

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Jéssica Cardinali

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CORPOS DE PROVA DE PLA COM DIFERENTES
CORES OBTIDOS POR PROCESSO ADITIVO POR
EXTRUSÃO**

São Carlos

2018

Jéssica Cardinali

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CORPOS DE PROVA DE PLA COM DIFERENTES
CORES OBTIDOS POR PROCESSO ADITIVO POR
EXTRUSÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e de Manufatura.

Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

**São Carlos
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

CC267a Cardinali, Jéssica
 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE
 PROVA DE PLA COM DIFERENTES CORES OBTIDOS POR PROCESSO
 ADITIVO POR EXTRUSÃO. / Jéssica Cardinali; orientador
 Zilda de Castro Silveira. São Carlos, 2018.

 Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e
 Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2018.


 1. PLA. 2. Manufatura Aditiva. 3. Planejamento de
 Experimentos. 4. Impressão 3-D. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Jéssica Cardinali
Título do TCC: Avaliação das propriedades mecânicas de corpos de prova de PLA com diferentes cores obtidos por processo aditivo por extrusão
Data de defesa: 30/11/2018

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Zilda de Castro Silveira (orientador)	Aprovado
Instituição: EESC - SEM	
Professor Doutor Marcelo Aparecido Chinelatto	Aprovado
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Adriana Bruno Norcino	Aprovado
Instituição: IFSP/Matão -	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Zilda de Castro Silveira**



(assinatura)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria Rita e Sidney Cardinali, que sempre me apoiaram nos estudos, me ajudaram a ingressar e a me formar na universidade que tanto sonhei. Ao meu namorado, Raphael Smecellato Marcari, que me ajudou com muito amor e compreensão, me apoiando sempre nas minhas escolhas. A minha orientadora e amiga, Zilda Silveira, que permitiu com que pudesse conhecer o mundo da manufatura aditiva. Ao meu colega e amigo, Rafael Mattazio, que me ajudou (e muito!) neste trabalho. Aos meus colegas do grupo IMDT, que me ajudaram a terminar os ensaios desta pesquisa. E a Escola de Engenharia de São Carlos, docentes e técnicos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

"Na vida, não existe nada a temer, mas a entender."

Marie Curie

RESUMO

CARDINALI, J. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE PLA COM DIFERENTES CORES OBTIDOS POR PROCESSO ADITIVO POR EXTRUSÃO**. 2018. 80p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

O objetivo deste trabalho é gerar e avaliar corpos de prova de diferentes cores de filamentos de PLA, a partir de um estudo sistemático do processo aditivo por extrusão (FFF) baseado em técnicas de planejamentos de experimento (Design of Experiments), utilizando dois equipamentos flexíveis de impressão 3-D do tipo “low-end”. Os avanços tecnológicos observados notadamente nos últimos 20 anos têm impacto direto no cenário socioeconômico mundial, desde a ubiquidade da Internet em diversas atividades sociais e industriais que geram atividades com maior eficiência e sustentabilidade. A manufatura aditiva possui características técnicas desejáveis para que se torne uma manufatura flexível, capaz de contribuir para a redução do tempo de desenvolvimento do projeto do produto, minimizar o desperdício de material, reduzir significativamente ou até eliminar custos de ferramental, permitir a geração de formas e estruturas de alta complexidade e simplificar a lógica de produção. O trabalho foi feito para se analisar as propriedades mecânicas do PLA em diferentes cores, através de ensaios de tração, e tentar relacionar as respostas macroestruturais com as características microestruturais dos filamentos analisados por meio de ensaios térmicos (DSC e TGA).

Palavras-chave: PLA; Manufatura Aditiva; planejamento de experimentos; Impressão 3-D; PLA.

ABSTRACT

CARDINALI, J. **EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA SPECIMENS WITH DIFFERENT COLORS OBTAINED BY THE PROCESS OF ADDITIVE MANUFACTURE BY EXTRUSION**. 2018. 80p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The objective of this work is to generate and evaluate specimens of different colors of PLA filaments from a systematic study of the extrusion process (FFF) based on Design of Experiments techniques using two flexible “low-end” 3-D printing. The technological advances observed notably in the last 20 years have a direct impact on the world socio-economic scenario, from the ubiquity of the Internet in several social and industrial activities that generate activities with greater efficiency and sustainability. Additive manufacturing has desirable technical features to become a flexible manufacture, which can contribute to the reduction of time in product design development, minimize material waste, significantly reduce or even eliminate tooling costs, enable the generation of forms and highly complex structures and simplify production logic. The work was done to analyze the mechanical properties of PLA in different colors, through tensile tests, and try to relate the macrostructural responses to the microstructural characteristics of the filaments analyzed by thermal tests (DSC and TGA).

Keywords: 3d printing, design of experiments, biodegradable polymer, primary colors, PLA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva do tempo versus o grau de maturidade tecnológica.	24
Figura 2 – Divisões dos tipos de materiais de engenharia.	29
Figura 3 – Gráfico do aumento do volume específico de acordo com a temperatura.	30
Figura 4 – Etapas do processo de criação de uma peça.	31
Figura 5 – Fluxo do processo de MA.	32
Figura 6 – Tipos de cabeçote de extrusão.	34
Figura 7 – Representação esquemática do subsistema de deposição de uma impressora baseada no conceito de extrusão por filamento.	35
Figura 8 – Representação esquemática do subsistema de deposição de uma impressora baseada no conceito de extrusão por filamento.	35
Figura 9 – Estruturas de construção formadas e parâmetros.	36
Figura 10 – Difusão entre as camadas impressas. Em (a) existe o contato inicial entre as camadas, em (b) inicia-se a formação de pescoço, (c) ocorre a interdifusão entre as cadeias e o aumento do pescoço, (d) ocorre a randomização das cadeias poliméricas entre caminhos adjacentes.	37
Figura 11 – Normas ASTM e ISO para a Manufatura Aditiva.	39
Figura 12 – Estrutura do onômero de ácido láctico e seus isômeros.	40
Figura 13 – Estrutura química do (a) PLLA, (b) PDLA e (c) PDLLA.	41
Figura 14 – Foto da impressora IFSC-SC.	43
Figura 15 – Impressora Core A2 adquirida pelo grupo IMDT/EESC - USP.	45
Figura 16 – Parâmetros de arquivo utilizados na criação do STL dos corpos de prova.	46
Figura 17 – Imagem retirada do software Solid-Edge mostrando a geometria do corpo de prova.	46
Figura 18 – Fluxograma com os inputs e outputs do trabalho.	47
Figura 19 – Esquema do reômetro capilar.	48
Figura 20 – Foto da máquina Pyris I.	49
Figura 21 – Instron 5969 - EMM/EESC - USP.	52
Figura 22 – Gráfico de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para os filamentos sem pigmento, azul, amarelo e vermelho.	53
Figura 23 – Gráfico da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento	53
Figura 24 – Curva da perda de massa pela temperatura.	54
Figura 25 – Análise ANOVA do Módulo de Young.	57
Figura 26 – Variability do Módulo de Young.	57
Figura 27 – Análise ANOVA da Tensão de Escoamento	58
Figura 28 – Variability da Tensão de Escoamento	58
Figura 29 – Análise ANOVA da Tensão de Ruptura	59

Figura 30 – Variability da Tensão de Ruptura	59
Figura 31 – Análise ANOVA da Deformação na Ruptura	60
Figura 32 – Variability da Tensão de Ruptura	60
Figura 33 – Análise ANOVA da Tenacidade	61
Figura 34 – Variability da Tenacidade	61
Figura 35 – Análise ANOVA do Módulo de Young	63
Figura 36 – Variability do Módulo de Young	63
Figura 37 – Análise ANOVA da Tensão de Escoamento	64
Figura 38 – Variability da Tensão de Escoamento	64
Figura 39 – Análise ANOVA da Tensão de Ruptura	65
Figura 40 – Variability da Tensão de Ruptura	65
Figura 41 – Análise ANOVA da Deformação na Ruptura	66
Figura 42 – Variability da Tensão de Ruptura	66
Figura 43 – Análise ANOVA da Tenacidade	67
Figura 44 – Variability da Tenacidade	67
Figura 45 – Dados Reologia - Filamento Sem Pigmento.	75
Figura 46 – Dados Reologia - Filamento Azul.	75
Figura 47 – Dados Reologia - Filamento Vermelho.	75
Figura 48 – Dados Reologia - Filamento Amarelo.	76
Figura 49 – DSC do filamento sem pigmento.	77
Figura 50 – DSC do filamento azul.	77
Figura 51 – DSC do filamento vermelho.	78
Figura 52 – DSC do filamento amarelo.	78
Figura 53 – TGA do filamento sem pigmento.	79
Figura 54 – TGA do filamento azul.	79
Figura 55 – TGA do filamento vermelho.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes da impressora	44
Tabela 2 – Massa da amostra antes do ensaio	49
Tabela 3 – Fatores do DOE do IFSC-SC	50
Tabela 4 – Fatores do DOE da EESC	51
Tabela 5 – Parâmetros fixos de Impressão	51

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 – Temperaturas de transição vítrea, cristalização e fusão a partir do DSC 54
- Quadro 2 – Cálculo da porcentagem de cristalinidade a partir dos dados do DSC . 55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	acrylonitrilo Butadiene Styrene – Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials – Sociedade Americana para Ensaios de Materiais
CAD	Computer Aided Design
CP	Corpo de Prova
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DOE	Design of Experiments
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EPB	Extrusion-Based Processes
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication – Fabricação por Filamento Fundido
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy
HDPE	High Density Polyethylene – Polietileno de Alta Densidade
MA	Manufatura Aditiva
LDPE	Low Density Polyethylene – Polietileno de Baixa Densidade
PE	Polyethylene - Polipropileno
PLA	Poly Lactic Acid - Poli Ácido Láctico
STL	Standart Tessellation Language
TGA	Thermogravimetric Analysis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	27
2.1	Objetivos Específicos	27
3	EMBASAMENTO TEÓRICO	29
3.1	Considerações sobre Materiais Poliméricos	29
3.2	Considerações sobre a Manufatura Aditiva	31
3.3	Considerações sobre a tecnologia FDM: Fused Modeling Deposition	34
3.4	Materiais para Manufatura Aditiva	39
3.5	Conceitos sobre Planejamento de Experimentos	40
4	MATERIAIS	43
4.1	Equipamento de Impressão 3D e Softwares de Interface	43
4.2	Filamento	46
5	MÉTODOS	47
5.1	Estudo Microestrutural	48
5.1.1	Ensaio Reológico - Reometria Capilar	48
5.1.2	Ensaio Termogravimétrico	49
5.1.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	50
5.2	Estudo Macroestrutural	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
6.1	Análises Microestruturais	53
6.1.1	Ensaio Reológico	53
6.1.2	Ensaio Termogravimétrico	54
6.1.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	54
6.2	Ensaio Macroestrutural e Análise do DOE	56
6.2.1	DOE IFSC	56
6.2.1.1	Módulo de Young	57
6.2.1.2	Tensão de Escoamento	58
6.2.1.3	Tensão de Ruptura	59
6.2.1.4	Deformação na Ruptura	60
6.2.1.5	Tenacidade	61
6.2.2	DOE EESC	62
6.2.2.1	Módulo de Young	63

6.2.2.2	Tensão de Escoamento	64
6.2.2.3	Tensão de Ruptura	65
6.2.2.4	Deformação na Ruptura	66
6.2.2.5	Tenacidade	67
7	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	73
	APÊNDICE A – RESULTADOS - REOLOGIA DOS FILAMENTOS	75
	APÊNDICE B – RESULTADOS - GRÁFICOS DO DSC DOS FILA- MENTOS	77
	APÊNDICE C – RESULTADOS - TGA DOS FILAMENTOS	79

1 INTRODUÇÃO

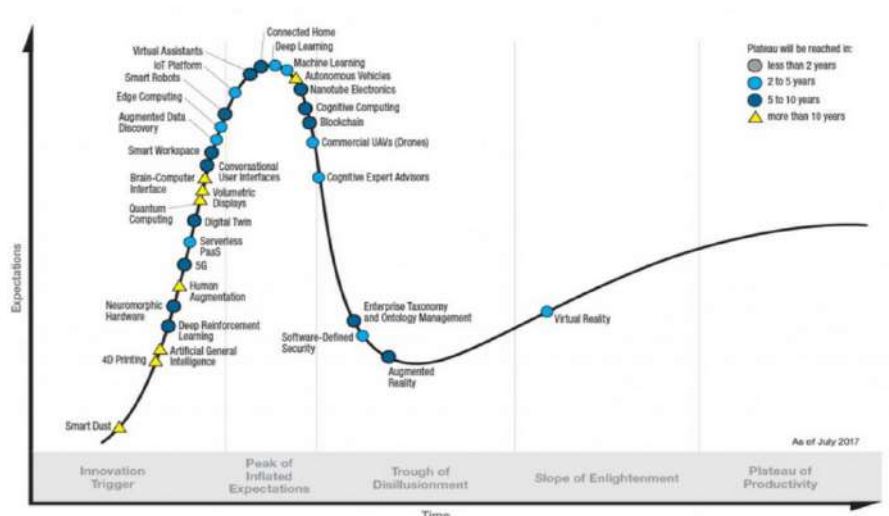
A evolução do conceito de “produto”, desde sua concepção básica como meio de sobrevivência do ser humano, na Era Paleolítica até o contexto atual, envolve fluxos não-triviais de informações, dada sua expansão conjugada com processos e serviços. Segundo [Hu \(2013\)](#), o conceito de globalização e as demandas pela variedade de produtos derivou o conceito de produto baseado na intercambiabilidade durante os anos de 1920, para o produto com “customização em massa”, caracterizado pela flexibilidade e reconfiguração. O rápido desenvolvimento da tecnologia da informação, em específico das tecnologias tridimensionais, impulsionou uma nova categoria de produto sob demanda com alto grau de personalizado centrado na diferenciação pelo valor ([HU, 2013](#)). Nessa nova dinâmica de projeto, os stakeholders passam a interagir com a equipe de projeto, influenciando e participando no processo de criação e inovação (co-design). Tecnologias tridimensionais são fundamentais nesse novo cenário, como por exemplo, realidade aumentada, Internet das Coisas e a Tecnologia aditiva ([GARTNER, 2017](#)), que permitem a interação dos diferentes usuários ao longo do ciclo de vida do produto.

O relatório [Gartner \(2017\)](#) acompanha anualmente as tendências das novas tecnologias (chamados de Hype Cycles, nos quais aponta tecnologias emergentes associando seu grau de maturidade). O conceito da indústria 4.0 é agrupar um conjunto de tecnologias/técnicas que criem um modelo industrial baseado na autonomia e minimização de erros durante os processos produtivos, dentro de um modelo de manutenção preditiva. Com relação ao grau de desenvolvimento da MA pode-se observar desdobramentos em diversas frentes de aplicações: o gráfico gerado para o ano de 2015 a MA estava subdividida em três categorias (3D Bioprinting Systems for Organ Transplant, Consumer 3D Printing e Enterprise 3D Printing). Deste período até meados de 2018, os modelos de negócios envolvendo equipamentos de manufatura aditiva e impressoras 3-D do tipo “low-end” ultrapassaram o pico de expectativa e o vale da desilusão, estabelecendo-se no cenário sócio industrial. Essa condição é real para países mais industrializados: os equipamentos industriais de diversas técnicas aditivas estão consolidados, como método de fabricação direta ou híbrida para componentes e peças customizadas ou com alto grau de personalização. Os modelos de negócios dos poucos fabricantes mundiais de equipamentos de MA industriais têm se mesclado com a venda do produto-serviços (Servitização) pelo elevado custo/preço da matéria-prima e manutenção.

A impressão 4-D envolve o uso de técnicas aditivas conjugadas com o desenvolvimento de materiais avançados de engenharia, com propriedades físico-químicas e mecânicas projetadas que variam no tempo (4^a. Dimensão), com potenciais aplicações em nanotecnologia, biofabricação, saúde, aeronáutica, aeroespacial, defesa e, também bens de consumo

(indústria têxtil, automotiva).

Figura 1: Curva do tempo versus o grau de maturidade tecnológica.



Fonte: [Gartner \(2017\)](#)

Pela facilidade de implementação mecânica e menor custo, por exemplo, a técnica aditiva por extrusão é amplamente utilizada nas impressoras 3-D de baixo custo e, também um dos focos de pesquisa com materiais não-metálicos, ou com carregamento de materiais cerâmicos e metálicos. Porém, como citado anteriormente há uma série de parâmetros que influenciam a qualidade micro e macroestrutural das peças finais, que devem ser investigados e calibrados para cada tipo de aplicação.

([GALANTUCCI et al., 2015](#)) citam que a exatidão e precisão dimensional de peças produzidas pela técnica FFF 3-D pode ser afetadas por fatores relacionados com o comportamento do material, como por exemplo, variações na geometria dos filamentos depositados em relação a forma cilíndrica de referência, influenciando diretamente na integridade da impressão e aumentando o volume de material depositado e também causando contração das camadas e falhas de adesão com as primeiras camadas geradas. Sobre os parâmetros de processo, há influência do tipo e diâmetro do bico de deposição; espessura e largura das camadas, velocidade de impressão/deposição, perfil de temperatura. Com o surgimento do primeiro equipamento de fotopolimerização há cerca de 30 anos, manufatura aditiva como tecnologia tem sido aprimorada em diversas frentes de pesquisa e aplicações. O movimento “maker” iniciado com as pesquisas desenvolvidas nas universidades de Bath (Rep Rap) e Universidade de Cornell (Fab@home), a partir da abertura da patente “FDM” concebida pela empresa Stratasys popularizou as primeiras impressoras low-end baseadas no processo aditivo por extrusão (ASTM F2792-12a), especificamente o método FFF (Fused Filament Fabrication). Segundo [Wittbrodt e Pearce \(2015\)](#) esse movimento gerou a demanda pela educação de como utilizar e aplicar essa técnica.

A matéria-prima utilizada para o método aditivo de extrusão (FFF 3-D), nas impressoras low-end é sólida, conformada sob a forma de filamentos. Os “prossumidores” de impressoras 3-D, uma categoria de usuário que une fornecedor e consumidores (usuários) tem acesso a uma variedade de matéria-prima filamentar, como por exemplo, ABS, Nylon* (poliamidas), polietileno de alta densidade, poliestireno de alto impacto e PLA (WITTBRODT; PEARCE, 2015).

O PLA apresenta características interessantes para diversas aplicações, incluindo geração de protótipos visuais, peças finais sem grandes restrições à resistência mecânica, mas também em aplicações de bioengenharia, como material biodegradável.

O uso do PLA, como material de extrusão para impressoras 3-D de baixo custo (low-end) apresenta algumas vantagens, frente a outros materiais, incluindo características reológicas, como ponto de fusão relativamente baixo, cerca de 150-160°C, que requer pouca energia para sua impressão, opção seguro quanto a toxicidade, comparado com o ABS, incluindo aplicações médicas, devido sua capacidade de degradação em meio aquoso e sua biocompatibilidade (HARRISON et al., 2004), porém apresenta taxas de degradação, ainda como filamento. Suas propriedades podem ser modificadas pelos processos de copolimerização, tratamento de superfície, stereocomplexation ou formação de blendas, melhorando alguns aspectos das suas propriedades químicas/mecânicas e permitindo a abrangência de seu uso ((ANDERSSON et al., 2010)(HILTUNEN et al., 1996)(FUKUSHIMA; KIMURA, 2006)).

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é avaliar o comportamento mecânico de corpos de prova gerados, em dois equipamentos de impressão 3-D do tipo low-end de diferentes fabricantes, por meio de um estudo de sensibilidade paramétrica.

2.1 Objetivos Específicos

Estabelecimento de um método para estudo da influência do material na manufatura aditiva com análise micro e macroestrutural. Para as análises microestruturais serão utilizados os ensaios de reometria, calorimetria exploratória diferencial e termogravimetria. Para as análises macroestruturais serão feitos ensaio de tração dos corpos de prova impressos.

Para compor o planejamento de experimentos (Design of Experiments) serão selecionados parâmetros de deposição e parâmetros de controle do processo, para entender diferentes combinações desses parâmetros e, então analisar as sensibilidades paramétricas com as respostas obtidas.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 Considerações sobre Materiais Poliméricos

Segundo Callister (2000), materiais poliméricos são compostos orgânicos com sua estrutura principal formada por carbono, hidrogênio e outros elementos não metálicos possuindo grandes cadeias moleculares. Possuem inércia química na maioria dos ambientes, baixa condutividade elétrica e não apresentam magnetização. Ashby (2005) ainda os define como materiais de engenharia caracterizados por baixo módulo de elasticidade, propriedades com grande dependência da temperatura e variação de estrutura (amorfa e cristalina).

Figura 2: Divisões dos tipos de materiais de engenharia.



Fonte: Ashby (2005)

Existem também os materiais compostos, que são a junção de pelo menos dois tipos de materiais diferentes. Essa junção entre diferentes materiais faz com que as propriedades mecânicas e químicas mudem, podendo ser alteradas conforme a necessidade de características.

Mano (2004) explica que a natureza das propriedades mecânicas dos polímeros está diretamente ligada a resistência das ligações covalentes, a rigidez entre os segmentos na cadeia e a resistências das forças intermoleculares.

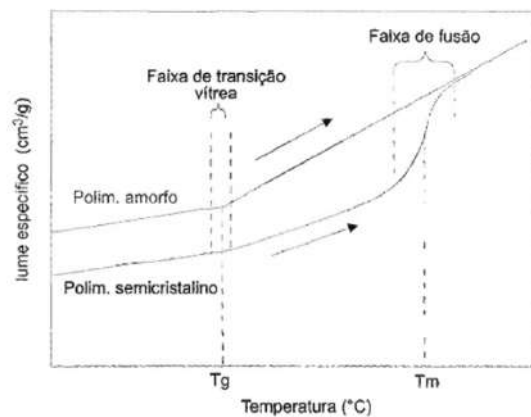
Canevarolo (2002) afirma que a cristalinidade de um polímero está fortemente ligada as suas propriedades físicas, mecânicas e termodinâmicas. Cristalinidade é o arranjo ordenado de cadeias, com uma certa repetição de grupos atômicos ou moleculares. Esse ordenamento entre cadeias é resultado de alguns aspectos do polímero, entre eles constituição química, tamanho molecular e estrutura secundária.

A estrutura do polímero afeta seu comportamento térmico. Conhecer sua estrutura é indispensável para entender o comportamento termo-mecânico. Polímeros tem pelo menos três temperaturas: temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão cristalina (T_m) e temperatura de cristalização (T_c).

A temperatura de transição vítrea é a temperatura na qual as cadeias amorfas do polímero ganham mobilidade. Após a T_m o polímero está num estado borrachoso (REF). Antes disso, o polímero não possui energia suficiente para que suas cadeias se desloquem.

A temperatura de fusão cristalina é aquela que a fase cristalina do polímero desaparece pois tem energia suficiente para que as forças intermoleculares secundárias se desfaçam. Nesse ponto, o polímero encontra-se num estado viscoso.

Figura 3: Gráfico do aumento do volume específico de acordo com a temperatura.



Fonte: Canevarolo

Por fim, a cristalização polimérica acontece no resfriamento, durante uma faixa de temperatura. Assim, comumente, se define a T_c como a temperatura na qual o polímero se tem a maior taxa de cristalização. A taxa de resfriamento pode ser responsável pelo aumento ou diminuição da cristalinidade do polímero.

Para se conhecer a T_g e a T_m de um polímero, bem como sua cristalização, é utilizado a calorimetria exploratória diferencial. O DSC é uma técnica que permite a medição de energia dada a um material de amostra e a uma referência para que se observe os efeitos de calor. Os efeitos de calor são associados a transições de fase, reações de dissociação, decomposição, óxido-redução ou qualquer outra reação que apresente uma variação de calor. Variações de entropia (transições de segunda ordem) também podem ser observadas, como transição vítrea de certos polímeros.

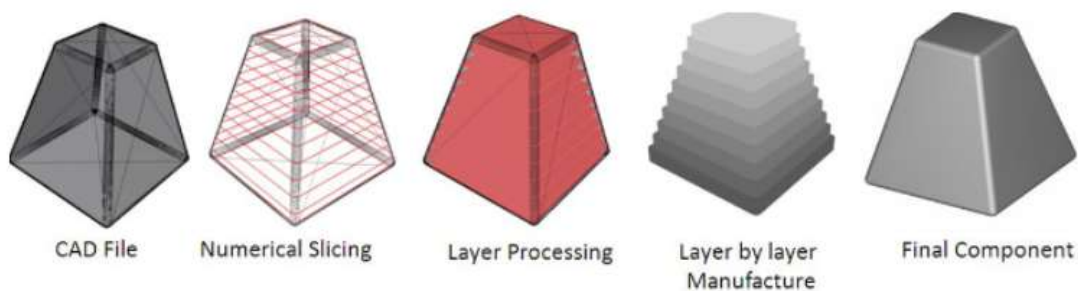
3.2 Considerações sobre a Manufatura Aditiva

Os processos de MA posicionam, unem a/ou transformam entidades columpetricas primitivas (voxels) de matéria-prima para construção do objeto final. Cada formato e tamanho de voxel, bem como a resistência dos princípios de estruturação física utilizado entre os voxels são determinados pelo tipo de matéria-prima, equipamento de manufatura (tais como, características de precisão da plataforma, geometria do bico (FDM), comprimento de onda (luz, laser ou feixe de elétrons) e os parâmetros de processo, tais como temperatura do bico de injeção, intensidade da luz ou feixe de elétrons, velocidade na direção transversal, entre outros (THOMPSON et al., 2016).

Além dessas características, a geometria da peça é determinada por estratégias de varreduras e deposição ou combinação de ambas. Dessa forma, a filosofia e fabricação, DfMA – Design for Additive Manufacturing, permite a fabricação de peças sem a necessidade de ferramentas intermediárias de processamento de forma.

Klahn, Leutenecker e Meboldt (2015) compara MA com métodos tradicionais de manufatura (subtrativa e de conformação) expondo suas vantagens, tais quais, redução de tempo de manufatura para peças complexas, não necessidade de ferramental, alta capacidade de personalização sem grandes impactos no custo e redução do uso de matéria prima.

Figura 4: Etapas do processo de criação de uma peça.

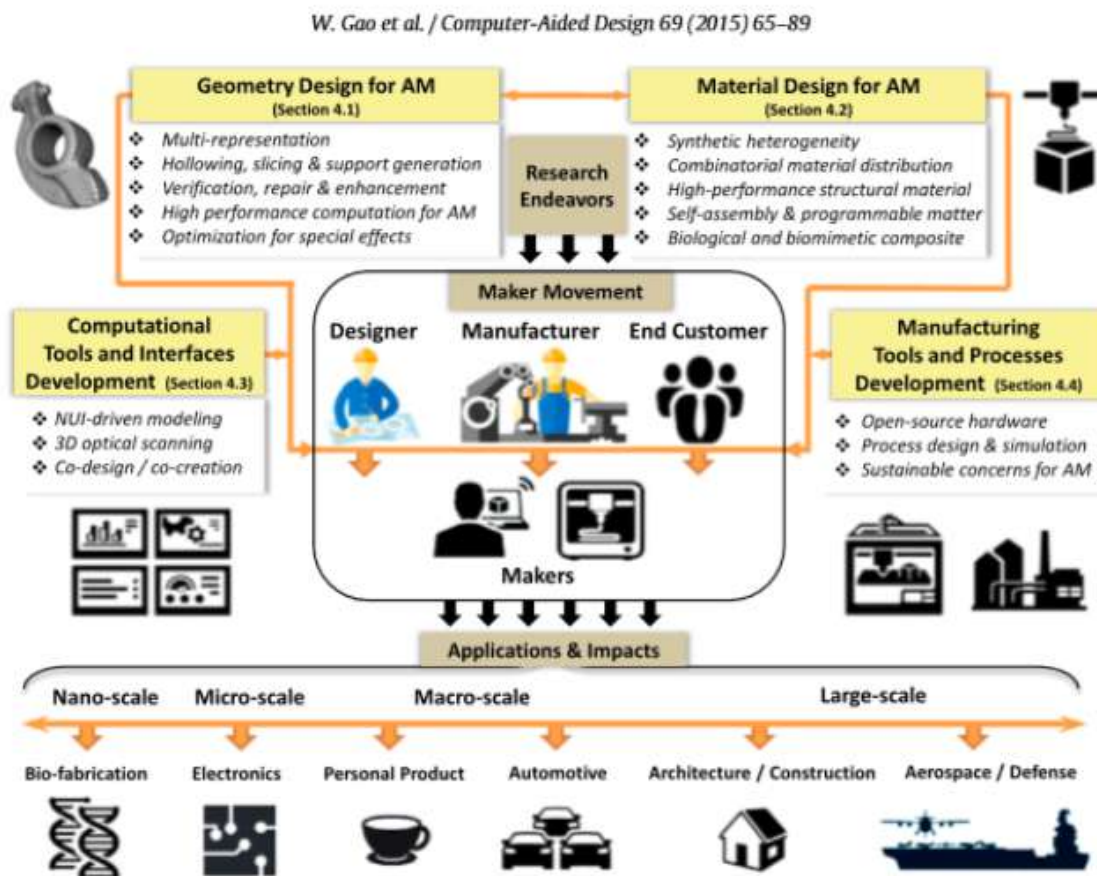


Fonte:GAO

A natural melhoria de outras tecnologias da sociedade atual, têm contribuído para que a MA se classifique como opção de fabricação principalmente de produtos e peças industriais e bens de consumo, junto à manufatura subtrativa (redução de massa) e a manufatura de conformação (massa é conservada). Essa realidade é verdadeira em países industrializados, com investimento efetivo nas áreas de Pesquisa e Desenvolvimento, notadamente Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido, Dinamarca e Holanda, e também países como Portugal e França.

No Brasil, as constantes alterações do cenário sócio-econômico nas últimas décadas

Figura 5: Fluxo do processo de MA.



Fonte: GAO

têm atuado como um fator de atraso tecnológico ou mesmo de interrupção, em vários segmentos industriais, incluindo setores de grande potencial competitivo, como Commodities e Indústria de Agricultura. Esse cenário só não se torna absolutamente restritivo, devido à esforços pontuais de centros de pesquisa públicos localizados em universidades, e pólos de tecnologia.

A utilização do conceito de DfMA ainda é incipiente no Brasil, com concentração de equipamentos industriais de MA em algumas empresas e, uso de impressoras 3-D do tipo low-end para algumas instituições de ensino superior e tecnológico, notadamente na região Sudeste e Sul e para o público geral: hobbistas, escritórios de arquitetura e engenharia. Dessa forma, a discussão sobre o conceito de DfMA, com boas práticas de uso da tecnologia de MA, por meio de impressoras 3-D de baixo custo é uma forma de efetivar a inclusão digital dos indivíduos da sociedade, com um caminho bastante natural pelos ambientes de ensino e pesquisa.

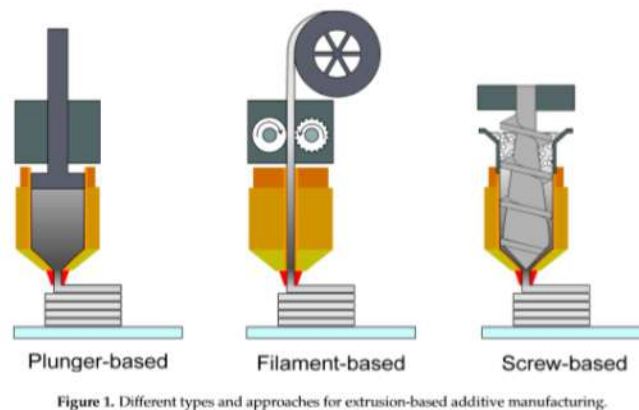
No cenário educacional, há recentes esforços para que os alunos do ensino tecnológico e de cursos de graduação tenham contato com, em um primeiro cenário: uso da impressora 3-D para geração de protótipos e peças funcionais, com foco no processo de fabricação; e em um segundo cenário adoção da filosofia de DfMA. Barou e Cincou (2015) discutem a introdução do uso de impressoras 3-D do tipo low-end nos cursos de graduação em engenharia mecânica e aeronáutica com estudo de caso realizado na Ecole Polytechnique da Universidade de Montreal, Canadá, considerando a abordagem didática “Conceito-Projeto-Implementação e Operação”. Esse conceito considera sistemas reais e produtos da vida cotidiana para resolução de problemas. No estudo de caso, os alunos interagiram diretamente com a tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), uma das técnicas da MA, desde o pré-processamento ao pós-processamento para obtenção da peça final (tais como: conjunto de parafuso-porca, chaves de fenda, peças customizadas).

Os autores concluíram que, a introdução de equipamentos de impressão 3-D é uma eficiente e fativa contribuição pedagógica para a compreensão da teoria de cursos específicos, com ciência dos materiais, processo de fabricação, reforçados pela prática com equipamentos de MA, mesmo de baixo custo. Klot et al. (2014) apresentaram um estudo mais lúdico utilizando a impressão 3-D, como meio de promover a interface entre indivíduos sedentários e os resultados de exercícios físicos monitorados, por meio da geração e artefatos impressos por técnica FDM. Esses artefatos representaram fisicamente alguns resultados de exames clínicos como por exemplo, os batimentos cardíacos de cada indivíduo.

3.3 Considerações sobre a tecnologia FDM: Fused Modeling Deposition

As técnicas aditivas baseadas em extrusão de material, EBP (Extrusion-Based Processes) consistem na deposição de matéria-prima no estado sólido (sob a forma de filamento, viscosa ou granular/pó), que flui por meio de uma restrição mecânica, normalmente um bico com diâmetro calibrado. A geometria é construída camada por camada, com diversos movimentos combinados entre mesa (coordenadas x-y ou z) e o cabeçote de impressão (z-x), com incremento de altura na mesa correspondente ao valor da espessura de cada camada [Gibson, Rosen e Stucker \(2010\)](#) e [VOLPATO et al. \(2017\)](#).

Figura 6: Tipos de cabeçote de extrusão.



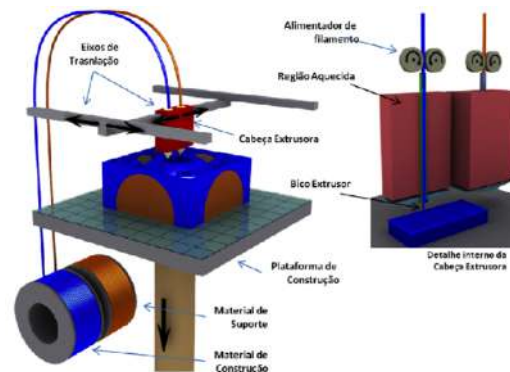
Fonte: [Neto \(2013\)](#)

A Figura 7 apresenta uma vista esquemática do mecanismo mais utilizado em equipamentos baseados na patente FDM (Fused Deposition Modeling) concebida pela empresa, da empresa Stratasys® e expirada em 2007, bastante difundido para impressoras 3-D do tipo low-end.

Comparada com outros processos aditivos, a extrusão é um processo de deposição lento devido, por exemplo, a movimentação mecânica dos eixos na ordem de décimos de milímetros, escolha do fator de preenchimento e trajetória de deposição. O filamento extrudado pelo bico calibrado, normalmente apresenta um “inchamento” como nos processos de fabricação com polímeros, que ocorre como uma dissipação da energia elástica armazenada, produzindo uma seção transversal parecida com uma elipse. Essa geometria melhora a adesão entre as camadas geradas a cada incremento dos subconjuntos cabeçote e base de deposição.

Assim, os principais parâmetros relacionados com a seção transversal do filamento são: largura do filamento (menor diâmetro da elipse); largura da camada (maior diâmetro da elipse); distância do bico até a mesa; gap (espaçamento lateral), com relação a distância

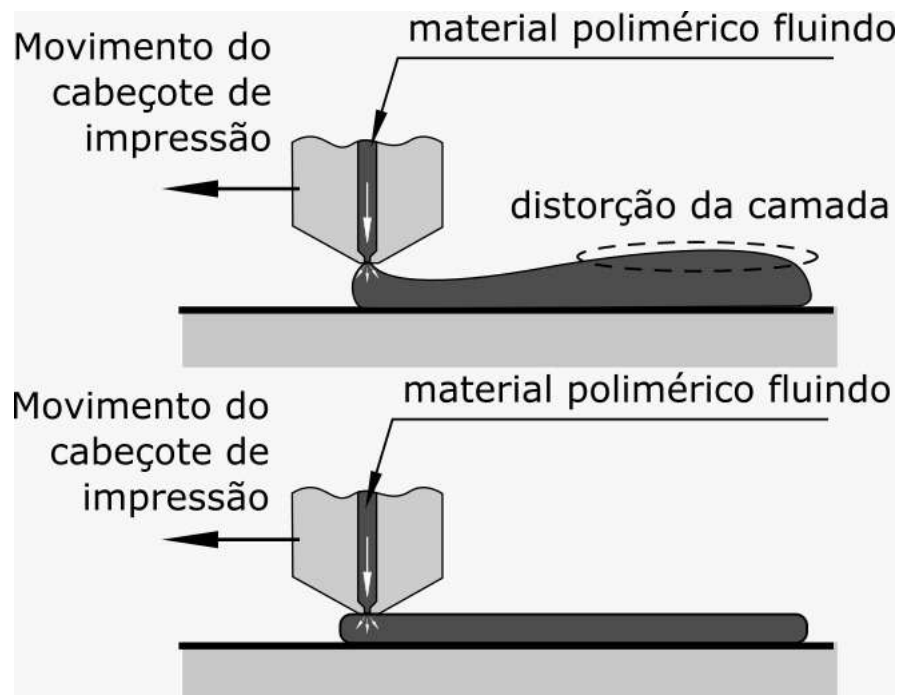
Figura 7: Representação esquemática do subsistema de deposição de uma impressora baseada no conceito de extrusão por filamento..



Fonte:Joamim Gonzalez

linear entre as bordas dos diâmetros maiores da camada e a distância entre dois filamentos (centro a centro dos filamentos). Na figura 8 mostra-se a importância da distância do bico na conformidade da superfície da camada.

Figura 8: Representação esquemática do subsistema de deposição de uma impressora baseada no conceito de extrusão por filamento..

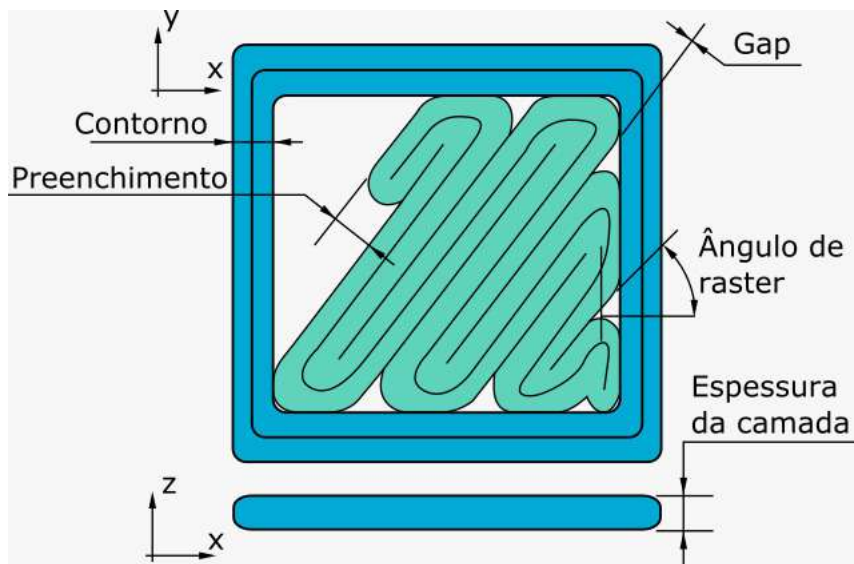


Fonte: Turner, Strong e Gold (2014)

Os parâmetros básicos de controle do processo são: quantidade de camadas do contorno (que define o perímetro das paredes externas); ângulo de raster; largura de

preenchimento, em função do tipo de preenchimento, dado por meio de estratégias de deslocamentos (lineares, concêntricos, combinação de ambos, para equipamentos comerciais e impressoras 3-D do tipo low-end); espessura de camada (distância entre extremidades dos filamentos depositados) como na figura 9.

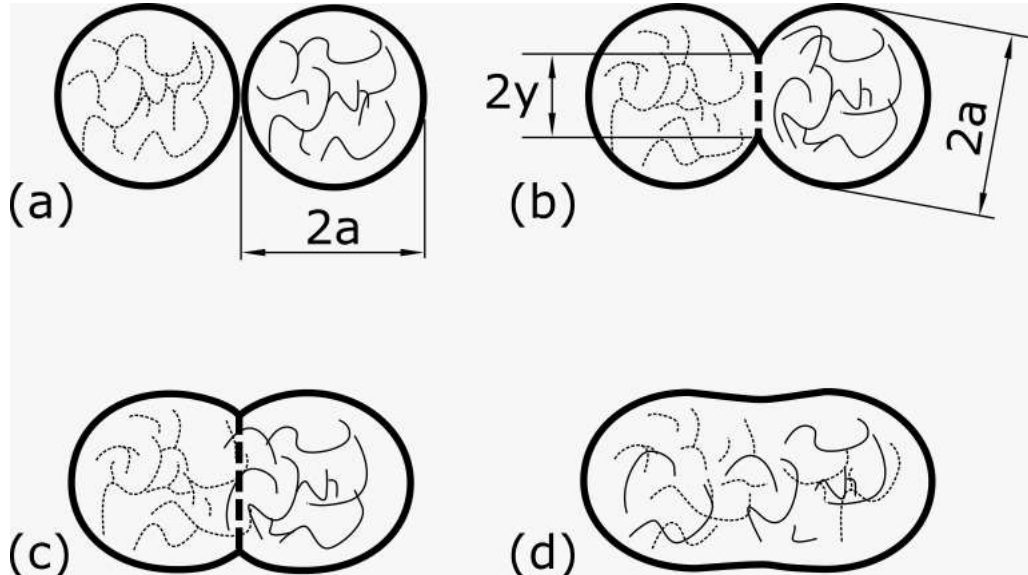
Figura 9: Estruturas de construção formadas e parâmetros.



Fonte:Joamim Gonzalez

Cabe ressaltar a presença de espaços vazios em algumas regiões, nas quais o bico não tem acesso entre a parede e a forma de preenchimento interno, causando a porosidade inerente desse processo. Esses parâmetros são pré-definidos ou calibrados para diferentes impressões, nos equipamentos comerciais. Sun (2008) estuda a aderência entre as camadas, sendo a adesão uma característica fundamental para garantir a qualidade final da peça. A adesão pode ser analisada entre os filamentos adjacentes numa mesma camada e nas camadas sucessivas. A falta desse contato, ou contatos que gerem deformações excessivas geram uma maior quantidade de vazios internos, portanto menor resistência mecânica. O processo de adesão ocorre entre as interfaces das camadas e foi apresentado por Bellehumeur et al. (2004) e Sun et al. (2008) como mostrado na figura 10.

Figura 10: Difusão entre as camadas impressas. Em (a) existe o contato inicial entre as camadas, em (b) inicia-se a formação de pescoço, (c) ocorre a interdifusão entre as cadeias e o aumento do pescoço, (d) ocorre a randomização das cadeias poliméricas entre caminhos adjacentes.



Fonte: Adaptado de [Turner, Strong e Gold \(2014\)](#)

Nesse aspecto da estruturação, o valor do gap é importante: valores negativos implicam na deformação entre as camadas geradas. As temperaturas do bico de extrusão e da base, bem como o gradiente de tempo para gerar a trajetória de deposição são fundamentais no controle do processo. O tempo para se formar o “empescoamento” entre as camadas, bem como promover a força de adesão tem um comportamento complexo, entre todas os parâmetros citados. O tempo até a temperatura de fusão do polímero deve ser garantido, e variações próximas a temperatura de transição vítrea pode alterar o perfil de aquecimento do material. Portanto, quanto menor o tempo entre as deposições, maior temperatura e por consequência melhor aderência entre as camadas.

Ainda, a orientação de construção que é a orientação das camadas da peça de acordo com a base. [Sood, Ohdar e Mahapatra \(2012\)](#) mostram que essa orientação provoca uma diferença drástica nas propriedades mecânicas e a peça impressa é anisotrópica. [Cicala \(2018\)](#) ainda sugere a correlação entre as características do polímero, como sua reologia e propriedades térmicas com a qualidade de impressão. As técnicas aditivas por extrusão requerem normalmente, durante a geração do protótipo estruturas de suporte para compensar áreas (volumes) que não são paralelas com a base de deposição, tanto em suspensão, quanto em superfícies negativas.

Segundo [VOLPATO et al. \(2017\)](#) e [Gibson, Rosen e Stucker \(2010\)](#) a técnica aditiva por extrusão utilizando filamentos apresenta como características vantajosas:

simplicidade no princípio físico para deposição de camadas; grande variedade de filamentos (termoplásticos), inclusive de uso industrial e, portanto, mais estáveis tanto mecânica, quanto quimicamente; não requer pós-cura, e grande manufatura de geometrias complexas.

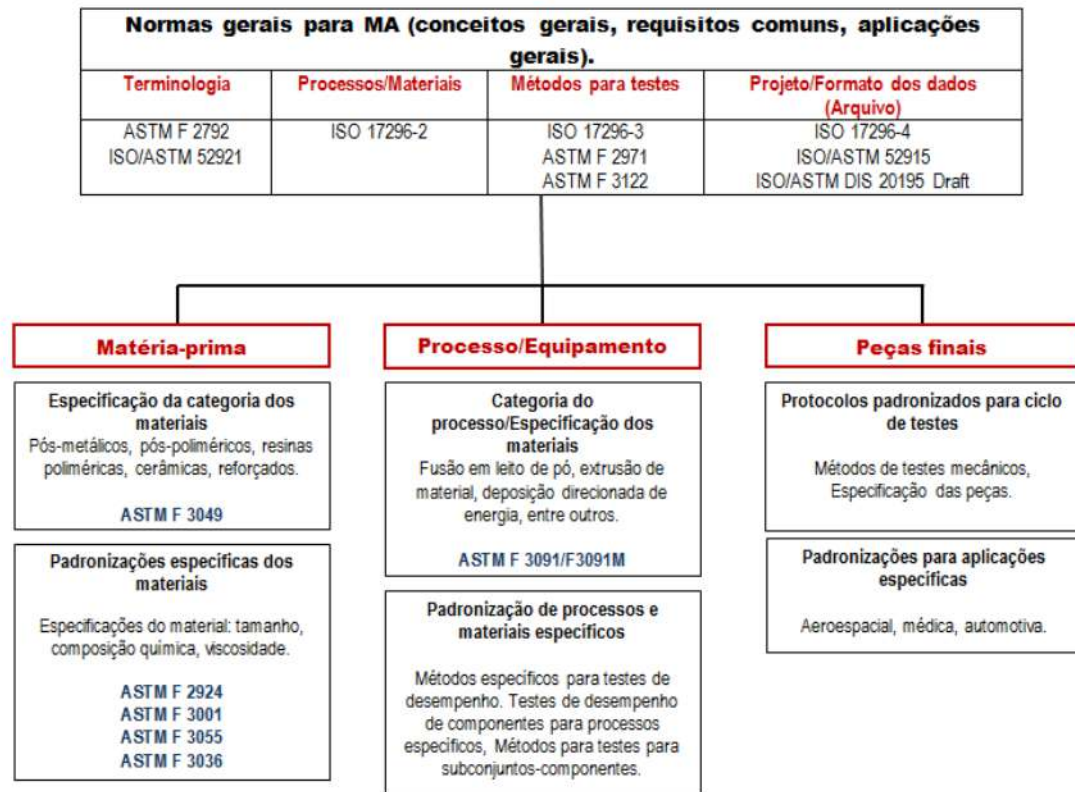
A facilidade da construção mecânica, impulsionou o conceito de impressoras 3-D denominadas “low-end”, estendendo a tecnologia de manufatura aditiva entre usuários não comerciais.

As principais limitações dessa técnica, segundo [VOLPATO et al. \(2017\)](#) e [Garg, Tai e Savalani \(2014\)](#) são: baixa precisão/resolução dimensionais vinculadas ao diâmetro do bico injetor; necessita de estruturas de suporte para geração de geometrias com regiões em suspensão ou negativas com ângulo menor do que ângulo de suporte. A quantidade de material para essa condição, pode elevar o custo/preço da peça final e tendo, estrutura de suporte, há necessidade de pós-processamento (retirada manual de forma mecânica ou com uso de soluções químicas).

As normas atualizadas dos grupos de trabalho com Manufatura Aditiva são organizadas pela Organização Internacional para padronização (International Organization for Standardization - ISO/TC 261) e pela American Society for Testing and Materials (ASTM F42). De acordo com [Thompson et al. \(2016\)](#) há um consenso em se relacionar a MA como uma metodologia e ferramenta de projeto, exemplificada pela norma ISO/ASTM DIS 20195 “Guide for Design for Additive Manufacturing” <https://www.iso.org/standard/67289.html> (em desenvolvimento).

As padronizações se referem à terminologia, processos individuais, cadeias do processo (hardware e software), procedimentos de testes, parâmetros de qualidade, acordos entre usuários e fornecedores e elementos fundamentais. A Figura 11 apresenta as padronizações utilizadas pela ISO e ASTM para MA.

Figura 11: Normas ASTM e ISO para a Manufatura Aditiva.



Fonte: Traduzido de [Thompson et al. \(2016\)](#)

3.4 Materiais para Manufatura Aditiva

Os materiais disponíveis para a técnica FDM, na qual a matéria-prima se configura em estado sólido, são fornecidos por meio de filamentos arranjados em carretéis. Para as impressoras 3-D do tipo low-end esse material é fornecido sem identificação precisa dos fornecedores. Para os equipamentos industriais, há selagem física do material, com um sistema eletrônico de rastreamento.

Segundo [VOLPATO et al. \(2017\)](#) há uma série de materiais disponíveis no mercado. Os equipamentos industriais de Manufatura aditiva, em específico aqueles baseados na técnica FDM, possui um sistema eletrônico de identificação tornando os filamentos rastreáveis e, portanto, toda matéria-prima para essa classe de equipamento são adquiridos junto ao próprio fabricante.

A empresa Stratasys Ltd disponibiliza filamentos comerciais, como por exemplo: ABS (acrilonitrila butadieno estireno); ABSi (translúcido), ABS-ESD7 (com propriedades elétricas); Poliamida (Nylon® 12), com maior resistência mecânica, para fabricação de peças industriais) e ABS-M30i (material biocompatível, não implantável, esterilizável, de acordo com a norma ISO 10993 e USP classe VI).

Para os materiais não rastreáveis, temos uma gama enorme de opções de fornecedores e alguns tipos de polímeros termoplásticos utilizados. Entre eles se destacam o ABS e o PLA, porém existem outros como PC, PC-ABS, filamentos flexíveis, filamentos solúveis, com reforço.

O ABS é um termoplástico amorfo formado por três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. Ele possui microestrutura amorfa e suas propriedades mecânicas são baseadas em seus monômeros. Usualmente possui propriedades mecânicas razoáveis, sendo flexíveis e resistentes.

O PLA é um biopolímero, da família dos poliésteres alifáticos. Ele é um termoplástico semi-cristalino ou amorfo, biodegradável, biocompatível, sem toxicidade. Ele é largamente utilizado em aplicações biomédicas como scaffolds, suturas, cápsulas para liberação de medicamentos (Sato, 2011). Seu monômero é o ácido láctico, uma molécula quiral que possui dois estereoisômeros o L (levógiro) e o D (dextrógiro) ácido láctico mostrados na figura 12.

Figura 12: Estrutura do monômero de ácido láctico e seus isômeros.



Fonte: Jahno (2005)

Seus monômeros podem se combinar de 3 maneiras: PLLA, PDLLA e o PDLA (figura 13). Sua combinação depende dos monômeros presentes na polimerização. O PDLA e o PLLA possuem estrutura semicristalina enquanto o PDLLA é racêmico e amorfo.

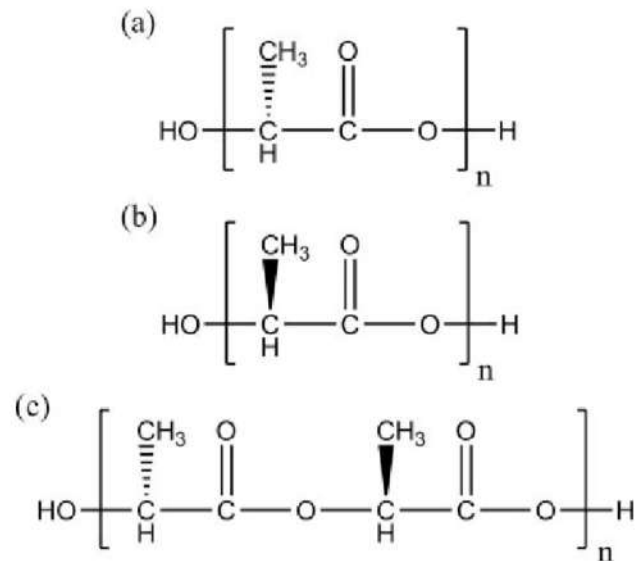
Sua síntese pode ocorrer por três vias: uma é a polimerização por abertura de anel láctico e a policondensação direta de ácido láctico. Dependendo da via de polimerização há a necessidade de catalisadores.

3.5 Conceitos sobre Planejamento de Experimentos

Há dois principais tipos de abordagem para se realizar Planejamento de Experimentos: variando um fator de cada vez (One Factor at a Time - OFAT) ou variando todos os fatores (Design of Experiments - DOE). O DOE é uma abordagem mais recente e pode oferecer maior conhecimento sobre o experimento.

O objetivo principal do DOE é investigar as interações que ocorrem entre os fatores e sobre a resposta estudada. Essa abordagem não pode ser feita se fosse variado um

Figura 13: Estrutura química do (a) PLLA, (b) PDLA e (c) PDLLA.



Fonte: [Chan et al. \(2018\)](#)

fator de cada vez. Se os níveis pré-estabelecidos dos fatores (ou parâmetros) fornecerem boas condições iniciais de estudo, as análises dos (e entre os) efeitos principais sobre as respostas podem gerar, com a utilização de um modelo de regressão, superfícies de respostas estatisticamente representativas entre a resposta e o conjunto de fatores de interesse.

De acordo com Montgomery (2001), o planejamento experimental pode ser dividido nas seguintes etapas: a) determinação das variáveis de maior influência nos resultados; b) atribuição de valores às variáveis de influência com intuito de melhorar os resultados; c) atribuir valores a essas variáveis minimizando a influência de parâmetros incontrolláveis. As vantagens de se utilizar o DOE são: variar simultaneamente todos os parâmetros em estudo e obter uma matriz experimental com todas as combinações possíveis dos parâmetros, como opção ao planejamento tradicional empírico, no qual se altera um parâmetro de cada vez, e redução do número de ensaios.

Os planejamentos fatoriais do tipo N tem como base o número de níveis e o expoente corresponde ao número de fatores. Por exemplo, num problema definido com 3 fatores e 2 níveis, o arranjo ortogonal será de 2^3 . Portanto, haverá 8 combinações desses parâmetros, associados aos efeitos dos principais fatores (X1, X2, e X3), às iterações dos fatores (X1X2, X1X3 e X2 X3) e à interação dos três fatores (X1X2X3). Se houvesse três níveis, o número mínimo de ensaios subiria para 3^3 , ou seja, 27 experimentos. Os efeitos principais são as variações nas faces do cubo experimental, enquanto que os efeitos de interações ocorrem nos planos cruzados.

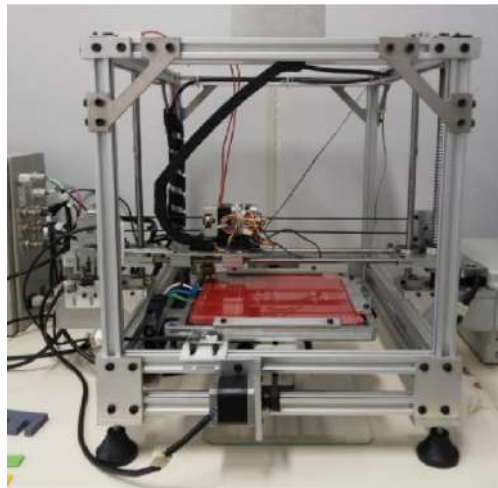
Atualmente, há ferramentas computacionais como o Mode Frontier ® e o Heeds ®, que oferecem um ambiente de projeto experimental virtual que pode ser acoplado com outros programas de engenharia (CAE), e que são constituídos de fases de pré-processamento, processamento e pós-processamento de dados. Programas estatísticos como Minitab ® e SAS ® também oferecem tratamento estatístico para a análise de sensibilidade paramétrica e montagens de superfícies de resposta.

4 MATERIAIS

4.1 Equipamento de Impressão 3D e Softwares de Interface

Para a prototipagem dos corpos de provas foram utilizadas duas impressoras 3-D do tipo “low-end”. A do Instituto Federal de Santa Catarina projetada e montada pelos alunos de graduação. Sua concepção foi baseada nas máquinas do modelo RepRap MedelMAx. Ela é feita com perfis de alumínio, motores de passo, fuso de esfera e correia, que constituem o básico da construção mecânica que permite seu funcionamento. A movimentação do cabeçote acontece nos eixos X e Z enquanto a plataforma realiza o movimento em Y (figura 14).

Figura 14: Foto da impressora IFSC-SC.



Fonte: Autora

O controle é feito por um Arduíno em conjunto com uma placa controladora que controla os motores de passo, a temperatura da plataforma e a temperatura do cabeçote além de receber os sinais dos interruptores fim de curso e sensores de temperatura. Os softwares e hardwares utilizados estão na tabela 1.

Tabela 1: Componentes utilizados para a construção da impressora.

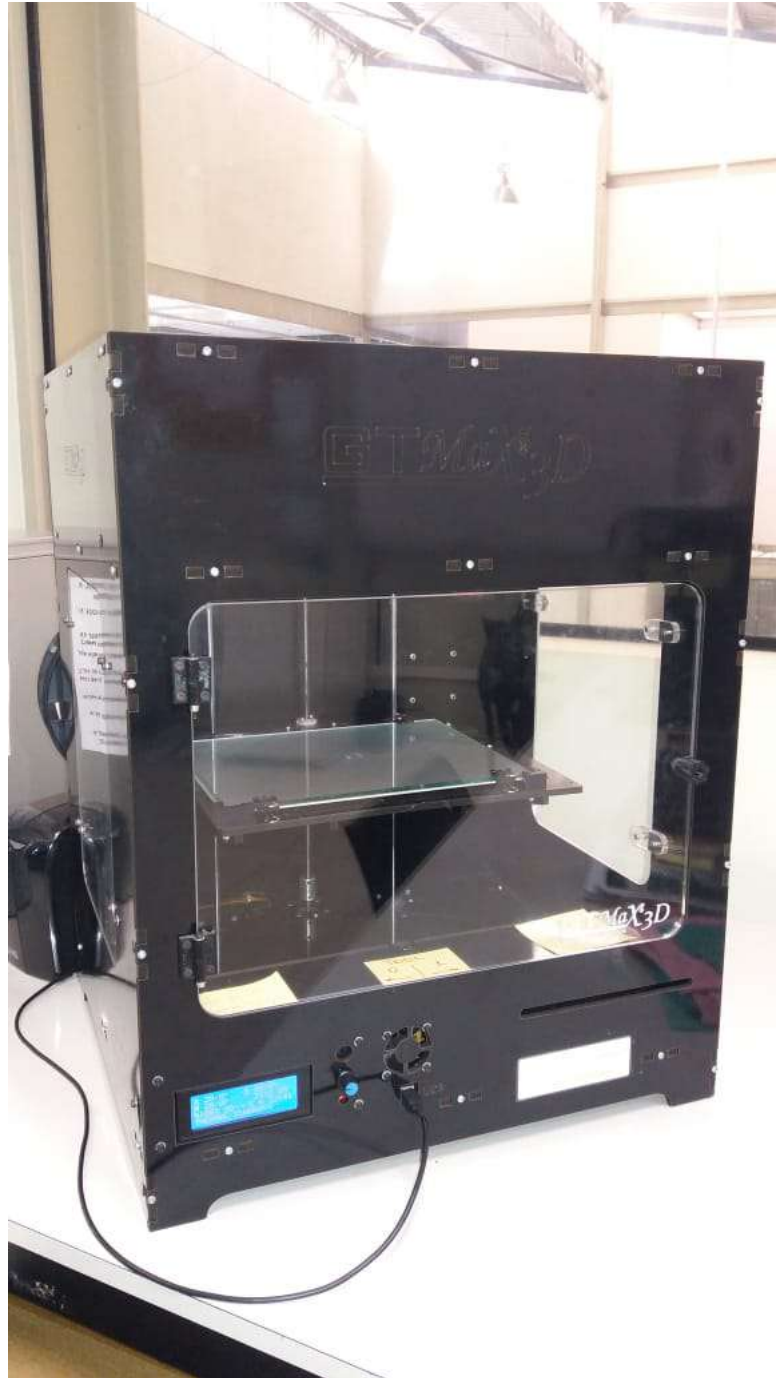
Software/Hardware	Descrição
Software host (interface)	Pronterface
Firmware	Sprinter
Arduino	Mega 2560
Controlador	Ramps 1.4
Base Aquecida	PCB Heatbed MK2
Driver motor de passo	Pololu A988
Módulo tracionador	Bulldog XL
Bico aquecido	Hotend Inóx Sethi 3D
Sensores de temperatura	Termistor 100K

Fonte: Autora.

A segunda foi adquirida pela Escola de Engenharia de São Carlos, e está localizada no núcleo de manufatura avançada (NUMA/EESC –USP). Foi comprada da empresa GTMax, localizada na cidade de Americana.

O modelo da impressora é Core A2, com o sistema de core XY. Core XY é uma solução construtiva na qual o cabeçote varre os eixos X e Y, através de uma única correia dentada, formando a camada, enquanto a mesa é movimentada no eixo Z.

Figura 15: Impressora Core A2 adquirida pelo grupo IMDT/EESC - USP.

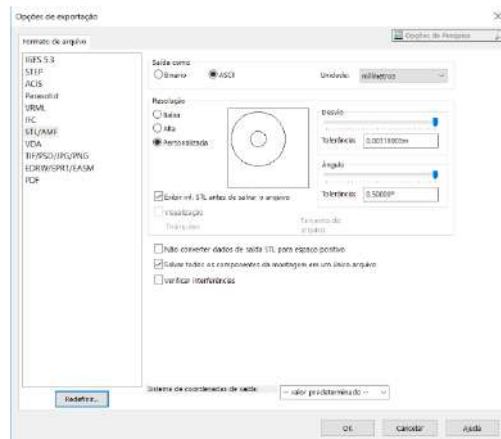


Fonte: Autora

Para geração dos modelos geométricos dos corpos de prova (figura 17), foi utilizado o software SolidWorks Educacional. Após a criação o modelo foi salvo no formato .STL com máxima resolução, refinando a malha criada, como se vê na figura 16 do software.

O programa de fatiamento utilizado para criar o código de impressão foi o Simplify 3D®. O Simplify 3-D® traduz os modelos em linhas de comando para posicionamento da

Figura 16: Parâmetros de arquivo utilizados na criação do STL dos corpos de prova.



Fonte: Autora

Figura 17: Imagem retirada do software Solid-Edge mostrando a geometria do corpo de prova.



Fonte: Autora

mesa, aquecimento do cabeçote, entrada de filamento, além de determinar qual a estratégia de caminho percorrido pelo cabeçote.

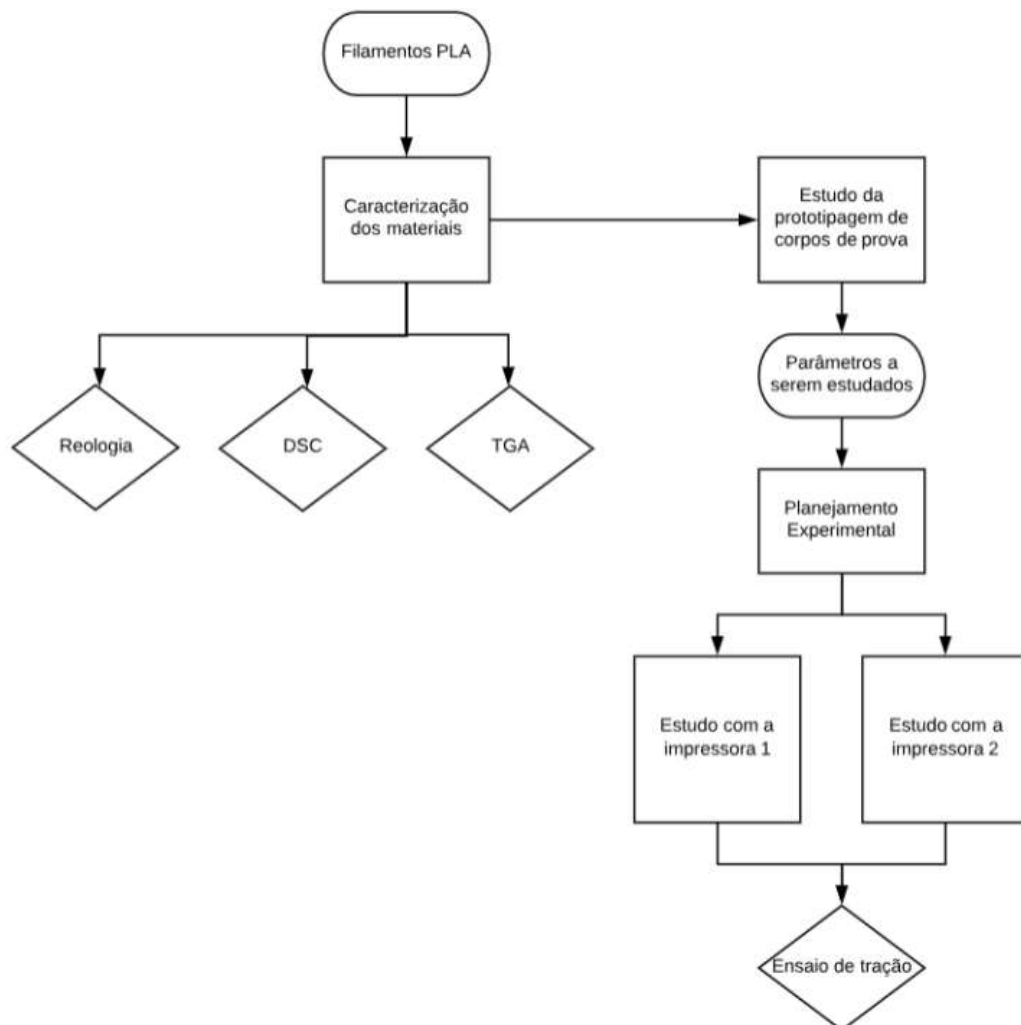
4.2 Filamento

Foram utilizados 4 tipos de filamento: sem pigmento, azul, amarelo e vermelho. Para o primeiro estudo somente o filamento sem pigmento foi considerado. Para o segundo experimento todos os filamentos foram utilizados. Os filamentos foram adquiridos da empresa GTMax, Araraquara.

5 MÉTODOS

Existem trabalhos acerca das propriedades mecânicas do PLA comparando-se diferentes cores. Esse trabalho propõe comparar os estudos das propriedades macroestruturais através de ensaios de tração com os estudos microestruturais para se avaliar se há alguma correlação entre eles. Pode-se ver a estrutura do trabalho no fluxograma da figura 18.

Figura 18: Fluxograma com os inputs e outputs do trabalho.



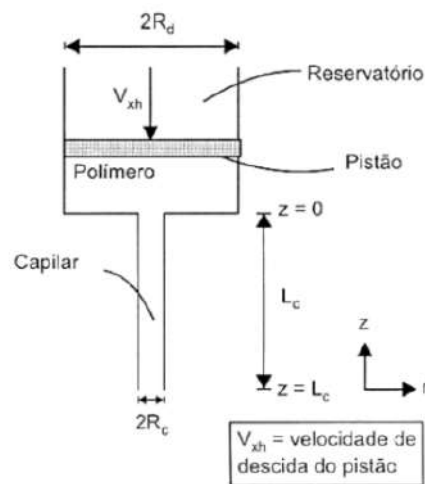
Fonte: Autora

5.1 Estudo Microestrutural

5.1.1 Ensaio Reológico - Reometria Capilar

Os testes foram realizados pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, localizado no Departamento de Engenharia de Materiais/UFSCar. Os ensaios foram realizados no Reômetro capilar Göttfert, modelo RHEOGRAPH 25, com barril de 12 mm de diâmetro e um capilar com as seguintes dimensões: diâmetro ($2R_c$) de 0,75mm e comprimento (L_c) de 30 mm ($L/d = 40$). As viscosidades foram medidas empregando-se 10 velocidades diferentes, e os ensaios foram realizados a 200°C. Um esquema do reômetro capilar e suas variáveis encontra-se na figura 19.

Figura 19: Esquema do reômetro capilar.



Fonte: Autora

5.1.2 Ensaio Termogravimétrico

O ensaio de TGA foi realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da EESC. Foi utilizada a máquina Pyris I (figura 20) com o programa Pyris para a geração de dados.

Figura 20: Foto da máquina Pyris I.



Fonte: Autora

Foi realizada a aferição da massa antes do ensaio as quais podemos encontrar na tabela 2.

Tabela 2: Massa da amostra antes do ensaio

Filamento	Massa(g)
Sem Pigmento	3.113
Azul	3.946
Vermelho	3.508

Fonte: Elaborada pelos autores.

O perfil de aquecimento foi de 30 a 700°C a 20°C/min am ambiente de nitrogênio a 20 ml/min. As amostras não foram submetidas a estufa para visualização de uma possível higroscopia do filmento devido a armazenagem.

5.1.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Nos experimentos foi utilizado um módulo DSC Q10 (TA Instruments). A massa das amostras foi de 4 ± 2 mg, em faixa de temperatura de 20-200oC para o primeiro aquecimento, resfriamento de 200-20oC e segundo aquecimento com faixa novamente de 20-200oC; todos com razão de aquecimento de 10oC. Foi suporte de amostra de alumínio hermético com tampa furada e atmosfera dinâmica de nitrogênio com vazão de 50 mL min⁻¹.

5.2 Estudo Macroestrutural

Foram feitos dois estudos devido a quantidade parâmetros envolvidos nas configurações de impressão. Para cada um deles foi feito um plano de testes e ensaios com aleatorizações em todos os processos.

O primeiro estudo, realizado no IFSC-SC foram considerados os parâmetros de espessura de camada e porcentagem de preenchimento com o filamento natural ou sem pigmento (tabela 3).

Tabela 3: Fatores do DOE do IFSC-SC

	Níveis		
Fator	1	2	3
Espessura de Camada	0.15	0.20	0.25
Preenchimento	30	50	80

Fonte: Elaborada pelos autores.

O estudo da EESC foi feito considerando 4 cores, espessura de camada e temperatura de impressão (tabela 4).

Tabela 4: Fatores do DOE da EESC

Fator	Níveis			
	1	2	3	4
Espessura de Camada	0.15	0.20		
Temperatura	200	210		
Cor	Sem Pigmento	Vermelho	Azul	Amarelo

Fonte: Elaborada pelos autores.

Outros parâmetros de impressão que foram utilizados em ambos experimentos podem ser vistos na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros fixos de Impressão

Parâmetros	
Camada Sólida Topo	1
Camada Sólida Base	1
Camada de Perímetro Externo	1
Padrão de Preenchimento	Retilinear
Angulo de Preenchimento	45°

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após a manufatura dos corpos de prova eles foram ensaiados na máquina de ensaio universal, Instron 5969.

Figura 21: Instron 5969 - EMM/EESC - USP.



Fonte: Autora

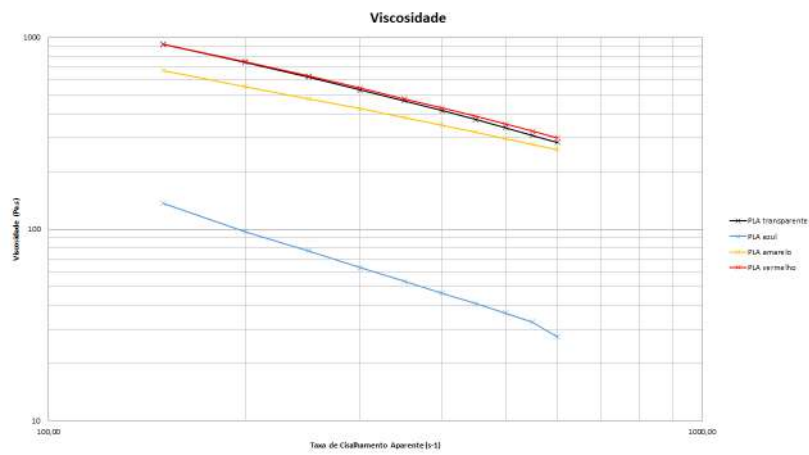
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análises Microestruturais

6.1.1 Ensaio Reológico

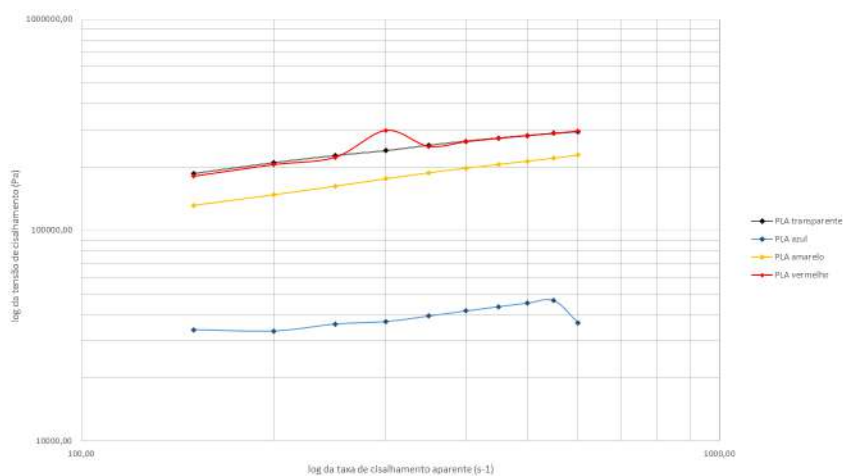
No gráfico xx podemos ver os resultados da reometria. O destaque é para a viscosidade do filamento azul, que apresenta valores bem mais baixos que os outros filamentos.

Figura 22: Gráfico de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para os filamentos sem pigmento, azul, amarelo e vermelho.



Fonte: Autora

Figura 23: Gráfico da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento .

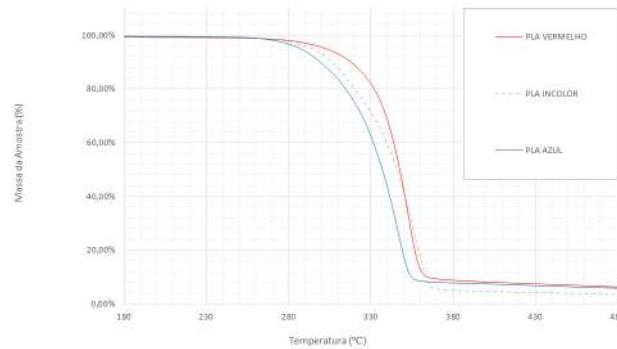


Fonte: Autora

6.1.2 Ensaio Termogravimétrico

Os ensaios de TGA foram realizados para verificação da temperatura de degradação do polímero e para verificação de reforços ou compostos inorgânicos. No gráfico vemos a curva de decaimento de massa da amostra por temperatura.

Figura 24: Curva da perda de massa pela temperatura.



Fonte: Autora

Pela curva termogravimétrica podemos verificar um único mecanismo de degradação para todos os polímeros. Nenhuma das 3 amostras teve uma perda de massa completa. Isso indica que todas elas possuem material inorgânico presentes. Para as amostras vermelha e azul, a massa residual foi maior, podendo indicar que sua pigmentação é inorgânica.

Ainda, podemos considerar 280°C a temperatura máxima na qual nenhum dos polímeros estudados têm uma degradação significativa.

6.1.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As temperaturas de transição vítrea, cristalização e fusão foram retiradas dos resultados dos gráficos de DSC e compilados na tabela xx.

Quadro 1: Temperaturas de transição vítrea, cristalização e fusão a partir do DSC

Cor	T _g	T _c	T _m
Sem Pigmento	59.45°C	126.40°C	152.74°C
Vermelho	56.25°C	112.62°C	151.99°C
Azul	58.78°C	110.47°C	154.78°C
Amarelo	60.59°C	92.76°C	178.05°C

Fonte: Autora

A variação das temperaturas entre os filamentos pode ser atribuída ao pigmento e a quantidade dele nos filamentos. A temperatura que se observou maior variação foi a temperatura de cristalização.

A partir dos dados obtidos, também foi estimado a cristalinidade segundo a fórmula:

Na tabela XX pode-se ver os valores das entalpia utilizados e os valores aproximados do cálculo da cristalinidade.

Quadro 2: Cálculo da porcentagem de cristalinidade a partir dos dados do DSC

Cor	H_c(J/g)	H_m(J/g)	Cristalinidade
Sem Pigmento	6.389°C	9.255°C	2.70°C
Vermelho	25.64°C	27.21°C	1.48°C
Azul	30.52°C	30.37°C	-0.14°C
Amarelo	21.74°C	47.46°C	24.26°C

Fonte: Autora

6.2 Ensaio Macroestrutural e Análise do DOE

6.2.1 DOE IFSC

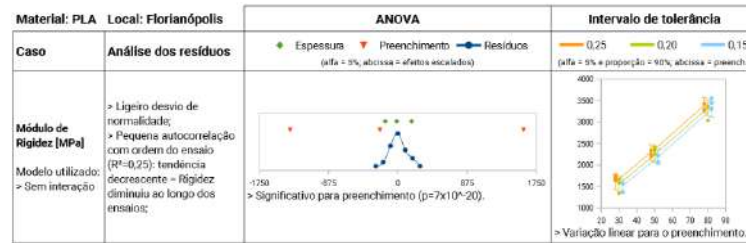
Os resultados dos testes de tração indicaram que há uma forte influência da porcentagem de preenchimento no módulo de young, na tensão de escoamento, na tensão de ruptura e na tenacidade. O único parametro que não parece ter uma correlação tão forte é a deformação na ruptura. Devido a alta variação que temos, não podemos afirmar que com o aumento da porcentagem de preenchimento, a deformação na ruptura diminui. Para conseguirmos provar essa relação mais corpos de prova precisariam ser feitos afim de diminuir a variação entre amostras.

A espessura de camada apresentou variação porém ela é tão pequena em relação a porcentagem de preenchimento que apareceu uma diferença somente na deformação e na tenacidade. Porém como já abordado, a variação que se obteve é muito alta para confirmar se há um padrão de fato.

Os resultados apresentados são a análise do DOE pelo método anova e o gráfico variability para mostrar os resultados de forma a expor o fator mais significativo através do padrão encontrado.

6.2.1.1 Módulo de Young

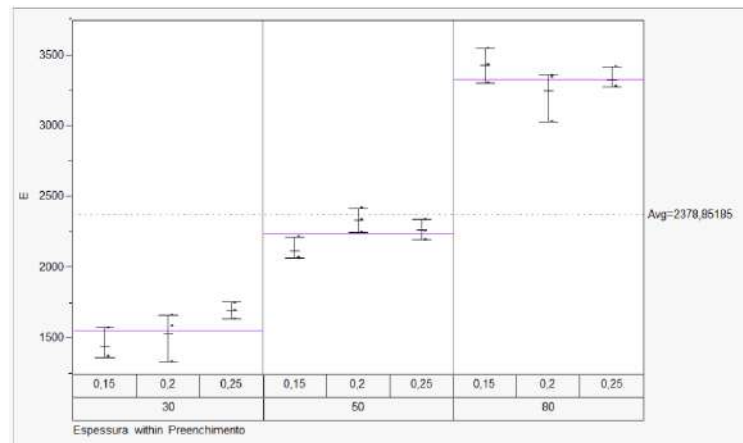
Figura 25: Análise ANOVA do Módulo de Young.



Fonte: Autora

A variação do preenchimento variou em aproximadamente 1500 MPa o valor do módulo de young dos corpos de prova. Como podemos ver no variability (XX), a espessura d ecamada não apresentou uma influencia significativa.

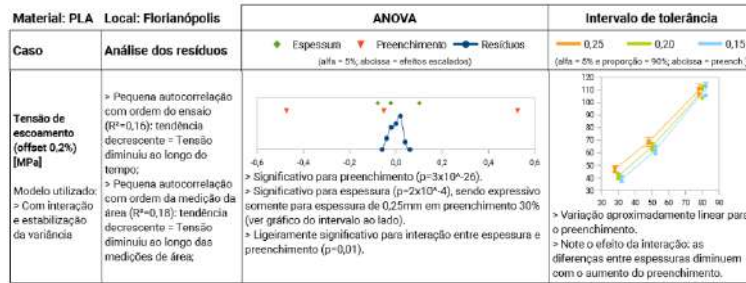
Figura 26: Variability do Módulo de Young.



Fonte: Autora

6.2.1.2 Tensão de Escoamento

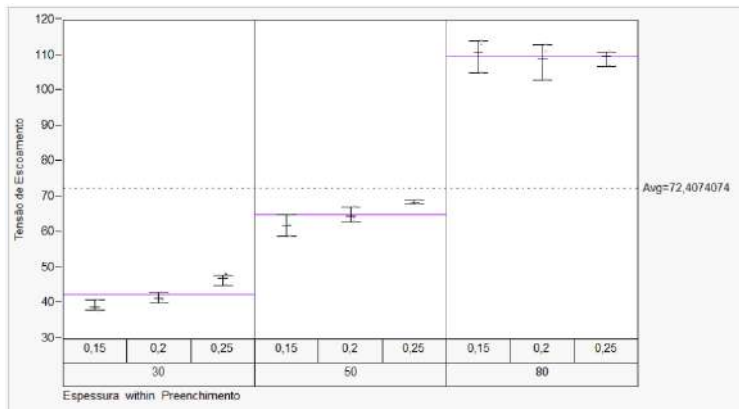
Figura 27: Análise ANOVA da Tensão de Escoamento



Fonte: Autora

Parecido com o padrão dos resultados do módulo de young, a tensão de escoamento também teve uma variação grande quando se variava a porcentagem de preenchimento e foi insignificante a variação da espessura de camada apesar da baixa variação.

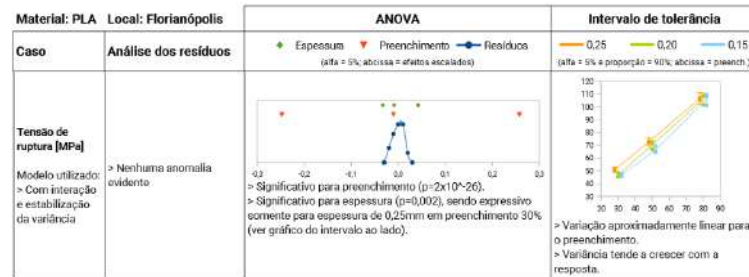
Figura 28: Variability da Tensão de Escoamento



Fonte: Autora

6.2.1.3 Tensão de Ruptura

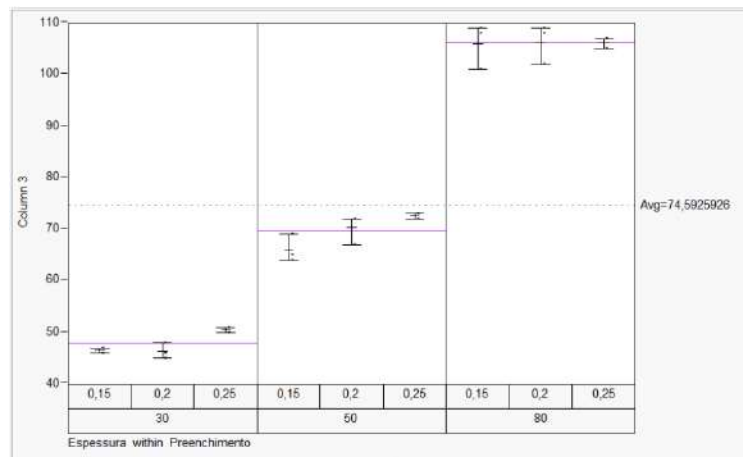
Figura 29: Análise ANOVA da Tensão de Ruptura



Fonte: Autora

Assim como os dois últimos estudos, a tensão de ruptura apresentou uma grande influência da porcentagem de preenchimento.

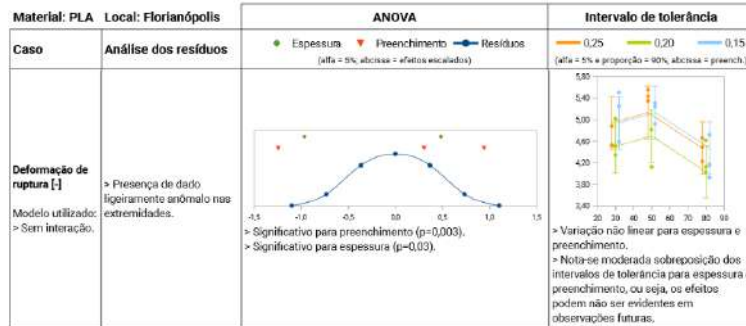
Figura 30: Variability da Tensão de Ruptura



Fonte: Autora

6.2.1.4 Deformação na Ruptura

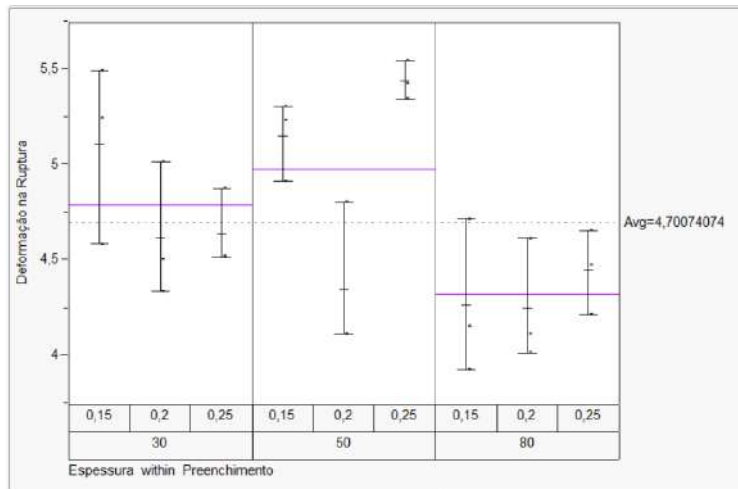
Figura 31: Análise ANOVA da Deformação na Ruptura



Fonte: Autora

A deformação na ruptura não houve uma variação grande com relação aos parâmetros estudados. Pelos dados obteve-se um diferença de 1.5mm de deformação entre os corpos de prova ensaiados. Houve uma correlção entre 30 e 80

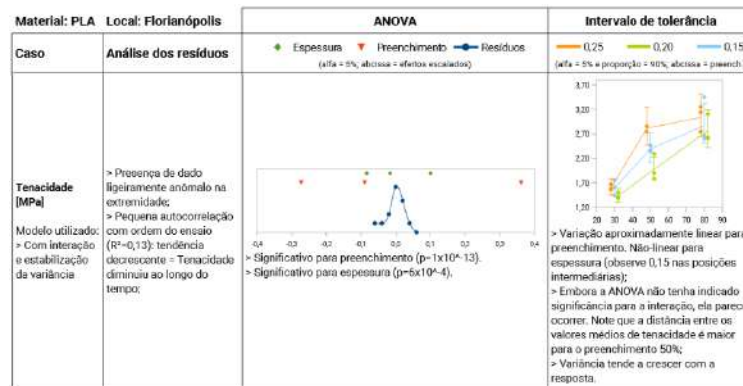
Figura 32: Variability da Tensão de Ruptura



Fonte: Autora

6.2.1.5 Tenacidade

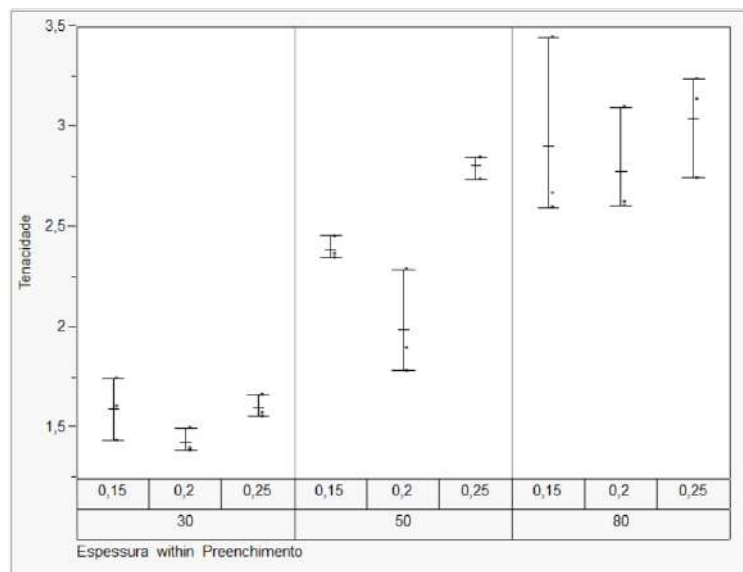
Figura 33: Análise ANOVA da Tenacidade



Fonte: Autora

Através do variability podemos notar que o maior efeito é o da espessura de preenchimento. No preenchimento de 50

Figura 34: Variability da Tenacidade



Fonte: Autora

6.2.2 DOE EESC

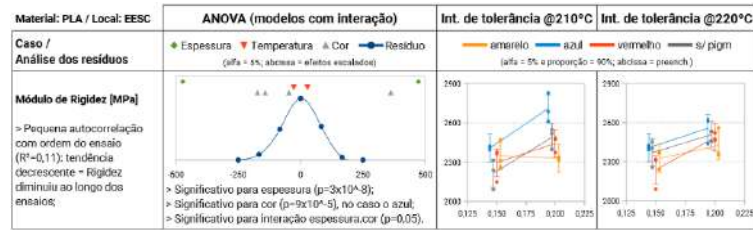
Nesse estudo o objetivo era entender se há alguma diferença entre as propriedades mecânicas de diferentes cores de PLA. Além das cores, variou-se também a espessura de camada e a temperatura de impressão (processamento).

A temperatura foi escolhida como um fator tendo em vista que a viscosidade do polímero poderia variar sua adesão entre camadas e assim alterar a resposta mecânica dos do corpo impresso.

A espessura de camada foi considerada por causa da maior quantidade de vazios que existem quanto mais fina for a camada se considerarmos que se formarão mais vazios a medida que se diminui a espessura e aumento o número de camadas.

6.2.2.1 Módulo de Young

Figura 35: Análise ANOVA do Módulo de Young

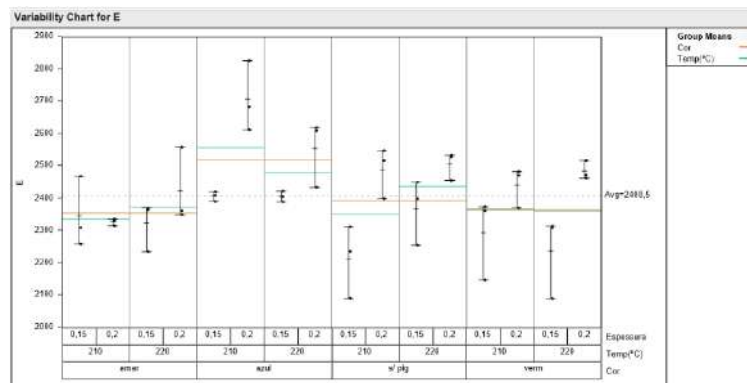


Fonte: Autora

Pela ANOVA os fatores de espessura e cor foram significativos e até temos uma interação entre eles. Porém quando analisamos os valores vemos que a espessura não tem uma resposta consistente para se criar previsões. Como vemos nos gráficos de intervalos de tolerância, os valores de tolerância são tão altos que podem se mesclar com os do outro nível.

No gráfico variability (figura 36) podemos ver que o azul apresentou valores acima da média porém dentro de um mesmo grupo de repetições para mesma temperatura, houve uma grande variação na resposta.

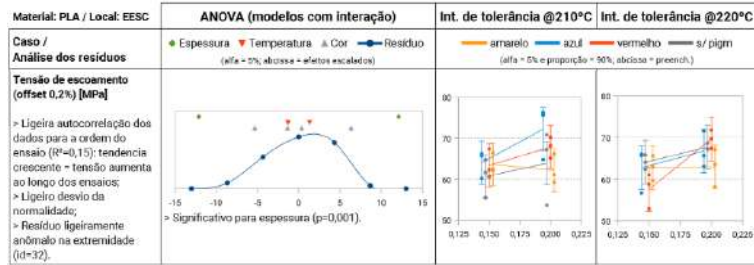
Figura 36: Variability do Módulo de Young



Fonte: Autora

6.2.2.2 Tensão de Escoamento

Figura 37: Análise ANOVA da Tensão de Escoamento

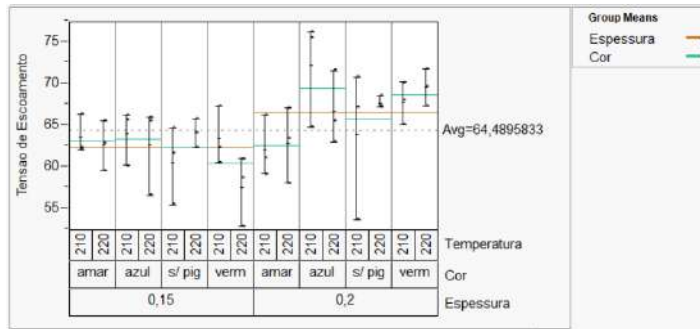


Fonte: Autora

Quando analisamos a tensão de escoamento, vemos claramente no variability (figura 38) que a espessura de camada. Novamente, quando consideramos a variação não se consegue dizer ao certo se realmente o fator espessura provoca esse fenômeno.

A espessura, quanto mais fina, tenha menos interação entre camadas, fazendo com que a força para provocar uma deformação elástica seja menor, pois tem menos área de seção da camada impressa.

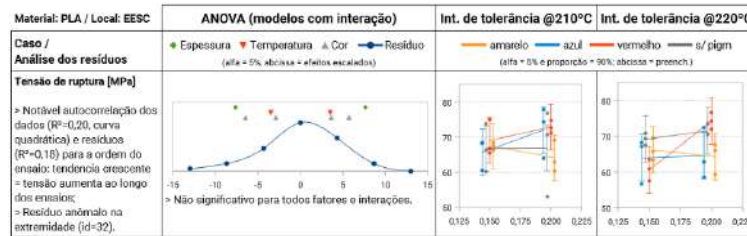
Figura 38: Variability da Tensão de Escoamento



Fonte: Autora

6.2.2.3 Tensão de Ruptura

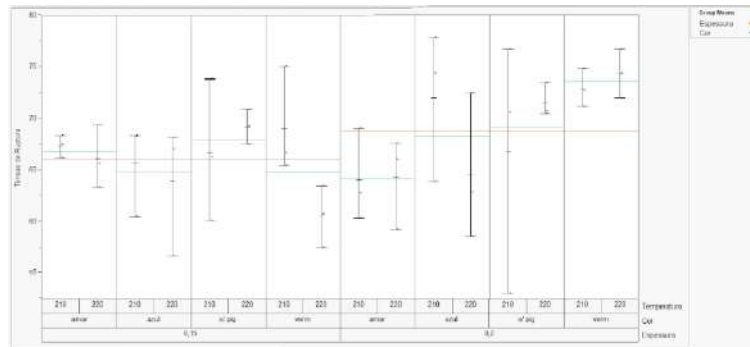
Figura 39: Análise ANOVA da Tensão de Ruptura



Fonte: Autora

A análise da ANOVA indicou que nenhum fator ou interação foi significativa. Analisando o variability (figura 40), vemos que há uma diferença de média entre os grupos de espessura diferente, mas como em outras respostas, a variação está muito grande e não há testes suficientes para para verificar qual é a possível causa especial.

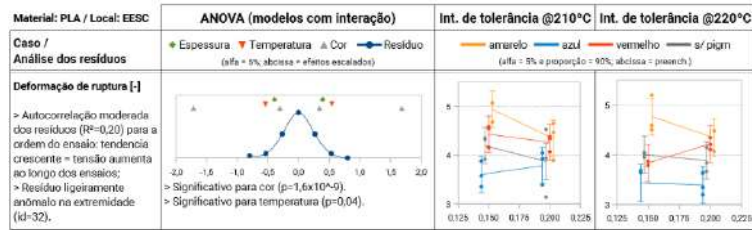
Figura 40: Variability da Tensão de Ruptura



Fonte: Autora

6.2.2.4 Deformação na Ruptura

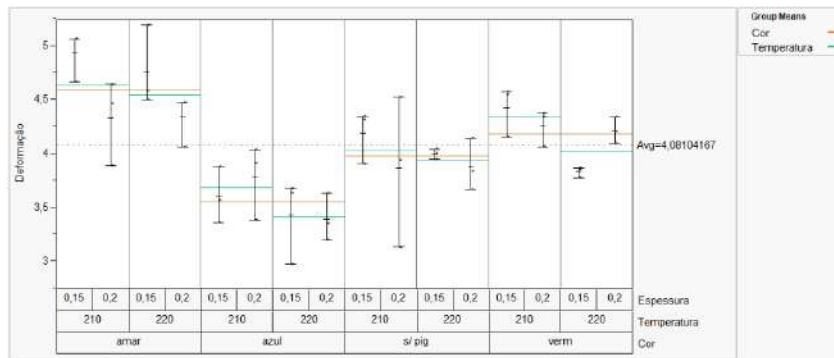
Figura 41: Análise ANOVA da Deformação na Ruptura



Fonte: Autora

Apesar da ANOVA indicar que espessura tem um efeito significativo para a resposta de deformação, no variability isso não se confirma. Novamente há uma grande variação e se faz necessário mais repetições para verificação do desvio-padrão.

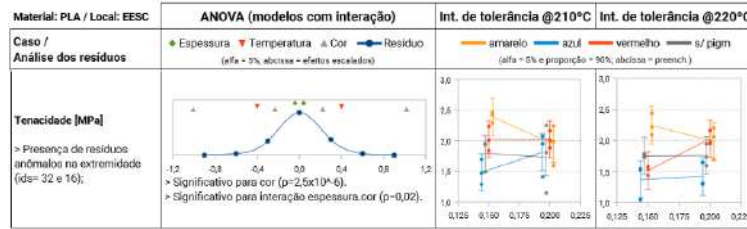
Figura 42: Variability da Tensão de Ruptura



Fonte: Autora

6.2.2.5 Tenacidade

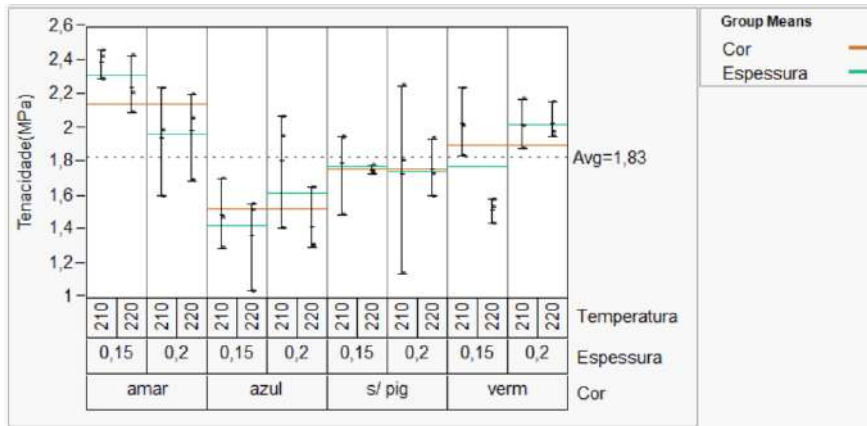
Figura 43: Analise ANOVA da Tenacidade



Fonte: Autora

A cor se mostrou um fator significativo para a tenacidade apresentada nos corpos de prova. Vemos que a cor amarela teve o maior valor médio de tenacidade enquanto o azul se mostrou o menos tenaz. Porém temos pontos inconsistentes quando analisamos os corpos de prova azuis, com 0.2 de espessura impresso a 210°C. Ele tem uma média mais alta e possui dois pontos acima da média geral.

Figura 44: Variability da Tenacidade



Fonte: Autora

7 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho era tentar encontrar a variação de propriedades que observamos ao longo do uso da manufatura aditiva com diferentes polímeros e fornecedores. Conseguimos criar um experimento para estudar as características mecânicas porém os fatores escolhidos talvez não fossem os melhores pois a discrepância de resposta entre eles foi muito grande, fazendo com que, por exemplo, o preenchimento fosse responsável por uma variação muito maior que a espessura. Assim não conseguimos entender o quão a espessura faz diferença pois é bem mais sutil. Porém, os testes já nos mostram que para algumas respostas as cores fazem muito diferença, talvez devido sua carga de pigmento ou algum outro aditivo que modifique as propriedades dos PLA virgem.

Outro problema que surgiu foi a alta variação entre os resultados dos testes de tração. Isso poderia ser resolvido com o aumento no número de réplicas. Com a sobreposição do intervalo de confiança, não pode se afirmar que os valores de certa propriedade serão aqueles.

Com as investigações térmicas do PLA conseguimos ver uma variação entre as cores de PLA, principalmente sua viscosidade, sendo o azul o menos viscoso. Conseguimos ainda estimar a cristalinidade dos filamentos a partir dos ensaios de DSC e ver que há uma notável diferença entre eles, que faz com que seu processamento seja diferente.

Com todas as diferenças entre as cores, sabemos que é necessário fazer um setup diferente para cada material. Seria interessante a padronização de inserção de carga e/ou pigmento para os filamentos produzidos afim de se estabelecer um padrão para que se possa ter uma melhor qualidade nas impressões. Isso considerando que o mercado de serviços em manufatura aditiva está crescendo devido a alta demanda de personalização dos produtos.

REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, S. R. et al. Polylactide stereocomplexation leads to higher hydrolytic stability but more acidic hydrolysis product pattern. **Biomacromolecules**, v. 11, n. 4, p. 1067–1073, 2010.
- ASHBY, M. F. Materials selection in mechanical design. **MRS Bull**, v. 30, n. 12, p. 995, 2005.
- BELLEHUMEUR, C. et al. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 6, n. 2, p. 170–178, 2004.
- CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- CHAN, C. M. et al. Composites of wood and biodegradable thermoplastics: A review. **Polymer Reviews**, Taylor & Francis, v. 58, n. 3, p. 444–494, 2018.
- FUKUSHIMA, K.; KIMURA, Y. Stereocomplexed polylactides (neo-pla) as high-performance bio-based polymers: their formation, properties, and application. **Polymer International**, Wiley Online Library, v. 55, n. 6, p. 626–642, 2006.
- GALANTUCCI, L. M. et al. Analysis of dimensional performance for a 3d open-source printer based on fused deposition modeling technique. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 28, p. 82–87, 2015.
- GARG, A.; TAI, K.; SAVALANI, M. State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 2, p. 164–178, 2014.
- GARTNER. **Top Trends from the Gartner Hype Cycle for Midsize Enterprises, 2017**. 2017. Disponível em: <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-from-the-gartner-hype-cycle-for-midsize-enterprises-2017/>>.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. [S.l.]: Springer, 2010.
- HARRISON, J. et al. Colonization and maintenance of murine embryonic stem cells on poly (α -hydroxy esters). **Biomaterials**, Elsevier, v. 25, n. 20, p. 4963–4970, 2004.
- HILTUNEN, K. et al. Synthesis and characterization of lactic acid based telechelic prepolymers. **Macromolecules**, ACS Publications, v. 29, n. 27, p. 8677–8682, 1996.
- HU, S. J. Evolving paradigms of manufacturing: from mass production to mass customization and personalization. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 7, p. 3–8, 2013.
- JAHNO, V. D. Síntese e caracterização do poli (l-ácido láctico) para uso como biomaterial. 2005.
- KLAHN, C.; LEUTENECKER, B.; MEBOLDT, M. Design strategies for the process of additive manufacturing. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 36, p. 230–235, 2015.

NETO, P. I. **Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabeçote de extrusão com rosca para impressoras tridimensionais portáteis**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.

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**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 81–90, 2012.

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

THOMPSON, M. K. et al. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **CIRP annals**, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: tecnologia e aplicações da impressão 3d**. São Paulo: Blucher, 2017.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of pla color on material properties of 3-d printed components. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 8, p. 110–116, 2015.

Apêndices

APÊNDICE A – RESULTADOS - REOLOGIA DOS FILAMENTOS

Incluir as 4 tabelas.

Figura 45: Dados Reologia - Filamento Sem Pigmento.

V_p (mm/min)	$\dot{\gamma}_a$ (s^{-1})	τ (Pa)	$\dot{\gamma}_c$ (s^{-1})	η (Pa.s)
0,05	150,00	186158,78	202,34	920,04
0,07	200,00	209282,11	281,83	742,60
0,09	250,00	226559,83	364,88	620,92
0,11	300,00	238841,28	449,86	530,92
0,13	350,00	253464,72	542,66	467,08
0,15	400,00	264910,63	637,56	415,51
0,16	450,00	274137,19	734,45	373,26
0,18	500,00	282070,06	833,74	338,32
0,20	550,00	288375,47	934,22	308,68
0,22	600,00	293755,25	1036,41	283,44

V_p : velocidade do pistão; $\dot{\gamma}_a$: taxa de cisalhamento aparente; τ : tensão de cisalhamento; $\dot{\gamma}_c$: taxa de cisalhamento corrigida e η : viscosidade

Fonte: Autora

Figura 46: Dados Reologia - Filamento Azul.

V_p (mm/min)	$\dot{\gamma}_a$ (s^{-1})	τ (Pa)	$\dot{\gamma}_c$ (s^{-1})	η (Pa.s)
0,05	150,00	33814,79	248,17	136,26
0,07	200,00	33341,41	342,90	97,23
0,09	250,00	35961,50	465,52	77,25
0,11	300,00	36932,18	587,50	62,86
0,13	350,00	39236,38	733,89	53,47
0,15	400,00	41443,05	892,83	46,42
0,16	450,00	43436,81	1061,81	40,91
0,18	500,00	45136,55	1237,64	36,47
0,20	550,00	46462,75	1416,24	32,81
0,22	600,00	38513,79	1331,56	27,42

V_p : velocidade do pistão; $\dot{\gamma}_a$: taxa de cisalhamento aparente; τ : tensão de cisalhamento; $\dot{\gamma}_c$: taxa de cisalhamento corrigida e η : viscosidade

Fonte: Autora

Figura 47: Dados Reologia - Filamento Vermelho.

V_p (mm/min)	$\dot{\gamma}_a$ (s^{-1})	τ (Pa)	$\dot{\gamma}_c$ (s^{-1})	η (Pa.s)
0,05	150,00	180887,31	197,11	917,69
0,07	200,00	204890,44	274,11	747,47
0,09	250,00	222403,55	353,75	628,70
0,11	300,00	238007,34	437,47	544,05
0,13	350,00	250380,55	523,14	478,61
0,15	400,00	263154,41	613,68	428,81
0,16	450,00	273062,19	704,96	387,39
0,18	500,00	281254,41	797,26	352,78
0,20	550,00	288594,88	891,35	323,77
0,22	600,00	295790,03	988,05	299,37

V_p : velocidade do pistão; $\dot{\gamma}_a$: taxa de cisalhamento aparente; τ : tensão de cisalhamento; $\dot{\gamma}_c$: taxa de cisalhamento corrigida e η : viscosidade

Fonte: Autora

Figura 48: Dados Reologia - Filamento Amarelo.

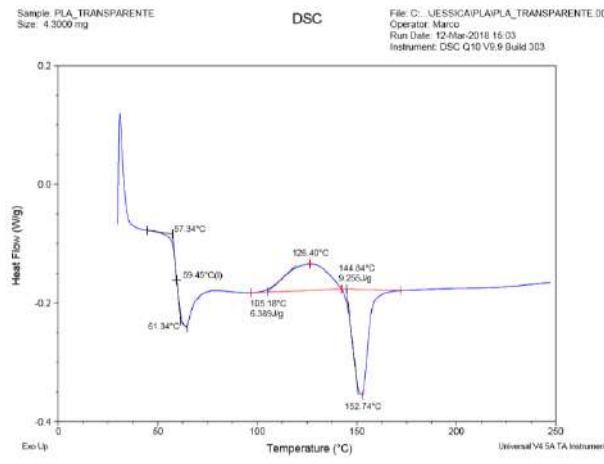
V_p (mm/min)	$\dot{\gamma}_a$ (s^{-1})	τ (Pa)	$\dot{\gamma}_c$ (s^{-1})	η (Pa.s)
0,05	150,00	131349,80	195,78	670,92
0,07	200,00	147598,52	255,91	555,07
0,09	250,00	162170,59	338,43	479,18
0,11	300,00	175667,83	413,25	425,09
0,13	350,00	187444,72	489,11	383,23
0,15	400,00	197246,02	584,95	349,14
0,16	450,00	205515,44	640,62	320,81
0,18	500,00	213020,59	716,75	297,20
0,20	550,00	220159,91	793,74	277,37
0,22	600,00	227610,91	872,72	260,81

V_p : velocidade do pistão, $\dot{\gamma}_a$: taxa de cisalhamento aparente, τ : tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}_c$: taxa de cisalhamento corrigida e η : viscosidade

Fonte: Autora

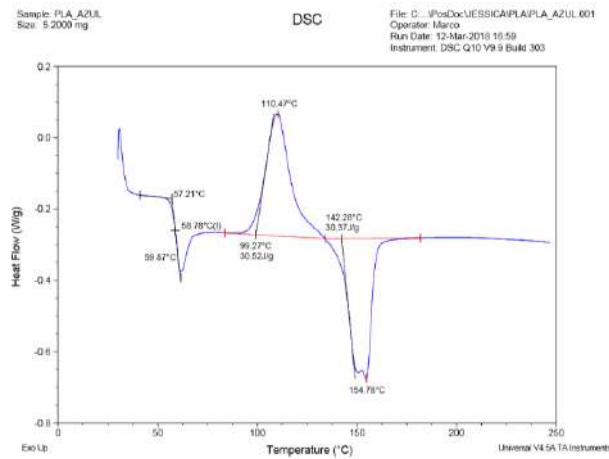
APÊNDICE B – RESULTADOS - GRÁFICOS DO DSC DOS FILAMENTOS

Figura 49: DSC do filamento sem pigmento.



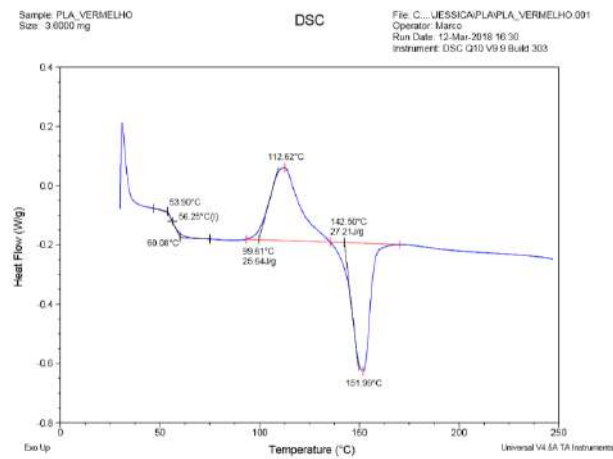
Fonte: Autora

Figura 50: DSC do filamento azul.



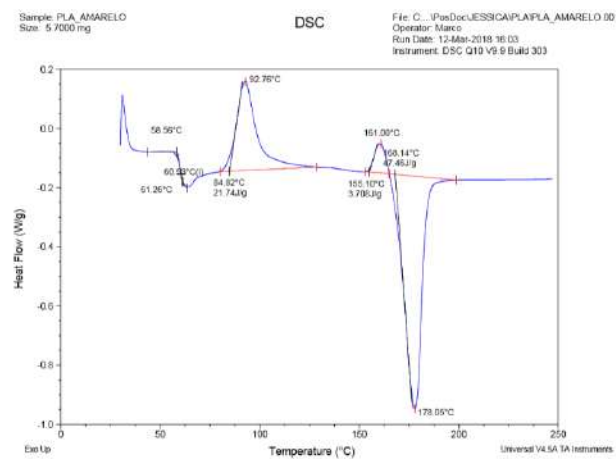
Fonte: Autora

Figura 51: DSC do filamento vermelho.



Fonte: Autora

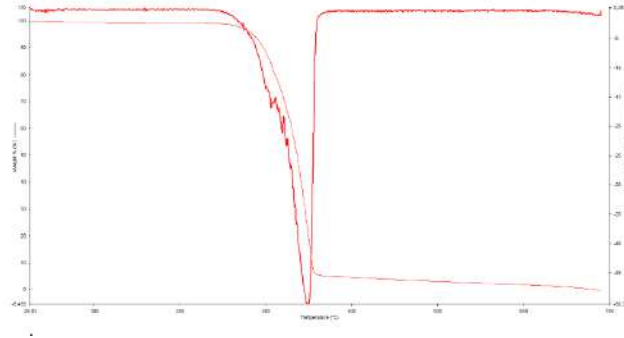
Figura 52: DSC do filamento amarelo.



Fonte: Autora

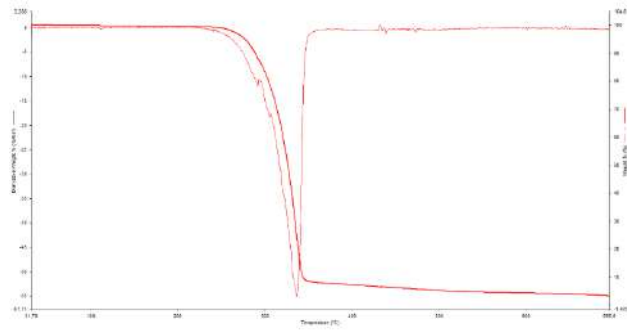
APÊNDICE C – RESULTADOS - TGA DOS FILAMENTOS

Figura 53: TGA do filamento sem pigmento.



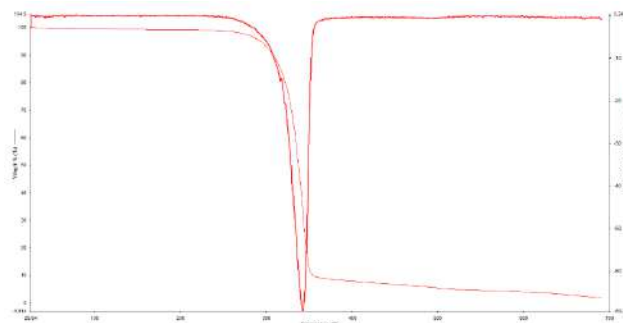
Fonte: Autora

Figura 54: TGA do filamento azul.



Fonte: Autora

Figura 55: TGA do filamento vermelho.



Fonte: Autora