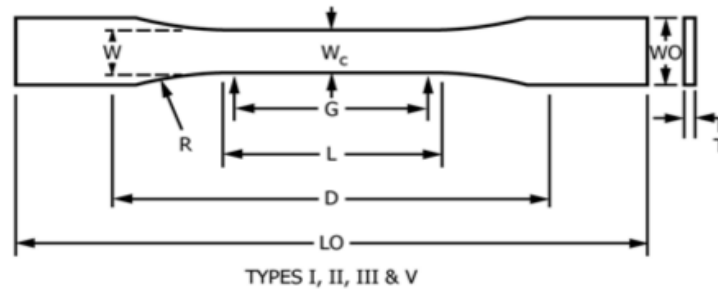
Figura 17 – Impressora de mesa 3DCloner DH



Fonte: 3D Cloner (2017).

Os CP's para o ensaio de tração foram fabricados seguindo a norma ASTM D638-14 (2014), tipo I, que tem sua geometria definida como mostrado na Figura 18. Foram fabricadas 3 amostras para cada um dos 3 parâmetros de processo definido de cada cor, como foram 2 cores analisadas, obteve-se um total de 18 corpos de prova representados na Figura 19.

Figura 18 - Corpo de prova padrão.



Fonte: ASTM D638-14 (2014).

Sendo que para o tipo I algumas das dimensões são as seguintes:

- $L_o = 165\text{mm}$
- $L = 57\text{mm}$,
- $W_c = 13\text{mm}$,
- $W_o = 19\text{mm}$,
- $T = 3,2\text{mm}$,
- $R = 76\text{mm}$.

Figura 19 – CP's para ensaio de tração



Fonte: O Autor (2018).

Os corpos de prova para o ensaio de DRX, foram fabricados de acordo com os requisitos da máquina onde iria realizar-se o ensaio, foram fabricadas 6 corpos de prova, como pode se observar na Figura 20.

Figura 20 – CP's para ensaio por DRX



Fonte: O Autor (2018).

Ambos os CP foram fabricados com os mesmos parâmetros de impressão descritos a seguir.

3.1 PARÂMETROS DE PROCESSO FIXOS

O primeiro parâmetro definido como fixo foi a velocidade de deposição (VD), que será utilizada o padrão da máquina de 20mm/s.

O número de camadas (NC) superior e inferior foi escolhido como sendo dois, devido a espessura dos corpos de provas serem muito pequenas +- 3,2 mm, então com o intuito desse parâmetro não ter grandes influencias foi utilizado um valor próximo ao mínimo.

Para os parâmetros de: espessura da camada (EC), número de perímetros (NP) e densidade de preenchimento (DP), realizou-se um estudo prévio de ensaio de tração com objetivo de descobrir qual seria a melhor combinação desses parâmetros para obtenção da tração máxima. No ensaio foram fabricados 24 corpos de prova, sendo 3 de cada combinação. Para as combinações foram atribuídas um valor mínimo e um valor máximo para cada parâmetro, representadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Combinações das amostras

| Amostra | EC (mm) | NP | DP (%) |
|----------------|----------------|-----------|---------------|
| 1 | 0,2 | 1 | 30 |
| 2 | 0,2 | 1 | 80 |
| 3 | 0,2 | 6 | 30 |
| 4 | 0,2 | 6 | 80 |
| 5 | 0,3 | 1 | 30 |
| 6 | 0,3 | 1 | 80 |
| 7 | 0,3 | 6 | 30 |
| 8 | 0,3 | 6 | 80 |

Fonte: O Autor (2018).

Com os dados apresentados e os resultados do ensaio de tração, que serão apresentados no próximo capítulo, os parâmetros que ficaram fixos, e seus valores, durante esse estudo estão definidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros fixos

| Parâmetros | Valor |
|------------------------------|--------------|
| Espessura da camada | 0,2 mm |
| Velocidade de deposição | 20 mm/s |
| Número de camadas superiores | 2 |
| Número de camadas inferiores | 2 |
| Número de perímetros | 6 |
| Densidade de preenchimento | 80% |

Fonte: O Autor (2018).

3.2 PARÂMETROS DE PROCESSO VARIÁVEIS

Para chegar no objetivo proposto desse trabalho, variou-se a cor do PLA para descobrir se ela realmente altera a resistência a tração das peças obtidas por FDM e o segundo parâmetro variado foi a temperatura de impressão, para analisar se a

temperatura que resulta a maior resistência a tração é dependente da cor do PLA ou não.

O PLA utilizado foi o do fornecedor E-Sun e o mesmo recomenda que a temperatura de impressão seja entre 190-215°C, então foram escolhidas 3 faixas, a temperatura máxima recomendada de 215°C, na temperatura mínima de 190°C não foi possível a fabricação dos corpos de prova devido a falhas na impressão, o material não estava fundindo completamente, então a temperatura mínima escolhida foi a de 200°C onde não encontrou-se problemas para a fabricação dos CP's.

Para a temperatura intermediária, foi considerado a temperatura média dos extremos, 207,5°C, porém não é uma temperatura usual então optou-se pela temperatura um pouco maior que a média, a de 210°C. As temperaturas escolhidas foram 200, 210 e 215 graus Celsius.

Para escolha das cores optou-se em utilizar uma cor clara e outra escura, para destacar eventuais diferenças provenientes da pigmentação, com as cores disponíveis no laboratório, optou-se pela cor amarela para representar a cor clara e a cor preta para representar a cor escura.

Tanto os CP's da cor amarela quanto os da cor preta tiveram um bom resultado final de fabricação nas três temperaturas 200, 210 e 215°C. Não foram encontradas falhas graves nem defeitos de impressão.

3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Caracterização Mecânica (LATECME) do Senai, utilizando uma máquina EMIC, similar a Figura 21, seguindo a norma ASTM D638-14 (2014).

Figura 21 – Máquina para ensaio de tração



Fonte: EMIC (2018).

3.4 OBTENÇÃO DA CRISTALINIDADE

Para obtenção da cristalinidade das amostras realizou-se ensaios de Difração de Raio X (DRX), na Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), utilizou-se a máquina Siemens D5005, Figura 22, do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE). As configurações de escaneamento foram $5-50^\circ$ (2θ) com contagem de 2,5 segundos por $0,2^\circ$ (2θ).

Figura 22 – Máquina de DRX Siemens D5005



Fonte: UFSCar (2017).

Após a obtenção do difratograma foi utilizado a técnica de identificação dos picos cristalinos para se calcular a porcentagem que a quantidade cristalina representa do total do material, obtendo-se a porcentagem cristalina.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira parte deste capítulo se refere ao pré-estudo para determinação dos parâmetros de processos fixos. A segunda parte apresenta os resultados e discussões.

4.1 PRÉ-ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FIXOS.

O ensaio de tração foi realizado para as 24 amostras, onde se variou a Espessura de Camada (EC), de 0,2 mm e 0,3 mm, Número de Perímetros de 1 e 6, Densidade de Preenchimento de 30% e 80%. Sendo que alguns valores tiveram que ser fixados para esse pré-estudo, como temperatura em 210°C, esse valor foi escolhido buscando um valor que não estivesse perto dos extremos utilizados no trabalho, ou seja, 200 e 215°C. Como material utilizou-se o PLA na cor preta. Então, calculou-se a média da tensão máxima (TM) para cada uma dos 8 tipos de combinações, os resultados estão representados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado pré-estudo

| Amostra | EC [mm] | NP | DP [%] | TM [MPa] | Desv. Padrão [MPa] |
|----------|------------|----------|-----------|--------------|--------------------|
| 1 | 0,2 | 1 | 30 | 13,16 | 0,86 |
| 2 | 0,2 | 1 | 80 | 26,01 | 0,70 |
| 3 | 0,2 | 6 | 30 | 19,64 | 0,11 |
| 4 | 0,2 | 6 | 80 | 28,01 | 0,34 |
| 5 | 0,3 | 1 | 30 | 15,48 | 0,67 |
| 6 | 0,3 | 1 | 80 | 21,03 | 1,21 |
| 7 | 0,3 | 6 | 30 | 20,45 | 2,26 |
| 8 | 0,3 | 6 | 80 | 26,50 | 1,70 |

Fonte: O Autor (2018)

A partir dos resultados encontrados na Tabela 1, a amostra 4 apresenta a maior média para TM, com 28,01 MPa, porém outras duas amostras apresentam resistência similar. A amostra 2 com 26,01 MPa e a amostra 8 com 26,50 Mpa.

Devido ao desvio padrão relativamente alto dessas amostras, utilizou-se o Minitab® para realizar um testes de hipóteses comparando a amostra 4 com a amostra

2 e outro teste comparando a amostra 4 com a amostra 8. Ambos os testes foram feitos para uma confiança de 95% ($\alpha=0,05$).

No primeiro teste comparando a amostra 2 com a amostra 4, o Minitab® retornou um valor P de 0,045, como é menor que a significância de 0,05, pode-se afirmar que as médias são diferentes.

No segundo teste de comparação, das médias 4 e 8, o valor de P encontrado foi de 0,216, como é maior que a significância de 0,05, não se pode afirmar que as médias dessas amostras são realmente diferentes.

Mesmo sem poder afirmar que as médias das amostras 4 e 8 são diferentes, optou-se por utilizar os parâmetros da amostra 4 por ter apresentado um desvio padrão bem menor, 0,34 MPa da amostra 4 contra 1,70 MPa para a amostra 8.

Assim os parâmetros escolhidos foram: espessura da camada igual a 0,2 mm, número de perímetros igual a 6 e densidade de preenchimento de 80%, sendo esses os valores utilizados em todo o restante do trabalho.

4.2 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS CORES E DA TEMPERATURA

Para facilitar a exposição dos resultados, as seis combinações serão representadas por um nome de referência de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 – Referência das amostras

| Nome de Referência | Temperatura de Impressão | Cor |
|--------------------|--------------------------|---------|
| A200 | 200°C | Amarelo |
| A210 | 210°C | Amarelo |
| A215 | 215°C | Amarelo |
| P200 | 200°C | Preto |
| P210 | 210°C | Preto |
| P215 | 215°C | Preto |

Fonte: O Autor (2018)

Os primeiros resultado obtidos foram os de ensaio de tração, onde teve-se três resultados distintos, Tensão Máxima (TM), Tensão de Escoamento (TE) e Deformação antes da Quebra (DQ). O Resultados de todos os ensaio podem ser vistos na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15.

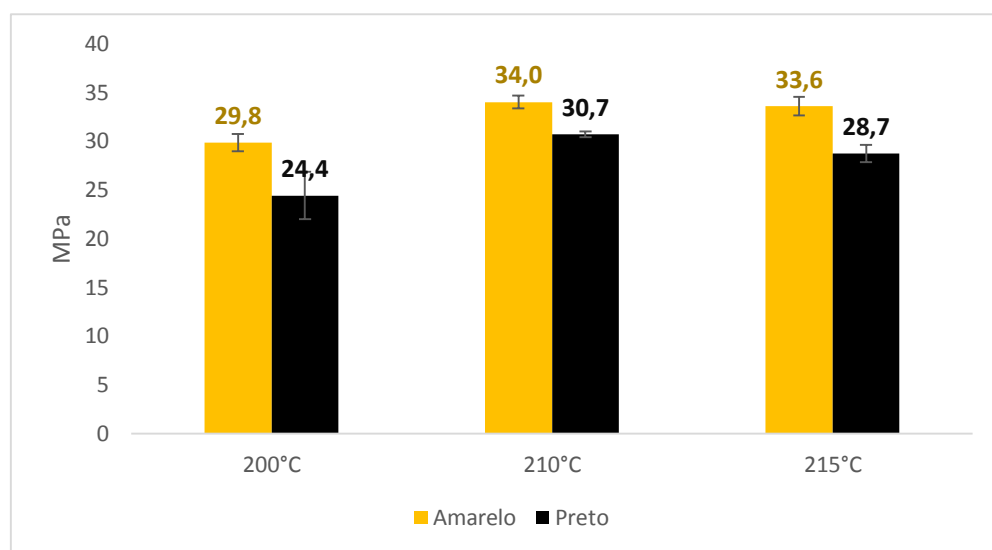
Tabela 13 – Tensão máxima

| Amostras | Ensaio 1 [MPa] | Ensaio 2 [MPa] | Ensaio 3 [MPa] | Média [MPa] | Desvio Padrão [MPa] |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------|
| A200 | 28,9 | 30,2 | 30,5 | 29,8 | 0,8 |
| A210 | 34,3 | 33,2 | 34,6 | 34,0 | 0,7 |
| A215 | 33,4 | 34,5 | 32,8 | 33,6 | 0,9 |
| P200 | 27,1 | 23,6 | 22,5 | 24,4 | 2,4 |
| P210 | 31,0 | 30,4 | 30,7 | 30,7 | 0,3 |
| P215 | 29,6 | 28,8 | 27,8 | 28,7 | 0,9 |

Fonte: O Autor (2018)

Para peça amarela tem-se o menor resultado de TM em 200°C com 29,8 MPa, a cor preta também teve seu menor resultado em 200°C com 24,4 MPa. A maior TM para a cor amarela foi obtida em 210°C com 34,0 MPa, para a cor preta também ocorreu em 210°C com 30,7 Mpa. O gráfico das médias de TM está representado na Figura 23.

Figura 23 – Média das tensões máximas



Fonte: O Autor (2018).

É possível perceber que os resultados de TM da cor amarela são superiores aos da cor preta para todas as faixas de temperatura. Para temperatura de 200°C a TM da cor amarela é 22,1% superior a preta, em 210°C é 10,7% superior e para 215°C é 17% superior. Os resultados em 210°C também são maiores e aparentam ter um resultado mais uniforme devido ao um baixo desvio padrão.

Os resultados de TE seguem um padrão similar aos resultado de TM e podem ser vistos na Tabela 14.

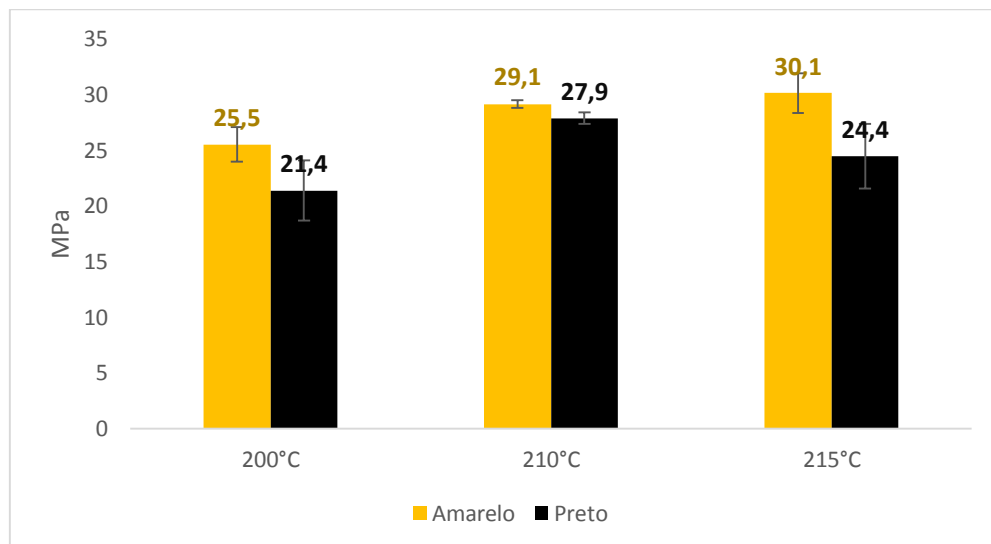
Tabela 14 – Tensão de escoamento

| Amostras | Ensaio 1 [MPa] | Ensaio 2 [MPa] | Ensaio 3 [MPa] | Média [MPa] | Desvio Padrão [MPa] |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------|
| A200 | 25,8 | 23,6 | 27,1 | 25,5 | 1,5 |
| A210 | 29,2 | 29,7 | 28,5 | 29,1 | 0,3 |
| A215 | 31,8 | 29,3 | 29,3 | 30,1 | 1,7 |
| P200 | 23,9 | 21,7 | 18,5 | 21,4 | 2,7 |
| P210 | 28,4 | 27,3 | 27,9 | 27,9 | 0,5 |
| P215 | 26,4 | 25,8 | 21,1 | 24,4 | 2,8 |

Fonte: O Autor (2018)

O menor valor para a cor amarela foi obtido na amostra de 200°C com 25,5 MPa, o menor valor de TE para cor preta foi obtido em 200°C com 21,4 MPa. A maior TE para a cor amarela foi em 215°C com 30,1 MPa e para a cor preta em 210°C com 27,9 Mpa. O gráfico das médias da TE está representado na Figura 24.

Figura 24 – Média das tensões de escoamento



Fonte: O Autor (2018).

Similar aos resultados de TM a os valores de TE da cor amarela são superiores aos da cor preta para todas as faixas de temperatura. Para temperatura de 200°C a TM da cor amarela é 19% superior a preta, em 210°C é 4,3% superior e para 215°C

é 23% superior. Também similar aos resultado de TM, a resposta em 210°C aparentam ser as melhores, apesar do resultado da cor amarela em 215°C ter sido, porém possui um desvio padrão muito maior ,1,7 MPa, demonstrando uma não uniformidade do resultado, diferente de 210°C onde o desvio foi muito menor, 0,3 MPa, resultado em um resultado mais uniforme.

O último resultado do ensaio de tração foi a deformação antes da quebra, com seus dados representados na Tabela 15.

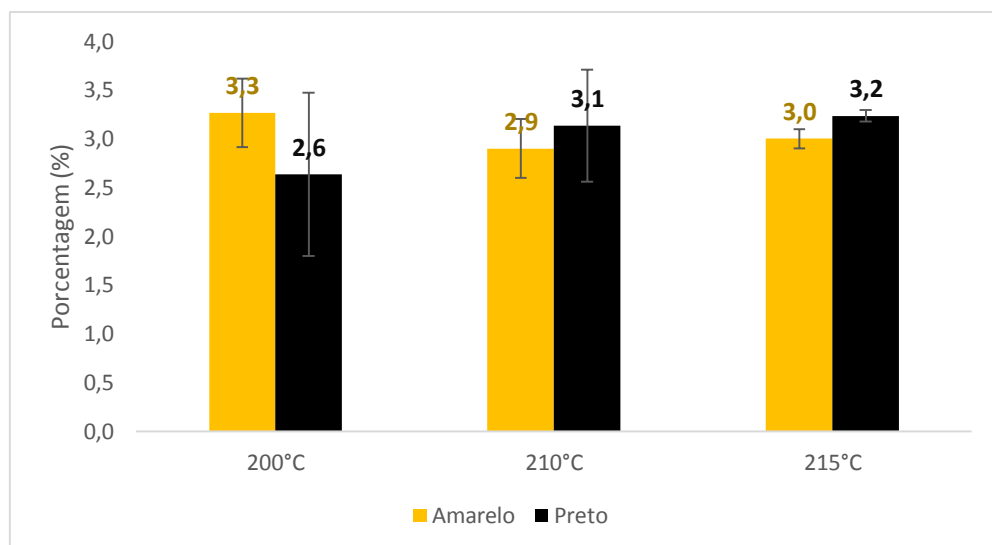
Tabela 15 – Deformação antes da Quebra

| Amostras | Ensaio 1 [%] | Ensaio 2 [%] | Ensaio 3 [%] | Média [%] | Desvio Padrão [%] |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------------|
| A200 | 2,9 | 3,6 | 3,3 | 3,3 | 0,4 |
| A210 | 3,2 | 2,6 | 2,9 | 2,9 | 0,3 |
| A215 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,0 | 0,1 |
| P200 | 2,2 | 2,1 | 3,6 | 2,6 | 0,8 |
| P210 | 2,8 | 3,8 | 2,8 | 3,1 | 0,6 |
| P215 | 3,2 | 3,3 | 3,2 | 3,2 | 0,1 |

Fonte: O Autor (2018)

Os resultados de deformação antes da quebra teve seu menor valor para a cor amarela em 210°C com 2,6% e para cor preta em 200°C com 2,1%, o maior resultado para as amostras amarelas foi em 200°C com 3,6% e para cor preta em 210°C com 3,8%. As médias e desvios padrões estão representadas na Figura 25.

Figura 25 – Média da deformação antes da quebra



Fonte: O autor (2018)

Na figura 25 fica claro que os valores tem pouca dependência da cor ou da temperatura, levando em conta as médias e os desvios padrões os resultados não se distanciam de 3%.

Com o objetivo de entender melhor essas variações e validar estatisticamente que a cor exerce influência na resistência mecânica do material, tanto quanto a temperatura, realizou-se um planejamento de experimento ou *design of experiment* (DOE).

Para a criação do DOE foi utilizado o software Minitab®, tendo como entrada os valores de TM para as peças preta e amarela nas cores de 200 e 210°C, de acordo com a Figura 26. A temperatura de 215°C não foi considerada nessa análise, pois para o uso do DOE será utilizado apenas um valor mínimo e um valor máximo. Para o valor mínimo utilizou-se o resultados de 200°C e para o valor máximo optou-se pelos resultados de 210°C, por serem os maiores valores e próximos aos resultados de 215°C (1,1% maior para cor amarela e 6,9% maior para cor preta).

Figura 26 – Entrada Minitab®

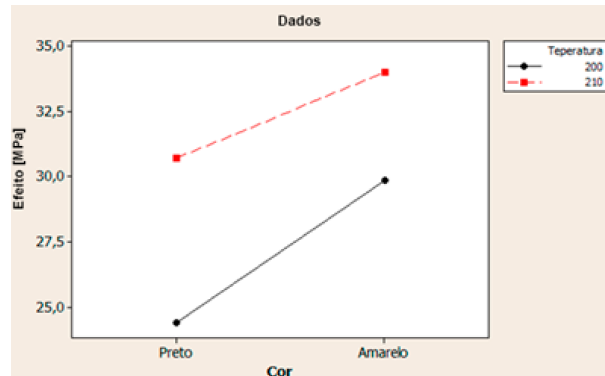
| ↓ | C1 | C2-T | C3 |
|----|------------|---------|---------------|
| | Teperatura | Cor | Tensão Máxima |
| 1 | 200 | amarelo | 28,9 |
| 2 | 210 | amarelo | 34,3 |
| 3 | 200 | preto | 27,1 |
| 4 | 210 | preto | 31,0 |
| 5 | 200 | amarelo | 30,2 |
| 6 | 210 | amarelo | 33,2 |
| 7 | 200 | preto | 23,6 |
| 8 | 210 | preto | 30,4 |
| 9 | 200 | amarelo | 30,5 |
| 10 | 210 | amarelo | 34,5 |
| 11 | 200 | preto | 22,5 |
| 12 | 210 | preto | 30,7 |

Fonte: O Autor (2018)

Realizou-se um ensaio fatorial, tendo como fatores a temperatura, coluna C1, e a cor, coluna C2. A resposta foi a Tensão Máxima, coluna C3. O Minitab® gera alguns gráficos para facilitar a visualização do efeito dos parâmetros na resposta final, como por exemplo o gráfico de interação, Figura 27, nele pode-se observar a variação da resposta, Tensão Máxima, de acordo com a mudança dos parâmetros da cor e da

temperatura, sendo a peça feita em 200°C na cor preta a que apresentar a menor TM e a peça com a maior resposta a de cor amarela feita em 210°C.

Figura 27 – Interação dos fatores para Tensão Máxima

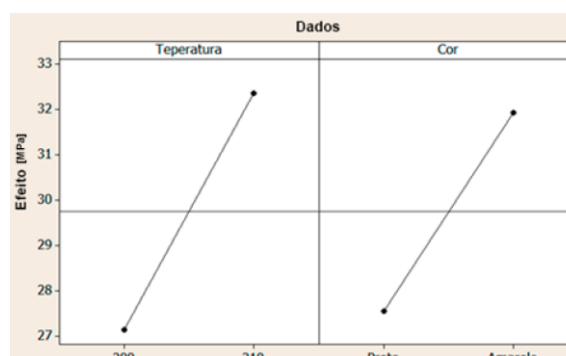


Fonte: O Autor (2018)

Este gráfico representa os valores de entrada onde a linha preta é a temperatura de 200°C e a linha vermelha a temperatura de 210°C, os pontos do lado esquerdo representam a cor preta e os do lado direito a cor amarela. Desta maneira observa-se que a temperatura de 200°C tem resultados de TM menores que 210°C, assim como a cor preta também apresenta resultados inferiores a cor amarela.

Outro gráfico gerado pelo Minitab® é gráfico de efeitos principais, onde fica evidente que a influência da cor é tão grande quanto a da temperatura, Figura 28. A parte esquerda do gráfico representa a variação da TM com a temperatura, o ponto inferior representa a média da TM em 200°C e o ponto superior em 210°C. A parte direita representa a variação da TM com a cor, o ponto inferior representa cor preta e o superior a cor amarela.

Figura 28 – Efeitos principais para Tensão Máxima

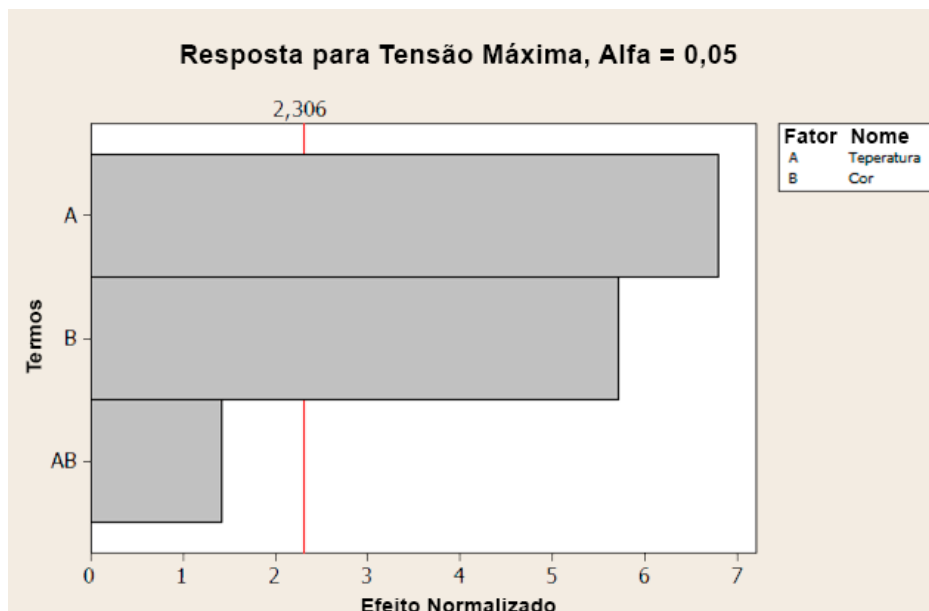


Fonte: O Autor (2018)

Pode-se observar que o aumento da TM variando a temperatura de 200°C para 210°C é similar a variação da mudança da cor preta para cor amarela, ambos os fatores causam um impacto similar na TM quando alterados.

O Minitab® também realiza uma análise estatística, considerando um fator de confiabilidade de 5% (Alfa = 0,05), e normaliza os efeitos dos parâmetros e calcula um valor mínimo para que esse efeito normalizado seja considerado significativo, esse valor é chamado de t de Student, nesse estudo para qualquer valor normalizado maior que $t = 2,306$, o fator já é considerado significativo, Figura 29.

Figura 29 – Pareto dos efeitos normalizados



Como pode-se observar o efeito normalizado do parâmetro “cor” foi tão grande quanto o parâmetro “temperatura”, pode-se afirmar estatisticamente com uma confiança de 95% que a cor é sim um fator que exerce influência nas resistências a tração das peças feitas em PLA pelo processo de FDM.

A interação dos fatores, chamada de fator AB, não foi superior ao valor t de 2,306, ou seja não foi possível confirmar a influência da interação dos fatores cor e temperatura.

Alguns estudos na literatura mostram resultados similares acontecendo em outros tipos de polímeros, como por exemplo o policarbonato e o Xenoy® (mistura de poliéster com policarbonato).

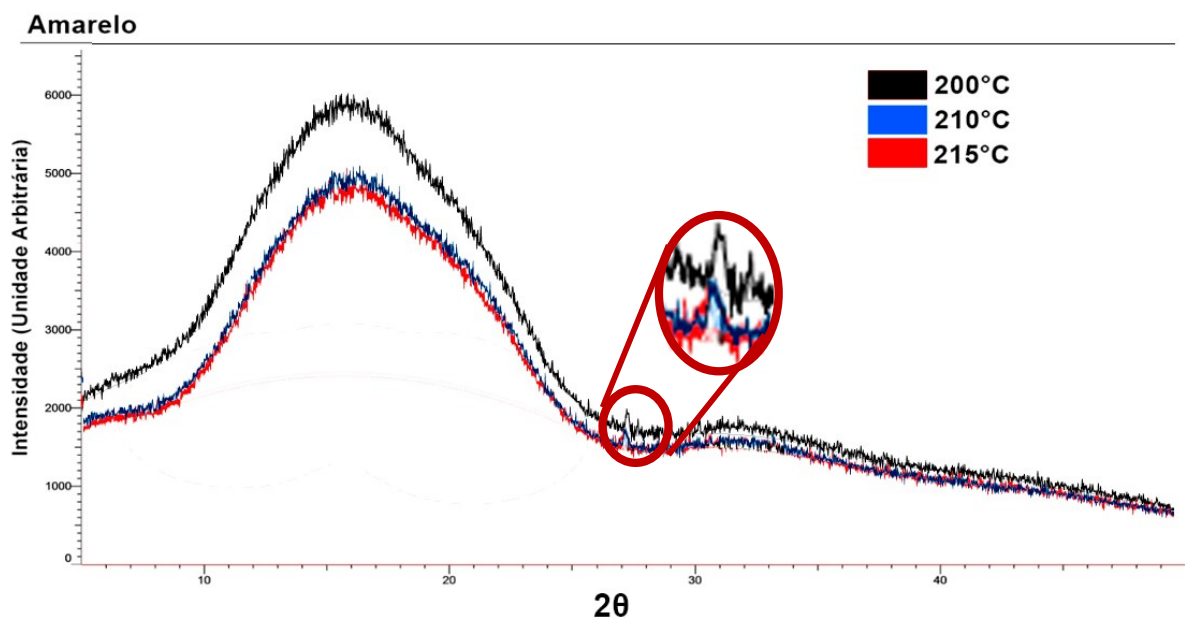
Segundo Janostik e Senkerik (2017) o tipo de pigmento selecionado influencia significativamente a rigidez do corpo de peças injetadas feitas de policarbonato, havendo uma variação de até 15% apenas variando a cor e a porcentagem de pigmento da matéria prima.

Fagelman e Guthrie (2006) também chegaram a resultados similares para peças fabricadas com Xenoy® onde a pigmentação apresenta uma influência nas propriedades mecânicas, sugerindo que as partículas do pigmento estariam agindo como cristalizadores, favorecendo e melhorando a cristalização do polímero, ou seja, típico comportamento de agentes nucleantes. O aumento da cristalinidade significa que o material é mais duro, pois mais cadeias atômicas formam arranjos ordenados, que por sua vez aumentam a resistência do material à medida que a tensão é transferida de forma mais eficiente através de arranjos ordenados.

Para descobrir se esse mesmo efeito está ocorrendo com o PLA, realizou-se ensaios de DRX, com objetivo de se medir a cristalinidade das amostras.

Os difratogramas, resultados do ensaio de DRX, de cada cor foram plotados juntos para critério de comparação, como mostrado na Figura 30, para a cor amarela e na Figura 31 para a cor preta.

Figura 30 – Difratogramas amarelo

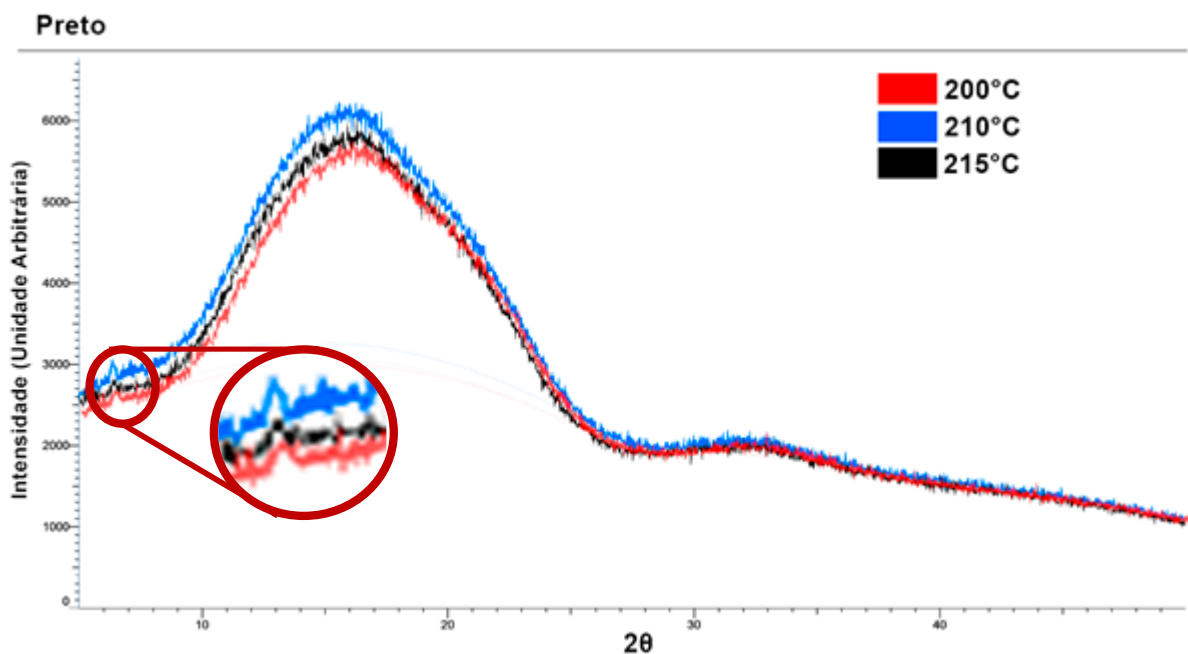


Fonte: O Autor (2018)

Ressalta-se que os picos cristalinos podem ser observados como os picos mais agudos, ou maiores, que se destacam do resto dos picos do difratograma. Na Figura 29 observar-se esse comportamento próximo a $27^\circ(2\theta)$ (círculo vermelho) para os três difratogramas, sendo o maior deles aparentemente em 210°C .

Para os difratogramas da cor preta, Figura 30, existe um pequeno pico próximo a $7^\circ(2\theta)$ (círculo vermelho) sendo que o maior deles aparentemente também se encontra em 210°C .

Figura 31 – Difratogramas preto



Fonte: O Autor (2018)

Para obtenção de um valor de comparação, foi utilizado o método de razão das áreas em cada um dos seis difratogramas. Iniciando pela peça amarela de 200°C , utilizou-se o software OriginLab® para obtenção da curva base (curva que segue os vales do difratograma) para definir o limite inferior da integral para o cálculo da área total da função. A seguir realizou-se um ajuste manual para o cálculo da integral apenas do pico cristalino, círculo vermelho na Figura 29. Por fim utilizou-se o método das áreas (área cristalina sobre a área total) para descobrir a porcentagem cristalina das amostras, que nesse caso foi de 2,2%.

O processo descrito acima foi repetido para os outros 5 difratogramas, com seus resultados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Porcentagem cristalina das amostras

| Amostras | Porcentagem cristalina |
|----------|------------------------|
| A200 | 2,2 % |
| A210 | 3,4 % |
| A215 | 2,7 % |
| P200 | 1,5% |
| P210 | 2,3% |
| P215 | 1,8% |

Fonte: O Autor (2018)

É importante ressaltar que devido a qualidade dos ensaios e aos métodos manuais aplicados, não foi possível calcular o erro associado e os valores serão considerados apenas como uma aproximação para fins de comparação.

Observando os resultados, nota-se que para ambas as cores tem-se uma porcentagem baixa para as peças fabricadas em 200°C, 2.2% para cor amarela e 1,5% para cor preta. 210°C obteve o maior resultado com 3,4% de cristalinidade na peça amarela e 2,3% na peça preta. O resultado em 215°C reduziu, sendo que a peça amarela apresentou 2,7% de cristalinidade e 1,8% na peça preta.

Também nota-se que a porcentagem da cor amarela foi maior que a da cor preta para todas as temperaturas, como todos os outros parâmetros permaneceram iguais, acredita-se que a mudança se deve ao pigmento utilizado, que explicaria o porquê dos resultado de tensão máxima da cor amarela serem maiores que da cor preta.

Pode-se deduzir que o pigmento age como agente nucleante, porem como o fabricante não divulga a quantidade nem a composição dos pigmentos que ele utiliza na coloração do seu material, se torna difícil tirar-se conclusões mais específicas.

5. CONCLUSÕES

A impressão 3D vem crescendo em popularidade nos últimos anos, especialmente o processo FDM em impressoras de mesa, com isso passou apenas da produção rápida de protótipos para produção de componentes uteis e reais, tornando necessário o estudo dos parâmetros de fabricação em busca das melhores combinações para os resultados desejados. A popularidade também facilitou esses estudos devido ao barateamento tanto das máquinas como da matéria prima, por exemplo o PLA, porém a necessidade de novos estudos ainda é grande e esse trabalho contribui na pesquisa da influência da cor e da temperatura na resistência a tração nas peças obtidas pelo processo de FDM.

O primeiro objetivo do trabalho foi realizar um pré-estudo para determinação dos parâmetros fixos para realização do trabalho em si. Os resultados foram de 0,2mm para espessura da camada, número de perímetros igual a 6, densidade de preenchimento igual a 80%, velocidade de impressão de 20mm/s e número de camadas superiores e inferiores igual a 2.

A próxima etapa e mais importante, foi analisar se a cor e a temperatura influenciavam nos resultados de resistência a tração. Os resultados do ensaio de tração mostraram que a cor amarela teve resultados melhores que a cor preta em todas as três temperaturas ensaiadas, sendo 18% superior em 200°C, 9,7% superior em 210°C e para 215°C foi 14% superior. A maior resistência foi encontrada em 210°C para a cor amarela com o 34 MPa e a menor foi na cor preta com 24,4 MPa em 200°C.

Um DOE foi conduzido para mostrar estatisticamente que a cor e a temperatura eram fatores significantes nos resultados de resistência a tração, os resultados mostraram, com uma confiança de 95%, que tanto a temperatura como a cor do PLA são fatores que influenciam no resultado final.

A última etapa do trabalho foi realizar uma análise da cristalinidade das peças para descobrir se a cor estava agindo na estrutura molecular das peças, como uma forma de explicar o efeito que a cor tem sobre os resultados de resistência a tração, similar aos efeitos apresentados em trabalhos similares conduzidos no Policarbonato e no Xenoy®. Através do ensaio de DRX foi constatado que a cor estava influenciando

na porcentagem cristalina do material e onde a porcentagem cristalina foi maior (3,4% na cor amarela em 210°C) foi onde se obteve a maior resistência a tração com 34 MPa, para a cor preta teve-se um resultado semelhante, a maior cristalinidade (2,3% em 210°C) também foi a maior resistência a tração com 30,7 MPa.

Desta maneira este trabalho demonstra a que tanto a cor como a temperatura agem na estrutura do material alterando seus resultados de resistência a tração e por isso precisa ser estudo para se tomar a melhor escolha com bases nos resultados desejados.

Para trabalhos futuros recomenda-se uma análise para diferentes cores com o objetivo de comparar as cores disponíveis em busca da temperatura ideal de impressão para cada uma. Outra possibilidade para um trabalho seguinte é uma análise da composição química da pigmentação utilizada em cada uma das peças com o objetivo de descobrir como as quantidades de cada elemento utilizado na pigmentação influenciam na resistência mecânica e com isso definir uma composição ideal para se obter o melhor resultado possível.

REFERÊNCIAS

AFROSE, M.F.; MASOOD, S.H.; NIKZAD, M. **Effects of build orientations on tensile properties of PLA material processed by FDM**. 2015.

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

ALKAIOS, J. **Introduction to FDM 3D printing**. 2017. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D790-10: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. United States, 2010.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638-14: Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastic and electrical insulating materials**. United States, 2014.

BARNATT, C. **3D Printing: Second Edition**. Inglaterra: Explainingthefuture.com, 2014. Vol. 11, pag.88-94

BASICS of 3D design for FFF technology. **Omni 3D**. 2017. Disponível em: <<http://www.omni3d.com/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

BELLINI, A. **Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design**. Ph.D. Dissertation, Philadelphia, USA: Drexel University, 2002.

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

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais**. 7 ed. Rio de Janeiro. LTC editora, 2008.

CHANG, K.H.; LONG, T. **Rapid prototyping for complex assemblies**. Computer-Aided Design and Applications, 2011.

FARHAN, A. **Transformação: Conhecer as resinas é fundamental**. Plástico, 2016. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/18114/>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

GRASSO, A.L.M.; MARTORELLI, G.S.M. **The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with na open-source 3D printer**. Rapid Prototyping Journal, vol. 21, 2015.

HUNT, E.J., ZHANG, C., ANZALONE, N., PEARCE, J.M. **Polymer Recycling Codes for Distributed Manufacturing with 3-D printers**. Conservation and Recycling 97 (2015) p. 24-30.

JANOSTIK, V.; SENKERIK, V. **Effect of Pigment Concentration on Mechanical Properties of Polycarbonate**. MATEC Web of Conferences, 2017.

LIU, F.W. **Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development**. 2007

PALLAROLAS, E.A.F.F. **Revisão Técnica de Processos de Manufatura Aditiva e Estudo de Configurações Para Estruturas de Impressoras Tridimensionais**. Monografia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ROHRINGER, S. **2018 3D Printer Filament Guide**. All 3DP. Disponível em: <<https://all3dp.com/>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

SALINAS, R. **3D Printing with RepRap Cookbook**. Birmingham: Packt Publishing, 2014. 346p.

SANTANA, L.; AHRENS, C.H.; NETTO, A.C.S. **Estudo da Influência dos Parametros de Processo na Qualidade de Estruturas Fabricadas em PLA por Manufatura Aditiva por Extrusão**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015.

SILVA, G.C., KAMINSKI, P.C. **Prototipagem rápida aplicada às peças utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas**. In: XVI Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade. SAE Technical Paper Series n. 2007-01-2690, 2007.

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

STEPHEN, A.O.; DALGARNO, K.W.; MUNGUIA, J. **Quality assurance and process monitoring of fused deposition modelling made parts**. Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, 2014.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J.M. **Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions**. Mater. Des. 58, 2014.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. **The Rapid Prototyping Technologies**. Rapid Prototyping Journal, v.23, n.4, p.318-330, 2003.

VOLPATO, N.; AHRENS, C.H.; FERREIRA, C.V.; GÜNTHER, P.; CARVALHO, J. de; SANTOS, J.R.L. dos; SILVA, J.V.L. da. **Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações**. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007.

WHAT is the best type of plastic for my 3D printing application? **3D Matter**.
Disponível em: <<http://my3dmatter.com/>>. Acesso em 24 mar. 2018.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J.M. **The effects of PLA color on material properties of 3D printed components**. Addit Manuf, 2015. Vol. 14, pag. 72-80