

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM IMPRESÃO 3D
NAS PROPRIEDADES DO POLIÁCIDO LÁTICO**

VINICIUS CABREIRA

Porto Alegre

2018

VINICIUS CABREIRA

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM IMPRESÃO 3D
NAS PROPRIEDADES DO POLIÁCIDO LÁTICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Profa. Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana

Porto Alegre

2018

Cabreira, Vinicius

Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico / Vinicius Cabreira. -- 2018.

104 f.

Orientadora: Ruth Marlene Campomanes Santana.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Impressão 3D. 2. FDM. 3. Poliácido láctico. I. Marlene Campomanes Santana, Ruth, oriente. II. Título.

VINICIUS CABREIRA

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM IMPRESÃO 3D NAS
PROPRIEDADES DO POLIÁCIDO LÁTICO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Aprovado em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alessandra Baldissera – UFRGS

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti – IF-Farroupilha

Prof. Dr. Fernando Dal Pont Morisso – Feevale

“Um navio no porto está seguro, mas não é para isso que os navios são construídos.”

John A. Shedd.

DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar este trabalho a minha família e meus amigos, sem os quais este não seria possível.

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais pelo apoio incondicional.
- À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ruth M. C. Santana, sempre uma segunda mãe aos seus alunos, orientando com paciência e dedicação.
- Ao doutorando Giordano P. Bernardes pelo incentivo ao mestrado.
- À doutoranda Paula C. Dartora pelas contribuições ao trabalho e a vida acadêmica.
- Ao LAPOL e todos os colegas, em especial aos da sala 117, por tornar esse aprendizado uma experiência especial.
- Aos bolsistas Ana Kelly Cattelan, Rafaela Graff e Carlos Eduardo Antônio Ferreira pelas análises.
- Ao Willbur Trajano e ao LACAR pelo auxílio na realização da análise de microscopia óptica.
- À UFRGS e seus professores pelos ensinamentos passados.
- À Capes pela bolsa de estudo.
- A todos que de alguma maneira colaboraram com o presente trabalho.

TRABALHOS PUBLICADOS

Congressos

- CABREIRA, V. SANTANA, R. M. C. Efeito da orientação do preenchimento em processo FDM na absorção de impacto do PLA. In: 14º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2017, Águas de Lindóia. 14º Congresso Brasileiro de Polímeros-CBPol, 2017.
- CABREIRA, V. SANTANA, R. M. C. Comparação das propriedades de peças de PLA moldadas por injeção e FDM. In: 14º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2017, Águas de Lindóia. 14º Congresso Brasileiro de Polímeros-CBPol, 2017.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 – Previsão de mercado (BI U\$)	22
Figura 02 – Comparação de custos	22
Figura 03 – Princípio do processo de impressão 3D	24
Figura 04 – Sinterização a laser	24
Figura 05 – Esterelitografia	25
Figura 06 – Modelagem por deposição do fundido	26
Figura 07 – Multijet	26
Figura 08 – Modelos de estruturas	28
Figura 09 – Cabeçote de impressão	29
Figura 10 – Linhas de deposição do fundido	30
Figura 11 – Variação da resistência	32
Figura 12 – Balanceamento de parâmetros	33
Figura 13 – Propriedades e cristalinidade	34
Figura 14 – Efeito da temperatura na viscosidade e módulo	37
Figura 15 – Estrutura do PLA	38
Figura 16 – Padrões utilizados para preenchimento	41
Figura 17 – Configuração das peças segundo a orientação (ângulo) de preenchimento	42
Figura 18 – Fluxograma de trabalho	44
Figura 19 – Equipamento de impressão 3D usado em este trabalho	46
Figura 20 – Detalhe das garras de tração	47
Figura 21 - Comprimento do corpo de prova por tipo de preenchimento	51
Figura 22 - Largura do corpo de prova por tipo de preenchimento	52
Figura 23 - Largura do corpo de prova por orientação do preenchimento	53
Figura 24 - Comprimento do corpo de prova por orientação do preenchimento	53
Figura 25 - Comprimento do corpo de prova por quantidade de preenchimento	54
Figura 26 - Largura do corpo de prova por quantidade de preenchimento	55
Figura 27 - Massa do corpo de prova por tipo de preenchimento	56
Figura 28 - Massa do corpo de prova por orientação do preenchimento	57
Figura 29 - Massa do corpo de prova por quantidade de preenchimento	58
Figura 30 – Micrografia óptica dos corpos de prova por diferentes preenchimentos	59

Figura 31 - Corpos de prova após ensaio de impacto com diferentes quantidades de preenchimento	61
Figura 32 - Resistência ao impacto por quantidade de preenchimento	62
Figura 33 - Corpos de prova após ensaio de impacto com diferentes tipos de preenchimento	63
Figura 34 - Resistência ao impacto por tipo de preenchimento	63
Figura 35 - Resistência ao impacto por orientação do preenchimento	64
Figura 36 - Corpos de prova após ensaio de impacto com diferentes orientações de preenchimento	65
Figura 37 - Curva tensão x deformação para as amostras de diferentes tipos de preenchimentos	66
Figura 38 - Corpos de prova após ensaio de tração com diferentes tipos de preenchimento	67
Figura 39 - Comprimento dos corpos de prova por grupo de processamento	70
Figura 40 - Largura dos corpos de prova por grupo de processamento	72
Figura 41 - Massa dos corpos de prova por grupo de processamento	73
Figura 42: Micrografia da superfície de fratura dos corpos de prova para diferentes grupos de processamento	76
Figura 43: Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra Ref	78
Figura 44: Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra Layer	79
Figura 45: Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra moldada por injeção (IM)	80
Figura 46: Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra V25	81
Figura 47: Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra Bed	82
Figura 48: Termogramas de DSC para amostras processadas em diferentes temperaturas	83
Figura 49: Termogramas de DSC para amostras processadas em diferentes velocidades	84
Figura 50: Termogramas de DSC para amostras processadas em diferentes espessuras de camada	85
Figura 51: Termogramas de DSC para amostras processadas em diferentes temperaturas de mesa	85
Figura 52 - Termogramas de DSC para amostras moldadas injeção e FDM (Ref)	86
Figura 53 - Resistência ao impacto por grupo de processamento	89
Figura 54 - Curva tensão x deformação das amostras para diferentes parâmetros de processamento	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 – Tipo e parâmetro de processamento em FDM	31
Tabela 02 - Propriedades dos polímeros usados fornecidos pelo fabricante	40
Tabela 03 - Configurações da geometria de deposição usadas por FDM	42
Tabela 04 - Parâmetros de processamento usadas por FDM	43
Tabela 05 - Parâmetros de processamento usadas na moldagem por injeção	45
Tabela 06 - Influência da quantidade de filamento e tempo de impressão FDM utilizado na eficiência do desempenho mecânico em relação à massa e tempo	56
Tabela 07 - Módulo, tensão de escoamento e deformação de escoamento das amostras de diferentes tipos de preenchimento	68
Tabela 08 - Resultados da análise térmica de DSC das amostras avaliadas	87
Tabela 09 – Módulo, tensão de escoamento e deformação de escoamento das amostras de diferentes parâmetros de processamento	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABS = acrilonitrila butadieno estireno

DLP = processamento digital por luz

DSC = calorimetria exploratória diferencial

FDM = modelagem por deposição do fundido

GNP = *General Public License* (Licença de Público Geral)

HDPE = polietileno de alta densidade

MEV = microscopia eletrônica de varredura

PDLA = poli D ácido láctico

PET = poli (tereftalato de etileno)

PLA = poli (ácido láctico)

PLLA = poli L ácido láctico

PP = polipropileno

PS = poliestireno

PTFE = Politetrafluoretileno

SLA = estereolitografia

SLS = sinterização seletiva a laser

T_{cc} = temperatura de cristalização a frio

T_g = temperatura de transição vítrea

T_m = temperatura de fusão

X_c = grau de cristalinidade

ΔH_c = entalpia de cristalização

ΔH_f = entalpia de fusão

RESUMO

Os processos de manufatura de polímeros têm sido modernizados para acompanhar a crescente demanda industrial por inovações, produtividade e competitividade. Um novo processo, dentro da classe de manufatura aditiva, é a impressão 3D, em que a peça, a partir de um modelo computadorizado é fabricada camada a camada por diferentes técnicas. Este processo possibilita a rápida produção ou prototipagem de peças que não seriam possíveis ou viáveis dentro dos processos convencionais de fabricação, o que abre novas possibilidades dentro das mais diversas áreas. No entanto, a falta de conhecimento na área é uma das grandes barreiras para o aumento em sua utilização. Tendo isto em vista, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito dos diferentes parâmetros de processo utilizados em impressão 3D por FDM (modelagem por deposição do fundido) nas propriedades físicas, estruturais, térmicas e morfológicas do objeto moldado. O polímero utilizado neste estudo foi o poliácido láctico (PLA). Para o desenvolvimento desta pesquisa, o estudo foi dividido em duas etapas. Na primeira, foram avaliados os parâmetros de padrão, orientação e quantidade do preenchimento dos corpos de prova. Na segunda, foram avaliados os seguintes parâmetros de processamento: velocidade, temperatura da matriz, temperatura de mesa e espessura de camada. Paralelamente foram moldados corpos de prova de PLA por injeção. As amostras foram caracterizadas quanto a suas propriedades mecânicas (tração e impacto), físicas (dimensional e gravimétrica), assim como característica estrutural e morfológica através de microscopia óptica e MEV, e propriedades térmicas por DSC quanto ao seu grau de cristalinidade, sendo comparados com padrão de injeção. Resultados deste estudo mostraram que, dentre os parâmetros de processamento de impressão, o aumento da temperatura de impressão ou a velocidade tendem a aumentar a resistência à tração e módulo elástico do material. Também, foi observada forte influência da orientação e do tipo de preenchimento na resistência mecânica do material.

ABSTRACT

Manufacturing processes are always under constant modernization, enabling then to follow the growing demands from industries on innovations, productivity and competitiveness. A recent process, labeled under the additive manufacturing scope, is the 3D printing, in which, from a computer model, the object is modeled in a computer and built layer by layer by the proper printer, utilizing different techniques. This enables quick production and prototyping of objects that would be otherwise unviable by conventional manufacturing processes and opens new possibilities in several areas. However, since these techniques are recent, very few studies have been conducted on the subject. The lack of knowledge in it is one of the greatest barriers to its growth. This work aimed to study the effects of different parameters utilized on FDM 3D printers, on the mechanical, structural, physical, thermal and morphological properties of the created object. The polymer used in this study was polylactide acid (PLA). The research was divided in two steps. First, sample groups with different infill orientation, types and amount were created. In the second step, the sample groups were created utilizing different processing parameters, such as extruder temperature, bed temperature, layer height and extrusion speed. Samples were also molded by the injection process, for comparison between the two processes. The samples were characterized by the following: mechanical properties by impact and tensile tests, dimensions and mass, structure and morphology by optical microscopy and SEM and, finally, the sample groups created using different processing parameters had their crystallinity evaluated by DSC, being compared to injected molded parts. Significant differences were observed regarding the infill parameters and the processing parameters utilized in this studied. Results show that among the processing parameters, using higher temperature or speed leads to higher impact and tensile resistances and higher modulus. Also results show strong impact on the mechanical properties from the infill type, orientation and degree.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Impressão 3D	20
3.2 Exemplos e aplicações	23
3.3 Modelagem por deposição do fundido (FDM)	27
3.4 Características do processo de FDM	31
3.5 Processamento de materiais poliméricos	35
3.6 Políácido Láctico	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Materiais	40
4.2 Metodologia	40
4.2.1 Preparação dos corpos de prova via moldagem por injeção	45
4.2.2 Preparação dos corpos de prova via impressão 3D	45
4.2.3 Caracterização	46
4.2.3.1 Tração	46
4.2.3.2 Impacto	47
4.2.3.3 Microscopia óptica	47
4.2.3.4 Calorimetria Diferencial Exploratória, DSC	48
4.2.3.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	48
4.2.3.6 Análise Dimensional	49
4.2.3.7 Gravimetria	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Etapa 1	50
5.1.1 Propriedades Físicas	50
5.1.1.1 Análise Dimensional	50
5.1.1.2 Gravimetria	55
5.1.2 Morfologia	58
5.1.2.1 Microscopia Óptica	58
5.1.3 Propriedades Mecânicas	60
5.1.3.1 Impacto	60

5.1.3.2 Tração	66
5.2 ETAPA 2	69
5.2.1 Propriedades Físicas	70
5.2.2.1 Análise Dimensional	70
5.2.2.2 Gravimetria	73
5.2.2 Morfologia	75
5.2.2.1 Microscopia Óptica.....	75
5.2.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	77
5.2.3 Análise Calorimétrica Diferencial (DSC).....	82
5.2.4 Propriedades Mecânicas.....	88
5.2.4.1 Impacto	88
5.2.4.2 Tração	91
6 CONCLUSÕES.....	94
7 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1 INTRODUÇÃO

Os processos de transformação de materiais poliméricos sofrem aprimoramento contínuo, visando maior rendimento e novos nichos. Paralelamente, surgem novos processos, cada vez mais específicos, dentre eles o processo de manufatura aditiva.

A manufatura aditiva é uma ferramenta criada inicialmente para indústrias de alta competitividade, de modo a obter protótipos de suas novas peças sem a necessidade da alteração da linha produtiva e altos investimentos (WULLE *et al.*, 2017). Os primeiros processos tiveram sua entrada no mercado no final da década de 1980 com os processos de foto endurecimento e FDM (modelagem por deposição do fundido).

Com o aumento da competitividade e aceleração da evolução causada pela era da informática, a impressão 3D sofreu um salto evolutivo com a utilização de computadores (LI *et al.*, 2017). Ao mesmo tempo, com o vencimento das patentes originais, ocorreu uma grande disseminação por meio de entusiastas e a utilização de plataformas livres, que reduziu os custos das máquinas em ordens de magnitude. Com isto, o processo passou por um crescimento de sua utilização na indústria, pela criação de novos campos de atuação, contemplou diferentes usuários e diferentes tecnologias de manufatura (BERMAN, 2012).

A impressão 3D se baseia na fabricação das peças camada a camada, empilhadas, formando o objeto final. A maneira na qual as camadas são formadas, varia de processo a processo. Existem hoje diversos tipos de impressão 3D: FDM, estereolitografia (SLA), processamento digital de luz (DLP), *powderbed*, jato de tinta (3DP) e fusão seletiva a laser (SLM), dentre outros. Em meio a estes, o processo mais popular é o FDM devido a sua simplicidade e baixo custo. O processo de FDM consiste na deposição de um polímero termoplástico fundido para formar o produto moldado por camadas podendo ser facilmente utilizado para diversas aplicações, desde industriais até pessoal (WANG *et al.*, 2017).

A possibilidade de criar objetos de qualquer formato, sem investimento em ferramentário, juntamente com a diminuição dos custos dos equipamentos, levou a uma diversificação de aplicação. Neste contexto, a técnica sendo utilizada para a criação de implantes, modelos, pesquisas, educação e peças de reposição, dentre outras, muito além da prototipagem original. O processo se torna um exemplo de tecnologia disruptiva (RAYNA; STRIUKOVA, 2016), uma vez que a peça é criada diretamente para o consumidor, eliminando a cadeia produtiva de alta complexidade.

Atualmente os processos de manufatura aditiva se deparam com um impasse. Por mais que o processo possa criar objetos de qualquer formato, a peça criada possui propriedades diferentes em relação às peças criadas por processos convencionais produzidas com polímeros termoplásticos. Devido a maneira como a peça é criada, a mesma tem características mecânicas não isotrópicas, além de diferenças morfológicas dos polímeros. A limitada quantidade de informações sobre as variáveis do processo acaba por restringir a sua utilização, principalmente em áreas onde há maior controle na manufatura (THIAGO *et al.*, 2017).

Dentre os materiais poliméricos mais usados na manufatura aditiva, estão o poliácido láctico (PLA) e o copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS), porém existindo pouca, mas crescente pesquisa em outros polímeros termoplásticos. Neste sentido, o objetivo de este trabalho foi realizar um estudo da influência dos parâmetros de processo de FDM nas propriedades físicas e estruturais de peças moldadas por esta técnica, comparado com os da moldagem por injeção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

Avaliar a influência dos parâmetros de processamento do processo de impressão 3D por FDM nas propriedades físicas e estruturais do objeto moldado, utilizando diferentes polímeros e comparando com o processo de injeção.

2.1 Objetivos Específicos

- Identificar, selecionar e avaliar a influência dos parâmetros de processamento de impressão 3D por FDM nas características físicas, térmicas e morfológicas das peças produzidas com PLA.
- Realizar um estudo comparativo das propriedades mecânicas das peças moldadas por FDM e por injeção.
- Determinar a condição ótima de processamento por FDM que apresente propriedades similares às moldadas por injeção no estudo comparativo com peças moldadas de PLA.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Impressão 3D

O processo de impressão 3D, também conhecido como prototipagem rápida, é uma técnica de manufatura aditiva. Contrariando as técnicas tradicionais de manufatura, como a injeção, onde o material é retirado de uma peça base, o objeto é modelado virtualmente e criado pela sobreposição de camadas de material, de maneira a dar forma sólida ao modelo (YADOLLAHI *et al.*, 2017).

O primeiro passo para a criação das impressoras 3D foi dado por Hideo Kodama, com a publicação, em 1981, de um equipamento de prototipagem rápida utilizando foto polímeros a partir de um modelo sólido. Logo após, em 1984, Charles Hull criou o processo de estereolitografia, permitindo que objetos modelados virtualmente fossem utilizados para criar objetos reais. Com o passar dos anos, novas tecnologias foram desenvolvidas e comercializadas (RAYNA *et al.*, 2016).

No final da década de 1980, Scott Crump desenvolveu um novo tipo de tecnologia, se baseando na deposição de materiais fundidos, usualmente polímeros termoplásticos, através de uma matriz em uma plataforma. Esta tecnologia se provou mais simples e barata que as demais e foi comercializada como FDM (modelagem por deposição do fundido, em tradução livre) pela Stratasys Inc. a partir de 1992 (WULLE *et al.*, 2017).

Por terem sido criados para suprir uma demanda específica da indústria, os processos de impressão 3D eram caracterizados por altos custos e pouca utilização fora do seu nicho de criação. Na última década, estes custos diminuíram drasticamente, levando a novas aplicações, não somente na indústria, mas em novas áreas como educação, pesquisa, medicina e produtos personalizados.

Estas mudanças foram impulsionadas por dois fatores. O primeiro sendo o vencimento das patentes originais que levaram ao desenvolvimento de novos equipamentos voltados aos setores industriais e amadores. O segundo fator se deve ao avanço da informática, fator necessário para operação do equipamento, uma vez que a peça a ser criada deve ser modelada digitalmente (BRANS, 2013).

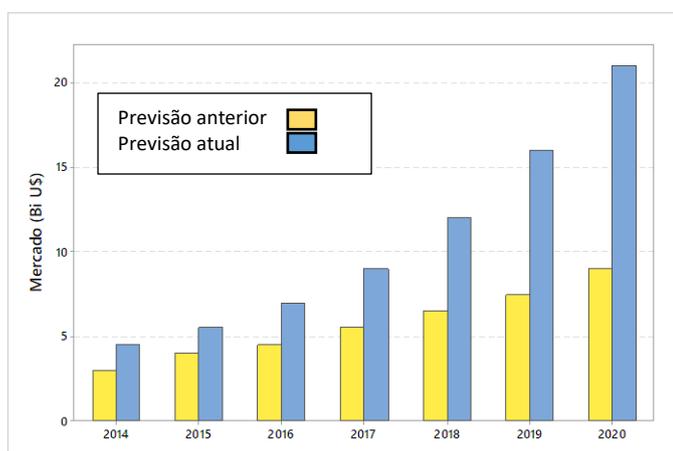
A partir da possibilidade de criar objetos personalizados sem a necessidade de uma indústria especializada atraiu diversos grupos de entusiastas, levando a ideia de uma máquina alto “replicante”. O criador da ideia, Adrian Bowyer, tornou-a pública por meio de licenças GNP, o que deu início ao projeto *RepRap*, que por sua vez, tem como objetivo tornar a impressão 3D disponível a qualquer pessoa. Este projeto, com os modelos Mendel e Prusa, levaram, em alguns anos, à queda dos custos nos equipamentos em ordens de magnitude e à possibilidade de equipamentos pessoais com especificações similares às dos industriais, abrindo portas para novos nichos de aplicação.

Dentro da indústria, a impressão 3D é tida como uma possibilidade de uma nova tecnologia disruptiva, onde, assim como músicas e livros digitais, permitiu às empresas a criação de um novo mercado com diferentes valores agregados. A tecnologia de impressão 3D permite uma empresa sem itens em estoque, com a possibilidade da fabricação de produtos em pequena quantidade ou alto grau de personalização (BERMAN, 2012).

Apesar do ceticismo da sua adoção, provindo da baixa velocidade de produção das impressoras 3D, grupos livres baixaram os custos em ordens de magnitude, permitindo a sua dispersão em diversos novos ramos. Diversas empresas adotaram a tecnologia para acelerar o desenvolvimento ou a produção dos seus produtos. A Boeing, no setor aeronáutico, começou a utilizar SLS para a produção de componentes para suas aeronaves. No mesmo ramo, a GE Aviation e SpaceX também adotaram a tecnologia, assim como outras indústrias. Componentes impressos são utilizados, por exemplo, pela Koenigsegg, BMW e Mercedes (MURR, 2016; PENG, 2016) nos seus automóveis.

Fomentada pela concorrência industrial e entusiastas, junto à redução dos custos dos equipamentos, a impressão 3D viu seu mercado evoluir de forma cada vez maior, com perspectivas de triplicar na próxima década, chegando aos US\$ 20 bilhões, como pode ser visto na Figura 01. Parte deste crescimento se deve às suas características distintas de manufatura, contrárias aos métodos convencionais.

Figura 01 – Previsão de mercado (US\$ bilhões)

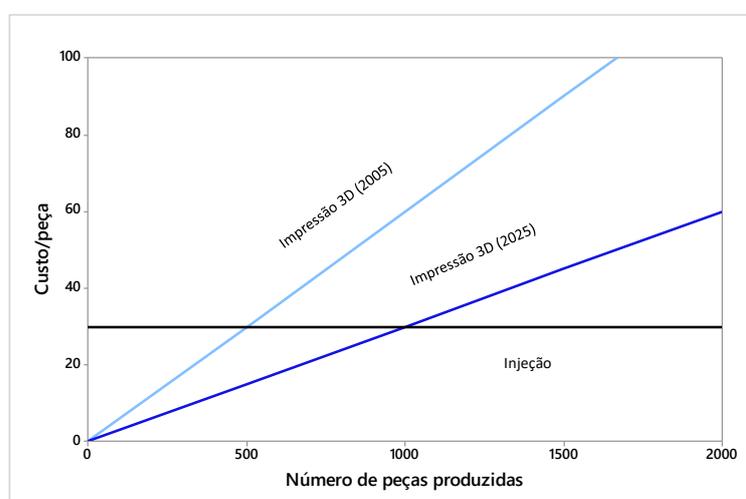


Fonte: Forbes (2015).

<https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2015/03/31/2015-roundup-of-3d-printing-market-forecasts-and-estimates/>

Em relação ao processo de injeção, que requer grandes investimentos em moldes, a impressão 3D possui custos fixos e relativamente baixos justamente por não requerer nenhum ferramentário especial para cada produto, como mostra Figura 02. Além disso, possui menor gasto de matéria-prima visto que a utiliza de forma aditiva, evitando cortes e desbastes utilizados na manufatura tradicional, que levariam a material descartado (LI *et al.*, 2017). O material não utilizado pode, ainda, ser reutilizado no processo, diminuindo o desperdício quando comparado aos processos convencionais (BOPARAI *et al.*, 2016).

Figura 02 – Comparação de custos



Fonte: adaptado de (WELLER, 2015).

A habilidade de iniciar produção em baixo custo e sem tempo de *set-up* confere também uma característica de manufatura que serve como ponte entre o tempo do lançamento inicial do produto e a capacidade total de produção de fábricas, aumentando a competitividade dentro da indústria (WELLER, 2015). Em um modelo tradicional de desenvolvimento do produto, este é desenhado, dá origem a modelos e protótipos que são lançados ao mercado, tendo seu desenvolvimento parado para produção de ferramentas. Este salto que gera um tempo defasado de produção e parada no desenvolvimento, é eliminado por empresas utilizando tecnologias de impressão 3D até que suas linhas de produção estejam redirecionadas.

Algumas empresas preveem que os processos de impressão 3D devem sofrer uma redução de 50% em custo, com um aumento de 4x na sua velocidade, levando a uma maior participação na manufatura direta. No lado acadêmico, se observa um crescente aumento na publicação de artigos sobre o assunto. No entanto, boa parte destes artigos apresentam revisões a respeito um único ponto sobre o assunto, não oferecendo resposta às crescentes perguntas apresentadas pela indústria, referentes as características dos objetos criados.

3.2 Exemplos e aplicações

O termo impressão 3D é atualmente sinônimo para processo de manufatura aditiva, definido pela ASTM como “processo de união de materiais para fabricação de objetos a partir de um modelo 3D, utilizando camadas ao invés de metodologias de manufatura subtrativa” (52900:2015, 2015).

Estes métodos apresentam diferenças nas suas características e materiais utilizados, mas retém a ideia original, tendo a capacidade de transformar diretamente modelos virtuais complexos em objetos finais. Os modelos 3D são primeiramente divididos em camadas. Cada camada é adicionada em etapas ao objeto a ser fabricado, de acordo com a técnica utilizada, como mostra a Figura 03. A conversão do modelo virtual em camadas e código de máquina é feita por *softwares* específicos chamados *slicers*, e leva em consideração os parâmetros a serem utilizados no processo (BIXBY, 2014; STEUBEN et al., 2016).

Figura 03 – Princípio do processo de impressão 3D



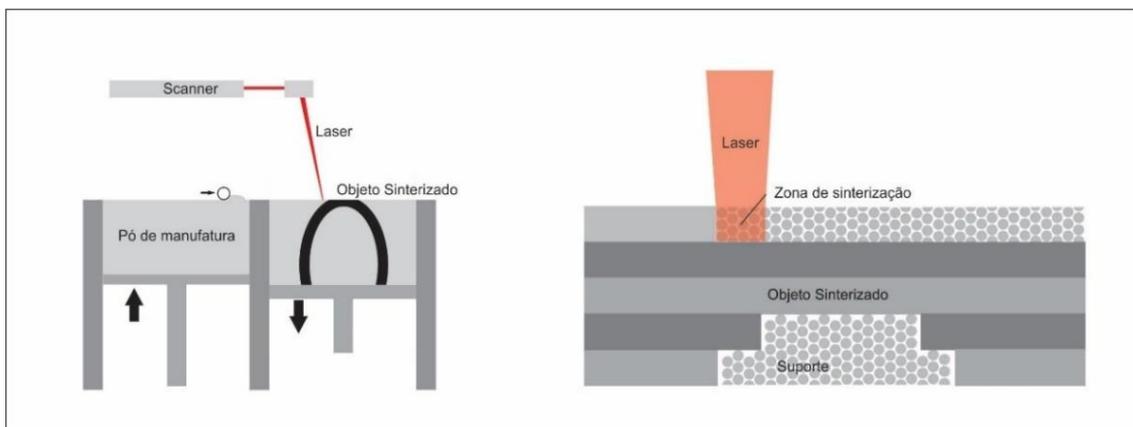
Fonte: adaptado de (WELLER, 2015).

Os principais processos de impressão 3D são os seguintes:

- *Selective Laser Sintering (SLS)*

O processo de sinterização a laser é o processo mais comumente utilizado para metais. Nele, o material em pó é sinterizado por um feixe de laser em cada camada. Após a sinterização da camada, uma nova camada de pó é dispersa para ser sinterizada acima da anterior, como se observa na Figura 04. Peças de geometrias complexas em diferentes ligas metálicas podem ser obtidas (STEUBEN et al., 2016). Variantes deste processo utilizam não somente metais, mas também cerâmicos, polímeros e vidros.

Figura 04 – Sinterização a laser

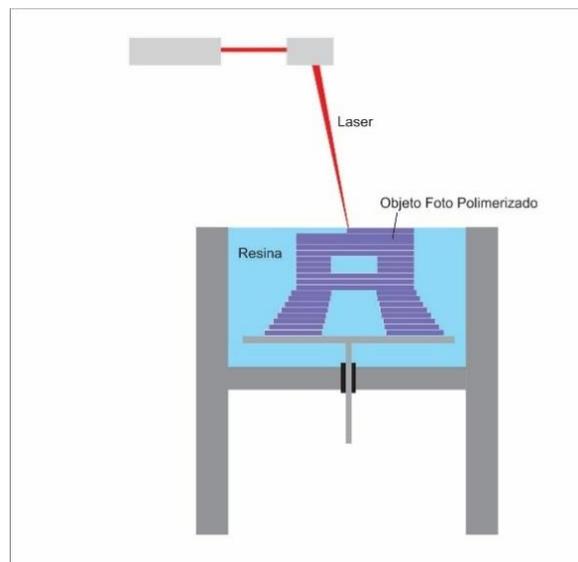


Fonte: adaptado de (WANG, X. et al., 2017).

- *Stereolitography (SLA)*

Durante o processo de estereolitografia, a resina de um foto polímero líquido é curado por luz UV ou laser, causando a sua solidificação como é possível verificar na Figura 05. Após a solidificação da camada, a plataforma é movimentada de forma a restituir a resina para a próxima camada a ser processada (WANG *et al.*, 2017). A resolução da técnica é limitada apenas pelo projetor da fonte de luz e permite a criação de geometrias complexas em alta resolução, mas requer suportes para as peças, períodos de pós-cura e é limitada a apenas alguns materiais.

Figura 05 – Estereolitografia

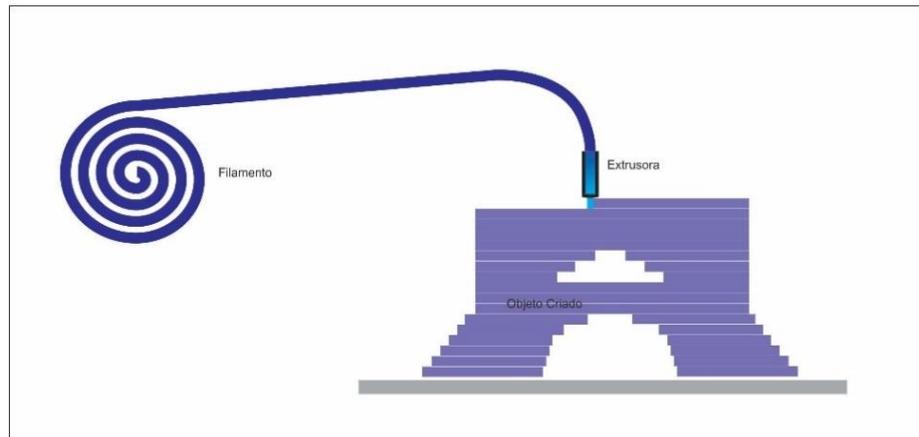


Fonte: adaptado de (MURR, 2016).

- *Fused Deposition Modeling (FDM)*

O processo de deposição do fundido, também conhecido como fabricação por filamento fundido, é um dos mais simples e baratos comercialmente. Nele o material é fundido em um cabeçote, que se move depositando o material em um percurso definido, formando o desenho de cada camada do objeto, com se observa na Figura 06. O material depositado se adere diretamente à camada anterior, para que a próxima possa ser depositada (GOMEZ-GRAS *et al.*, 2017). Este processo pode imprimir geometrias complexas, mas de menor acabamento e com menor velocidade quando comparada ao processo de SLA. Uma variedade cada vez maior de termoplásticos vem sendo utilizados no processo.

Figura 06 – Modelagem por deposição do fundido

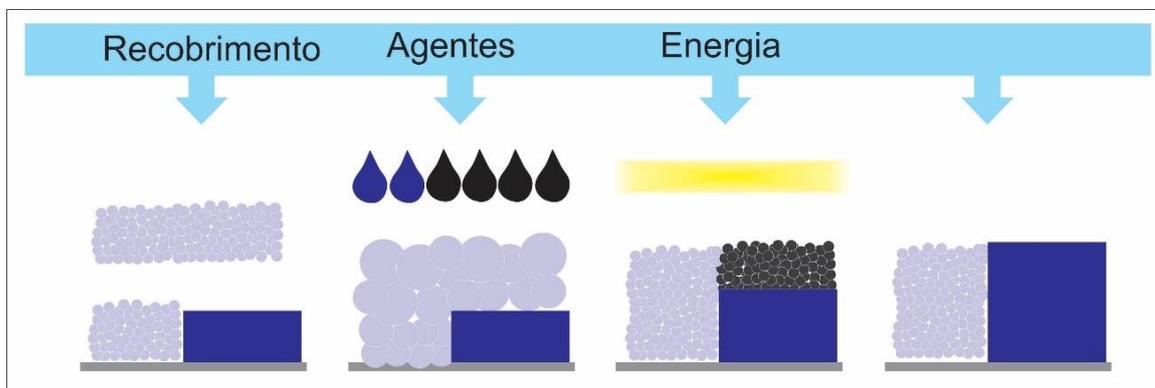


Fonte: adaptado de (TIAN *et al.*, 2016).

- Multijet

O processo Multijet se parece muito com o processo de uma impressora convencional. Para cada camada, o material e um agente são ejetados do cabeçote da mesma maneira que uma impressora a tinta, a qual o nome faz analogia. Após a camada ser definida, o material é fundido e solidificado, passando a compor a peça, como visto na Figura 07. Este processo permite a utilização de diversos materiais como polímeros, cerâmicos, metais e compósitos (LEE *et al.*, 2017).

Figura 07 – Multijet



Fonte: adaptado de (MURR, 2016).

Produtos criados por impressão 3D são utilizados nas mais diversas áreas. Tendo início na prototipagem rápida, hoje a técnica vai muito além, sendo utilizada como partes de projetos maiores ou diretamente para o consumidor final (BASSETT *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2017) nas áreas automotiva, aeroespacial, médica, acadêmica,

industrial, militar ou arquitetura, dentre outras. Aplicações incluem, próteses e implantes, moldes para peças, ferramentas e peças de reposição, protótipos e objetos personalizados, para citar alguns.

Perspectivas de futuras aplicações são difíceis de identificar por se tratar de uma tecnologia emergente e que pode ser adaptada a criatividade do usuário, mas algumas áreas promissoras incluem a bioimpressão, casas, veículos e peças mais complexas.

3.3 Modelagem por deposição do fundido (FDM)

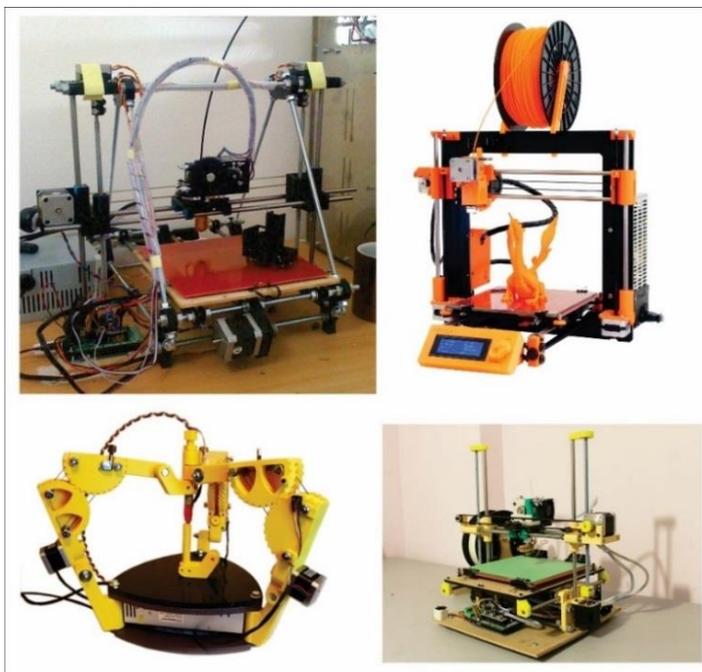
O processo de FDM, inicialmente comercializado pela Stratasys Inc., cresceu em popularidade com o projeto *RepRap*, se tornando o mais utilizado mas mantendo os mesmos conceitos (BOSCHETTO *et al.*, 2016). O filamento termoplástico é fundido e depositado dando origem às camadas e à peça criada. Os materiais utilizados podem variar entre os mais comuns, PLA e ABS, e materiais emergentes na área de impressão 3D como PET, Nylon, PP, PC, TPU, HIPS, PVA, PMMA e filamentos com fibras (NING *et al.*, 2015; DUIGOU, LE *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2017).

As impressoras FDM podem apresentar diferentes arquiteturas, como visualizado na Figura 08, dependendo da estrutura. Usualmente, esta estrutura suporta a placa de controle, a fonte, a mesa e o cabeçote de injeção quem também pode ser chamado de extrusora. A estrutura deve ser firme e possibilitar a livre movimentação do cabeçote e da mesa, quando ocorre, de maneira a diminuir o erro de posicionamento (GO *et al.*, 2017). Em relação aos motores e sua movimentação, estes costumam permitir passos na ordem de micron, muito menores que o diâmetro da matriz.

O cabeçote de injeção, parte que efetivamente extruda o material e dá forma ao objeto, assim com as impressoras, possui diferentes modelos. As características principais, no entanto, permanecem as mesmas. Um motor de passo que pode fazer parte do cabeçote, dando origem ao termo extrusora direta, ou pode ser acoplado a estrutura, sendo chamado de extrusora de Bowden, empurra o filamento através da matriz. Extrusoras de Bowden reduzem a massa do cabeçote, possibilitando, em

teoria, a utilização de maiores velocidades. Em contrapartida, a distância entre o motor de passo e a extrusora provoca a histerese do material, que é constantemente pressionado e puxado pelo motor. Este problema é mais evidente para materiais maleáveis como o PET (poli(tereftalato de etileno)) (GO *et al.*, 2017).

Figura 08 – Modelos de estruturas



Fonte: adaptado de RepRap (2018)
<https://www.reprap.org>

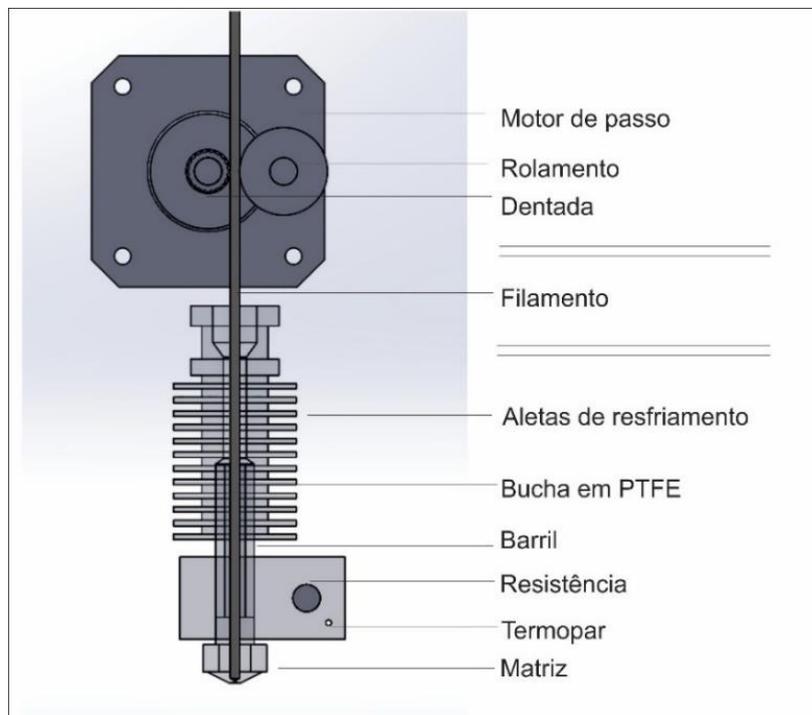
A estrutura que empurra o filamento pode ser chamada de *cold end*, em alusão a parte que efetivamente funde o material, chamada de *hot end*. O *hot end* possui o aquecedor para a fusão do material, um termostato para controle da temperatura e a matriz pela qual o material é extrudado, o que pode ser observado na Figura 09. Usualmente um tubo de PTFE é inserido no design do *hot end* para prevenir que o material fundido seja aderido às suas paredes, principalmente durante a retração do filamento pelo motor de passo (JEREZ-MESA *et al.*, 2016). Em diversos casos, o *hot end* apresenta aletas metálicas para dissipar o calor, prevenindo que o material funda antes de chegar perto da matriz e que haja danos à estrutura, já que, em diversos modelos, o suporte da estrutura é criado a partir de peças impressas.

O filamento é empurrado de acordo com o controle da máquina pelo motor de passo, de forma a depositar o material no local específico e de maneira adequada. Apesar de sofrer retrações para evitar escorrimento do material fundido durante o

movimento do cabeçote, o filamento é continuamente alimentado, de acordo com o código gerado para o objeto. Dentro do *hot end* constantemente há uma parte já fundida de material e o avanço do filamento ainda em estado sólido, acima, pressiona o material fundido abaixo, presente na matriz, para que uma parte seja depositada no ponto devido (YANG *et al.*, 2017).

O orifício da matriz utilizada em FDM usualmente apresenta entre 0,5 e 0,2 mm de diâmetro. Matrizes menores possibilitam peças com melhores qualidades dimensionais e acabamento, mas levam a maior tempo para a fabricação da peça. Já matrizes de maior diâmetro possibilitam maiores velocidades a um custo maior de acabamento (DURGUN; ERTAN, 2014). Algumas máquinas, com diferentes cabeçotes, utilizam matrizes diferentes para a fabricação de peças com elevado nível de acabamento, minimizando o tempo de manufatura.

Figura 09 – Cabeçote de impressão.



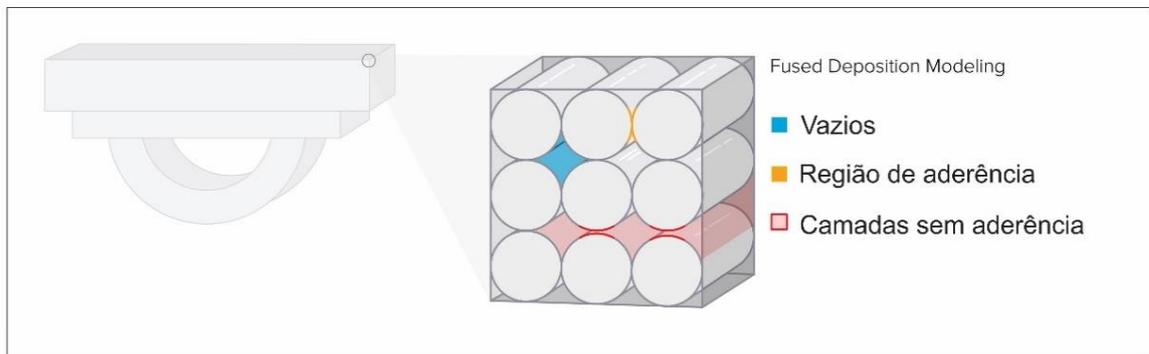
Fonte: adaptado de (JEREZ-MESA *et al.*, 2016).

O material extrudado pelo cabeçote é inicialmente depositado sobre uma mesa preparada para recebe-lo. Isto é necessário, pois a primeira camada de material deve aderir a mesa, evitando que a peça se descole durante o processo de produção. Usualmente a mesa é aquecida, dando origem ao termo *heated bed*. Uma mesa

aquecida proporciona maior aderência das primeiras camadas e previne que o material sofra *warping*, empenamento durante o processo, o que ocorre devido a diferenças de temperatura na peça e resfriamento não uniforme (CHOI *et al.*, 2016).

Ao ser depositado, o material rapidamente resfria, se solidificando e tomando a forma da sua deposição. Por ser depositado em pequenas linhas, ocorrem alguns efeitos no processo, ausentes nos processos convencionais (ALIHEIDARI *et al.*, 2017). O mais evidente é a formação de vazios entre as linhas de deposição, como observado na Figura 10, mesmo para quando o preenchimento da peça é ajustado para 100%. Alguns autores minimizam estes vazios aplicando um diferencial na quantidade de massa depositada (DAWOUD *et al.*, 2016).

Figura 10 – Linhas de deposição do fundido



Fonte: adaptado de Formlabs (2018).

Os *softwares* utilizados para criar as camadas e o código de máquina, *slicers*, levam a área transversal de deposição em consideração para o cálculo do fluxo de massa, o que deveria, em tese, eliminar este problema. Na prática estes vazios ainda ocorrem, devido a desvios de fluxo no processo de deposição (WANG *et al.*, 2017).

Juntamente com os vazios, existe a influência da ligação entre as linhas de deposição. Se as condições não forem adequadas para o material, este não terá aderência à linha adjacente, promovendo descolamento e possivelmente levando a falha da peça. Esta ligação ocorre na forma de coalescência do polímero fundido, efeito no qual as cadeias poliméricas das diferentes linhas de deposição se entrelaçam, formando uma única fase. O grau de coalescência depende não somente do material, mas também dos parâmetros utilizados para o processo (SUN *et al.*, 2008; COSTA *et al.*, 2017).

3.4 Características do processo de FDM

Os parâmetros de processamento que afetam as características do objeto criado por FDM podem ser divididos em dois tipos, geométricos e morfológicos, como pode ser observado no Tabela 01. Os parâmetros de preenchimento, como grau de, orientações e tipo de preenchimento são referenciados como geométricos, pois afetam a geometria do mesmo e apresentam alta influência nas propriedades mecânicas, podendo em alguns casos criar objetos com propriedades opostas. Já os parâmetros de temperatura de extrusão e da mesa, velocidade de extrusão e espessura da camada afetam a morfologia do polímero depositado, sendo classificados como parâmetros morfológicos.

Tabela 01 – Tipo e parâmetro de processamento em FDM

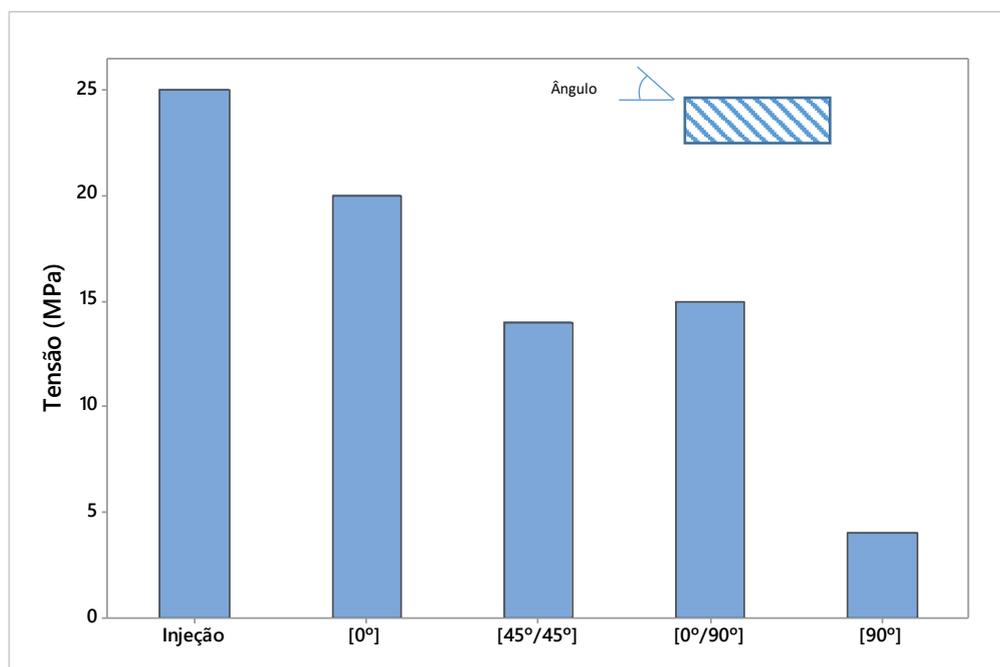
Tipo	Parâmetro
Morfológico	Temperatura de extrusão
	Velocidade de deposição
	Espessura da camada
	Temperatura da mesa
Geométrico	Orientação do preenchimento
	Tipo de preenchimento
	Grau de preenchimento

Estudos sugerem que os parâmetros de preenchimento do tipo geométrico têm alta influencia tanto na resistência mecânica quanto no modo de falha dos objetos produzidos por FDM, exemplificado na Figura 11. Isto se deve a vazios entre as linhas de disposição e a própria interface entre as mesmas, que não possuem resistências de igual valor ao material (LI *et al.*, 2002; CROCCOLO *et al.*, 2013; WU *et al.*, 2015; RAVI *et al.*, 2016).

Estas interfaces criadas possuem resistências menores do que a do material em si, analogamente a laminados de fibra e matriz, podendo ser modelados pela teoria clássica de laminados (AHN *et al.*, 2002). Os pontos de menor resistência se concentram ao longo dos planos de deposição, como entre as camadas, que são mais propícios a falha, dependem do carregamento imposto. Isto leva a peça criada a ter

menores resistências ao longo destas interfaces em carregamentos onde há solicitação de tensão sobre a mesma (RANKOUHI *et al.*, 2016; TORRADO; ROBERSON, 2016; ZOU *et al.*, 2016a). Isto é verificado tanto por ensaio de tração quanto de impacto. Para tração, a resistência máxima é encontrada para preenchimentos em linhas de deposição ao longo do eixo da peça, por apresentar menores esforços sobre a interface (ALIHEIDARI *et al.*, 2017). Para ensaios de impacto, os autores divergem. Vega *et al.* (VEGA *et al.*, 2011) afirmam que a orientação ao longo do eixo da peça apresenta melhores resultados, enquanto (DAWOUD *et al.*, 2016) apresentam melhores resultados em ângulos de 45°. Divergência que estes autores supõe ocorrer pelos diferentes métodos de falha ocasionados durante o ensaio de tração e pela diferença de esforços atuantes nos ensaios de tração e impacto.

Figura 11 – Variação da resistência

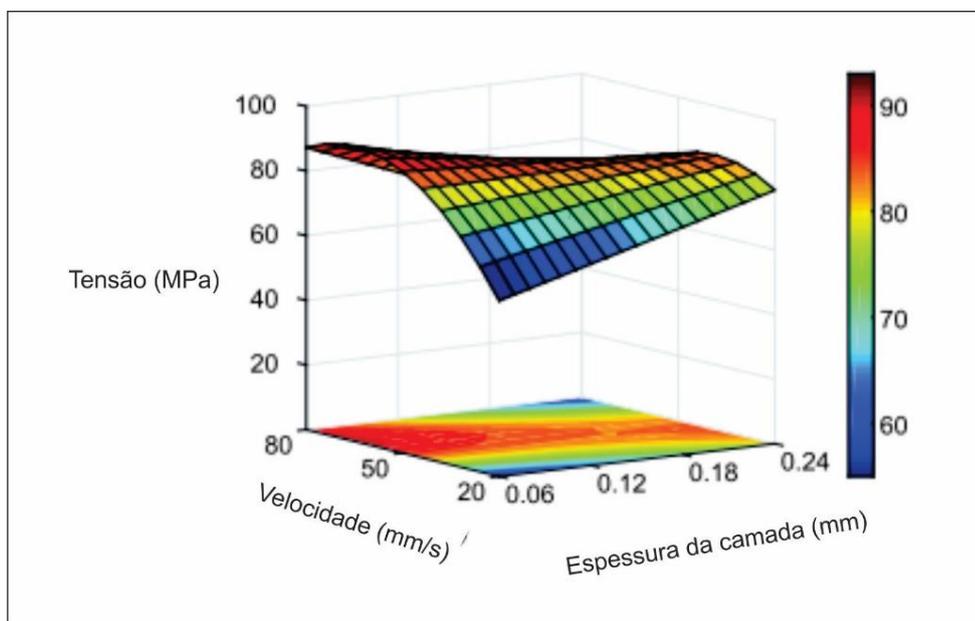


Fonte: adaptado de (DAWOUD *et al.*, 2016).

A criação da interface em si é influenciada pelos parâmetros de processamento do tipo morfológico, velocidade de deposição, temperatura ambiente e do cabeçote e espessura da camada (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2017). Estas variáveis influenciam diretamente a maneira na qual o material fundido resfria. Um resfriamento que proporcione maiores tempos com o material acima de uma temperatura crítica favorece a coalescência, criando interfaces mais coesas entre as

linhas de deposição, que são pontos críticos de falha. Este efeito é influenciado de maneira diferente para cada parâmetro, como visto na Figura 12, o que permite compensar o efeito de um parâmetro através do ajuste dos demais. Como exemplifica a figura, a perda de resistência mecânica causada pela variação da velocidade, pode ser compensada pela alteração da espessura da camada, e vice-versa.

Figura 12 – Balanceamento de parâmetros



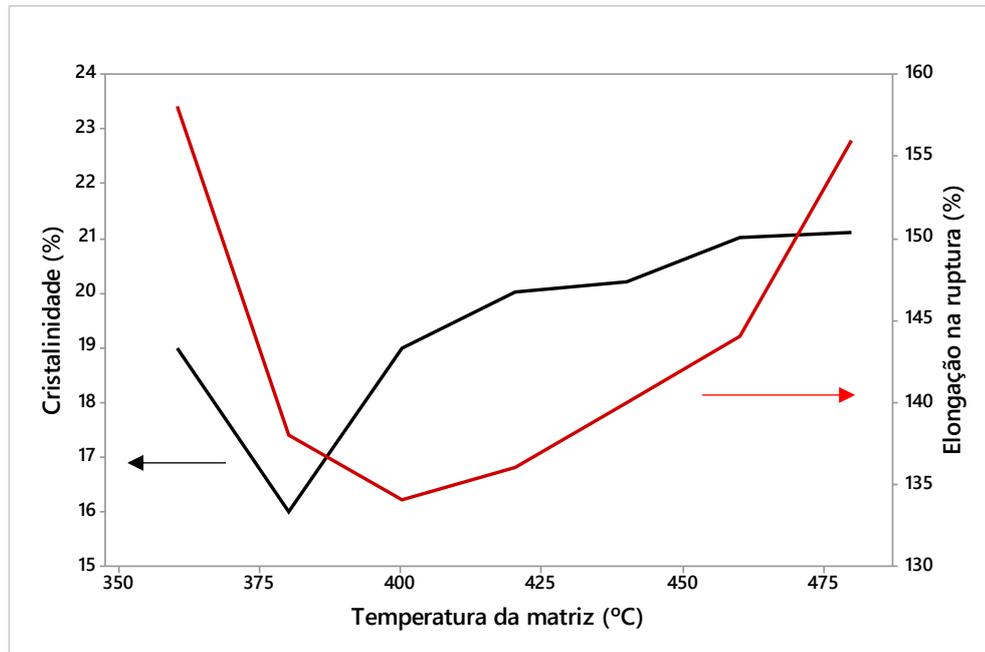
Fonte: adaptado de (CHACÓN *et al.*, 2017).

Outro fenômeno característico ao processo de FDM ocorre durante o resfriamento e deposição das linhas (KOUSIATZA; KARALEKAS, 2016; COSTA *et al.*, 2017). Quando uma linha é depositada, esta aquece ligeiramente as adjacentes, levando a um rápido efeito de reaquecimento. Este reaquecimento ajuda na formação de interfaces mais efetivas e é influenciado pelos parâmetros de processamento, especialmente pelos parâmetros morfológicos.

Para o caso de polímeros parcialmente cristalinos, estes parâmetros também afetam a cristalinidade do material nas diferentes áreas da peça criada (WANG; GARDNER, 2017; YANG *et al.*, 2017). Maiores tempos de resfriamento, ocasionados pela temperatura ou velocidade, proporcionam maior tempo para que o material polimérico se organize na forma de cristalitos, o que tem influência direta nas propriedades mecânicas, como visualizado na Figura 13. Nesta é visto um aumento

do grau de cristalinidade com o aumento da temperatura da matriz, enquanto a elongação de ruptura decai inicialmente e aumenta após certa temperatura.

Figura 13 – Propriedades e cristalinidade



Fonte: adaptado de (YANG et al., 2017).

Esta influência é vista em processos convencionais, como injeção e extrusão, mas durante o processo de FDM são influenciadas pelo fenômeno de reaquecimento. Por haver diversas passagens do cabeçote pela mesma zona, em camadas adjacentes, o material acaba por sofrer reaquecimento durante o próprio resfriamento (NICKEL *et al.*, 2001; CASAVOLA *et al.*, 2017). Este reaquecimento leva a criação de núcleos de cristalização, mas sem tempo para o seu crescimento. Este efeito influencia de forma direta as propriedades mecânicas e é referenciado em estudos como uma nova possibilidade de controlar a microestrutura do material, uma vez que permite, em tese, a criação de objetos com diferentes características micro estruturais ao longo do seu volume.

No entanto são encontradas inúmeras limitações quanto ao processo. Mais discutida recentemente, a influência dos parâmetros de processamento nas características do material ainda possui poucos estudos, levando o processo a ser visto como incerto pela indústria (YADOLLAHI; SHAMSAEI, 2017). Outro ponto limitante à utilização de FDM são os materiais. Os materiais mais utilizados são PLA

e ABS pela sua facilidade de processamento, apesar da recente entrada de diferentes materiais no mercado como PET, nylon e PP (TANIKELLA *et al.*, 2017).

Apesar da versatilidade, a utilização de apenas dois materiais dentre uma infinidade, torna o processo limitado. A utilização de outros materiais poliméricos requer mais estudos devido ao fato das máquinas atuais não serem aptas para processá-los (GO *et al.*, 2017). Devido a fatores de processamento, pode ser necessária a utilização de temperatura elevada, mas problemas com temperatura podem ser facilmente contornados utilizando-se equipamentos mais resistentes. No entanto, dependendo do material, é possível verificar empenamento da peça devido a diferenças de tensão e temperatura durante o resfriamento (GALANTUCCI *et al.*, 2015; SINGH *et al.*, 2017).

A dificuldade de se utilizar outros materiais provém da capacidade de processamento. O material a ser utilizado deve ter viscosidade para poder ser empurrado através da matriz, sem que haja perda de forma durante a deposição. Além disso, deve apresentar boa coalescência, permitindo interfaces de resistência (ESPALIN *et al.*, 2014; PAN *et al.*, 2015). Em casos extremos a falta desta característica leva a inviabilidade do processo por não haver adesão entre as camadas. Em resumo, o material utilizado deve não deve permitir o empenamento da peça criada.

3.5 Processamento de materiais poliméricos

Polímeros termoplásticos são materiais que podem ser aquecidos e moldados em uma forma definida ao serem resfriados. Como todos os polímeros, os termoplásticos são constituídos de longas cadeias moleculares que interagem entre si através de forças intermoleculares fracas. Com o aumento da temperatura, a energia térmica permite maior movimentação das cadeias, levando o polímero a um estado de líquido viscoso, onde ocorre o processamento do material.

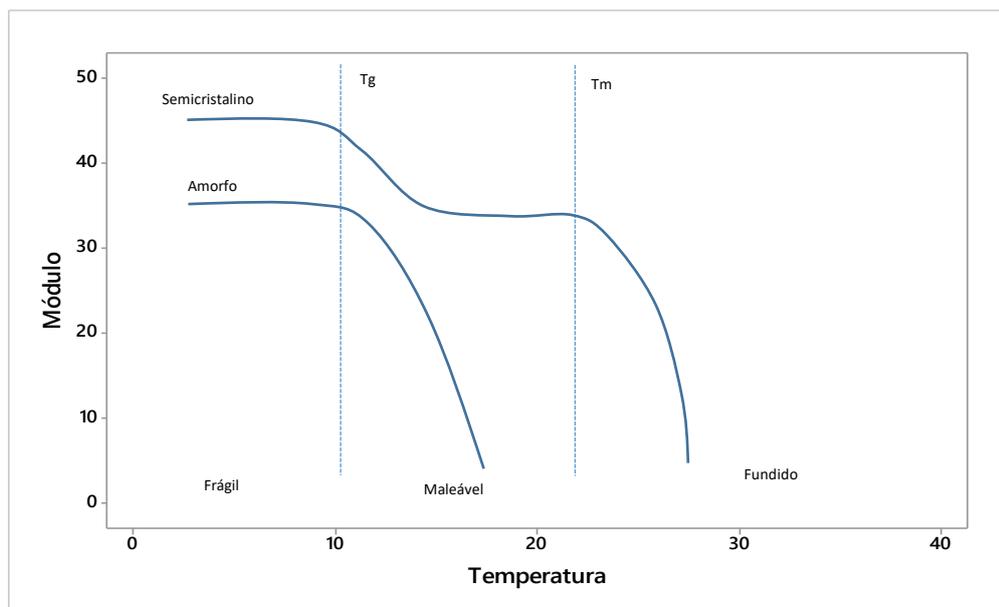
Os métodos mais comuns de processamento de materiais termoplásticos são moldagem a sopro, rotomoldagem, termoformagem, injeção e extrusão, dentro das quais existem diversas variações para cada processo. Durante o processamento, o

material em forma bruta, usualmente em pellets, é aquecido ao seu estado viscoso, no qual pode ser processado. Para o caso de extrusão, o material é alimentado a um cilindro aquecido, no qual é empurrado pela rosca do equipamento, ainda sob aquecimento. A rosca força o material por uma matriz, tomando a forma do produto de maneira contínua, mas limitada a seções transversais (MANRICH, 2005a).

Materiais poliméricos exibem dois tipos de morfologias distintas no estado sólido, um estado amorfo, presente em todos os polímeros e um estado cristalino, encontrado em polímeros semicristalinos. No do estado amorfo, as moléculas se encontram organizadas de forma aleatória e entrelaçadas. Este estado costuma ser transparente e de característica mais dúctil. Já o estado cristalino é encontrado em polímeros de estruturas regulares e é formado por moléculas ordenadas e empacotadas em regiões denominadas cristalitas. Por possuir força intermolecular mais alta associada, estes cristalitas tornam o material mais resistente e, por criar diferentes fases no material, torna-o opaco (CALLISTER, 2007).

Em temperaturas baixas as moléculas dos polímeros vibram com baixa energia, sendo conectadas pelas forças intermoleculares e dando ao material uma característica rígida e frágil. Com o aumento da temperatura, as moléculas vibram com maior energia até a temperatura de transição vítrea (T_g), onde ocorre, junto a um aumento de volume, uma mudança de fase, transformando a fase amorfa de sólida para borrachosa. Esta fase se tornara cada vez menos viscosa com o aumento da temperatura, como visto na Figura 14. Contudo, as fases cristalinas somente são desfeitas em temperaturas mais altas, devido às suas maiores forças de interação. A temperatura onde isto ocorre é denominada temperatura de fusão (T_m). Polímeros semicristalinos se encontram em um estado de sólido deformável entre a T_g e a T_m , uma vez que há mobilidade pela parte da fase amorfa, mas há um rígido entrelaçamento criado pelas partes cristalinas, e assim, se comportam de forma fluida acima da T_m . (CANEVAROLLO, JR., 2007)

Figura 14 – Efeito da temperatura na viscosidade e módulo



Fonte: adaptado de (CALLISTER, 2007)

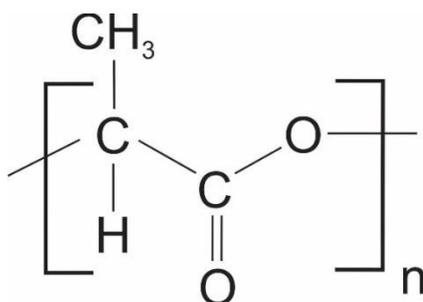
O processamento dos polímeros não é afetado diretamente apenas por suas características térmicas, mas também pela maneira como se dá o resfriamento, convergência que define a microestrutura do material. Polímeros semicristalinos tem seu grau de cristalinidade definido nesta etapa de resfriamento. Maiores taxas de resfriamento induzem estruturas predominantemente amorfas, enquanto resfriamentos mais brandos possibilitam a formação de cristalitos, uma vez que estes são formados e crescem entre a Tg e a Tm. Acima da Tm, os núcleos são destruídos pelos movimentos térmicos, enquanto abaixo da Tg não há movimentação suficiente das cadeias para o seu crescimento.

3.6 Políácido Láctico

O poliácido láctico (PLA), Figura 15, é um polímero biodegradável com potencial para substituir polímeros baseados no petróleo (FARAH *et al.*, 2016). É um termoplástico de alta transparência, rigidez e modulo elástico, com baixa taxa de crescimento de cristalitos, podendo ser utilizado para a produção de filmes, peças termo formadas, injeção ou embalagens.

O ácido láctico, molécula base do PLA pode ser obtida da fermentação de açúcares obtidos da cana ou do amido (GARLOTTA, 2002), tornando-o um polímero proveniente de fontes renováveis. A polimerização do ácido láctico em PLA pode ser realizada por diferentes métodos, a saber, policondensação, polimerização por quebra de anel e métodos diretos como desidratação azeotópica e polimerização enzimática. Todos estes métodos requerem controle rigoroso de temperatura, pressão e pH (XIAO *et al.*, 2012).

Figura 15 – Estrutura do PLA



Fonte: adaptado de (GARLOTTA, 2002).

Devido a sua natureza quiral, o PLA possui diferentes isômeros associados. O homopolímero se apresenta na forma branca, opaca e rígida, com Tg e Tm nos valores de 55°C e 175°C, respectivamente. Os dois isômeros dão origem a materiais distintos: poli-D-ácido láctico (PDLA), cristalino com cadeia regular, poli-L-ácido láctico (PLLA), semi cristalino e também de cadeia ordenada, e o poli-D,L-ácido láctico, que tem estrutura amorfa (TÁBI *et al.*, 2010; BATTEGAZZORE *et al.*, 2011).

O PLA apresenta outras características atraentes além das propriedades térmicas. Sua boa propriedade de barreira para CO₂ e O₂, comparável ao PET, e baixa toxicidade possibilita sua utilização diretamente em contato com os alimentos ou, até mesmo em implantes biológicos. Em relação ao módulo elástico, o PLA apresenta maior valor em comparação com PS, PP e HDPE, e menor valor quando comparado aos mesmo em relação a resistência ao impacto. Estas propriedades fazem com que o PLA possa ser utilizado em qualquer equipamento para processamento de materiais poliméricos e tenha sua maior aplicação no embalagem de alimentos (HAMAD *et al.*, 2015), mas também é utilizado na fabricação de garrafas, têxteis, filmes e produtos de higiene, dentre outros (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

Porém, o PLA possui desvantagens que dificultam sua aplicação. Por ser muito frágil, com menos de 10% de alongação na fratura, não é desejável para aplicações que requeiram maiores performances mecânicas. Sua degradação faz com que tenha uma janela de processamento estreita e perca propriedades mecânicas quando mantido em ambientes úmidos (ROCCA-SMITH *et al.*, 2017). Para contornar estes obstáculos, modificações devem ser feitas ao material, como copolimerização, preparação de blendas, utilização de aditivos ou de fibras para a criação de compósitos (HAMAD *et al.*, 2011; DAI *et al.*, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O material polimérico utilizado nesta pesquisa foi o poliácido láctico (PLA) na forma de filamentos de diâmetro médio de 1,75 mm para impressão 3D. A amostra de filamento de PLA é da cor azul produzido pela empresa Cliever Ltda. As propriedades fornecidas pelas empresas são relacionadas na Tabela 02.

Tabela 02: Propriedades dos polímeros usados fornecidos pelo fabricante.

Propriedade	
Densidade (g/cm ³)	1,25
Temperatura de processamento (°C)	180-220
Temperatura de fusão (°C)	160

4.2 Metodologia

O trabalho foi dividido em duas etapas visando separar as influências dos parâmetros efetivamente geométricos do preenchimento, das influências dos parâmetros de processamento em si no material de preenchimento.

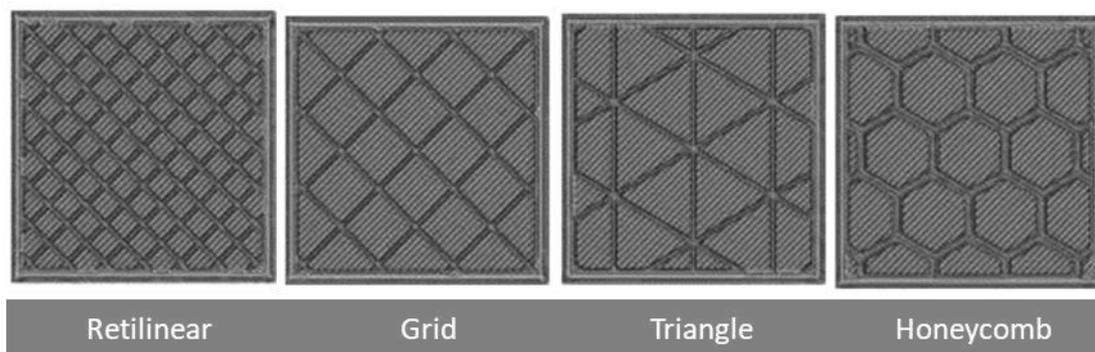
Em um primeiro momento, foram estudadas as variáveis geométricas do processo. Nesta etapa, corpos de prova para teste de impacto foram moldados por FDM avaliando separadamente 3 fatores:

- tipo de preenchimento;
- grau de preenchimento;
- orientação (ângulo) do preenchimento.

O *software* utilizado, Slic3r, permite a programação de diferentes tipos de preenchimentos. No entanto, apenas os preenchimentos de padrão linear e retilinear apresentaram a possibilidade de um preenchimento completo, sendo os demais,

utilizados para preenchimentos com vazios, com o intuito de poupar material e tempo de processamento. Por este motivo, para a análise de diferentes preenchimentos, se optou por utilizar grau de preenchimento de 40%. Os diferentes tipos de preenchimentos utilizados podem ser visualizados na Figura 16. O padrão retilinear apresenta camadas intercaladas em orientações perpendiculares. O padrão grid apresenta o mesmo padrão em grade, mas definido igualmente em todas as camadas e com maior espaçamento entre as linhas. Já os padrões Triangular e *Honeycomb* apresentam a deposição de forma a formar, respectivamente, uma estrutura composta por triângulos, e uma estrutura formada por hexágonos, como em materiais compósitos.

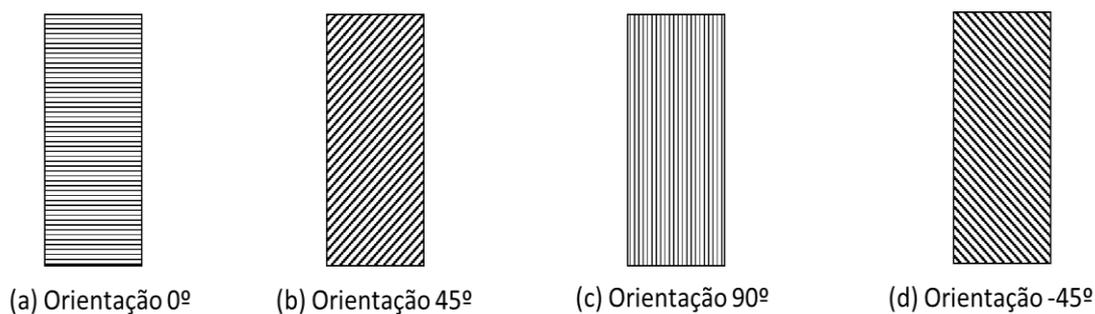
Figura 16: Padrões utilizados para preenchimento.



Para o estudo da influência do grau de preenchimento, se optou pela utilização do perfil retilinear, que cria camadas lineares intercaladas em 90° , muito parecido com fibras unidirecionais em materiais laminados, por motivo análogo ao do estudo do tipo de preenchimento. Neste caso, o padrão linear puro não se comporta de forma a resistir a impacto, tornando o padrão retilíneo a escolha mais aproximada. Foram utilizados graus de preenchimento de 20, 40, 60 e 80%.

Já para o estudo do comportamento do ângulo do preenchimento foi utilizado o padrão linear alinhado, visando a utilização de peças com 100% de preenchimento. Foram utilizados 4 ângulos distintos, como mostra a Figura 17. Desta forma, os resultados podem ser comparados diretamente com os resultados obtidos por ensaio de corpos de prova de impacto criados pelo processo de injeção.

Figura 17: Configuração das peças a serem moldada segundo a orientação (ângulo) de preenchimento.



As diferentes variações de configuração utilizadas em cada grupo de amostra se encontram na Tabela 03. Nesta etapa os parâmetros de processamento foram definidos como constantes também indicados na Tabela 03.

Tabela 03 - Configurações da geometria de deposição usadas por FDM

Designação	Tipo de preenchimento	Orientação (°)	Preenchimento (%)
Grid	Grid	0	40
HC	Honeycomb	0	40
Triangle	Triangular	0	40
Reti	Retilinear	0	40
G0	Linear	0	100
G-45	Linear	-45	100
G+45	Linear	45	100
G90	Linear	90	100
R20	Retilinear	0	20
R40	Retilinear	0	40
R60	Retilinear	0	60
R80	Retilinear	0	80
Temperatura de extrusão (°C)	200	Velocidade de extrusão (mm/s)	20
Temperatura da mesa (°C)	20	Espessura da camada (mm)	0,3

Na segunda etapa foram estudadas as influências das variáveis de processamento nas características do material. Para isto foram criados corpos de prova pelos processos de injeção e FDM, sendo que por FDM variou-se os seguintes fatores:

- temperatura de extrusão;
- temperatura da mesa;
- velocidade de impressão;
- espessura da camada.

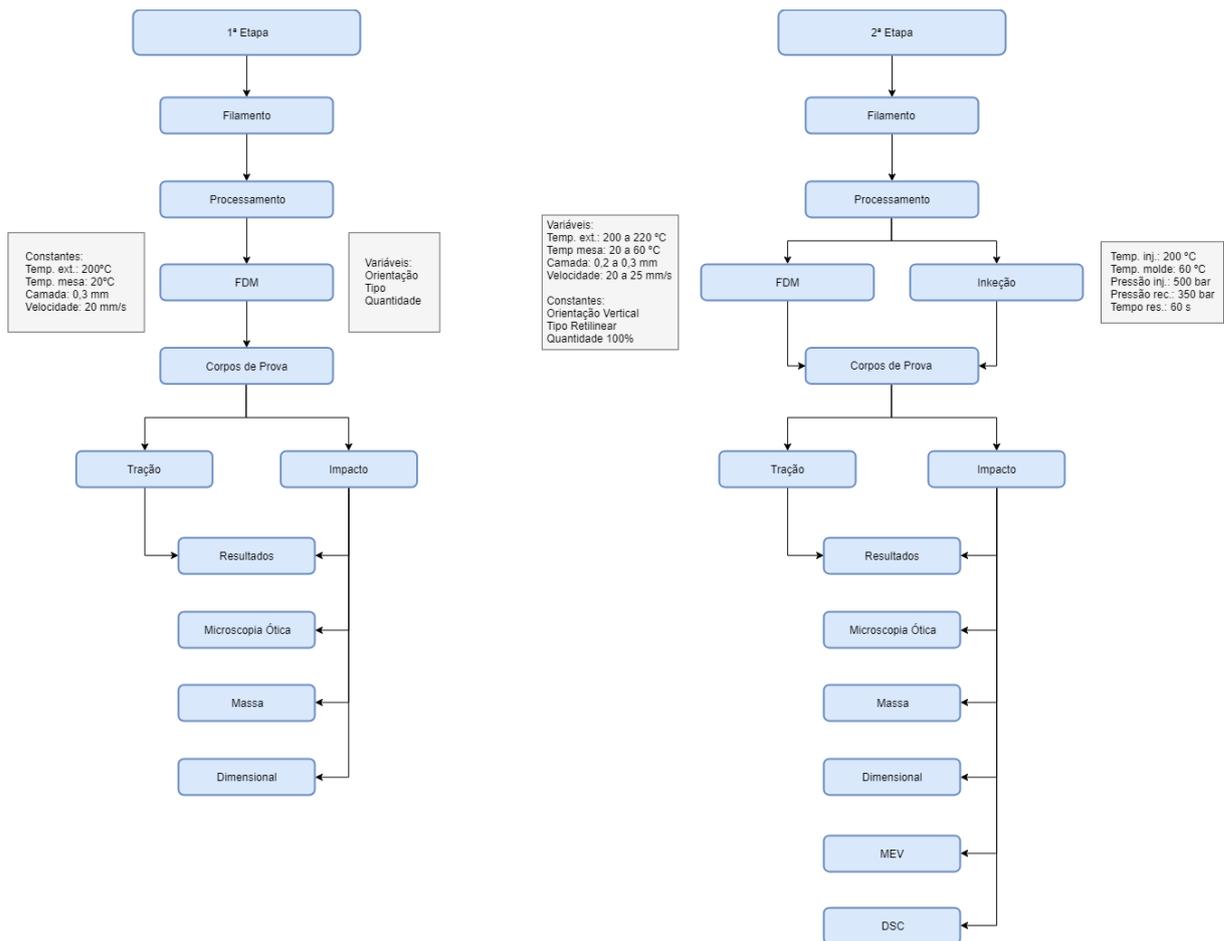
Nesta etapa foram moldados, por FDM, corpos de prova tanto para ensaios de tração quanto para impacto baseados na norma ASTM 638 (tipo 5) e ASTM D256. Para possibilitar uma comparação mais direta, foi selecionado preenchimento linear, com 100% de preenchimento e ângulo em 90° (ZOU *et al.*, 2016). Esta escolha se deu principalmente pela utilização dos corpos de ensaio de tração, evitando que esforços diferentes de tensão influenciassem a análise. Foram variados os parâmetros de temperatura de mesa, temperatura de impressão, velocidade de impressão e altura de camada, cada um formando um grupo de amostra. Um grupo adicional com a variação da velocidade e temperatura foi criado para verificar interação entre ambos os parâmetros. A composição dos grupos finais se encontram na Tabela 04.

Tabela 04 - Parâmetros de processamento usadas por FDM

Designação	Temperatura de extrusão (°C)	Velocidade de deposição (mm/s)	Espessura da camada (mm)	Temperatura da mesa (°C)
Ref	200	20	0,3	20
T220	220	20	0,3	20
T220V25	220	25	0,3	20
V25	200	25	0,3	20
Layer	200	20	0,2	20
Bed	200	20	0,3	60
Preenchimento	Tipo	Linear	Orientação	90°
	Quantidade	100%		

Idealmente, um número maior de combinações de fatores deve ser estudado. Porém, isto não seria possível dentro das limitações deste trabalho, sendo escolhida a interação entre velocidade e temperatura, tida pela referência como de maior influência nas propriedades morfológicas. Pelo mesmo motivo, as análises por microscopia eletrônica e análise diferencial por varredura foram feitas somente na segunda etapa. O fluxograma com a metodologia aplicada pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18– Fluxograma de trabalho



4.2.1 Preparação dos corpos de prova via moldagem por injeção

Devido ao fato do material ser adquirido no formato de filamento, este foi transformado em pellets para ser utilizado no processo de injeção. Foi utilizada uma mini injetora de bancada modelo MiniJet da empresa Haake. para a obtenção dos corpos de prova de tração e impacto injetados, segundo as normas ASTM 638 (tipo 5) e ASTM D256, respectivamente. Os parâmetros utilizados para o processamento se encontram na Tabela 05, abaixo. Os parâmetros escolhidos foram de maneira a para que com uma temperatura igual a de processamento por FDM (200°C), o material pudesse ser processado, utilizando-se as menores pressões possíveis. A temperatura de molde foi estabelecida como 60°C, permitindo o processamento, inviável com o molde a temperatura ambiente, e sendo igual a temperatura de mesa utilizada no processo de FDM.

Tabela 05: Parâmetros de processamento usadas na moldagem por injeção

Parâmetro	Valor
Temperatura de injeção	200 °C
Temperatura do molde	60 °C
Pressão de injeção	500 bar
Pressão de recalque	350 bar
Tempo de recalque	60 s

4.2.2 Preparação dos corpos de prova via impressão 3D

Para a fabricação dos corpos de prova por FDM, foi utilizada uma impressora 3D do tipo Prusa i3, como visualizado na Figura 19, com bocal de extrusão de 0,4mm de diâmetro. O equipamento foi desenvolvido para este trabalho. Os corpos de prova foram produzidos individualmente nos grupos, de acordo com o planejamento experimental, variando-se os parâmetros de estudo. Foi utilizado uma única camada de parede para manter a precisão dimensional, afetando minimamente o preenchimento do corpo de prova. Durante a fabricação dos corpos de prova, o ambiente foi climatizado a 20 °C, sem fluxo de ar direcionado ao equipamento.

Os corpos de prova foram inicialmente modelados em CAD, programados para os tamanhos e geometrias definidas pelas normas. Estes modelos foram então

levados ao *software Slic3r* para a entrada dos parâmetros de processamento, e definição do código, que foi então utilizado no equipamento para a impressão.

Figura 19 – Equipamento de impressão 3D usado em este trabalho.



4.2.3 Caracterização

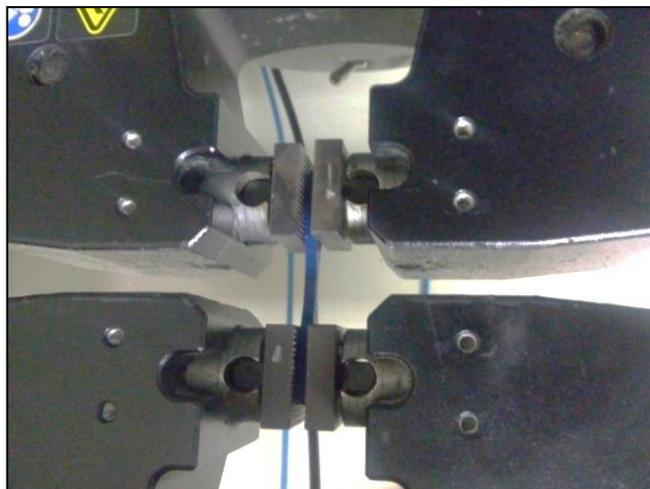
4.2.3.1 Tração

Os corpos de prova específicos para ensaio mecânicos de tração produzidos por injeção e FDM foram analisados de acordo com a norma ASTM D638, espécime tipo 5 (ASTM INTERNATIONAL, 2003). Nesta análise são medidas as tensões no escoamento e na ruptura (MPa), os alongamentos no escoamento e na ruptura (%) e o módulo elástico do material (GPa). Durante a análise é gerada uma curva de tensão deformação de onde o *software* utilizado, Bluehill 2, retira os valores de interesse, gerando uma tabela de dados.

A análise foi realizada mediante a utilização do equipamento INSTRON EMIC 23-5D, com célula de carga de 5 kN. Foram utilizadas garras com compressão de 1 bar para prender os corpos de prova, evitando o escorregamento durante ensaio, como visto na Figura 20. A velocidade escolhida foi de 2 mm/min, uma vez que

velocidades superiores levariam a fratura do corpo de prova de forma demasiadamente rápida. Foram testados 5 espécimes de cada grupo, de modo que a variação fosse menor que 10% em todos os parâmetros medidos.

Figura 20 – Detalhe das garras de tração



4.2.3.2 Impacto

Os corpos de prova de impacto fabricados por FDM e injeção, foram analisados quanto a sua resistência ao impacto de acordo com a norma ASTM D256 (ASTM INTERNATIONAL, 2010). O ensaio foi realizado no equipamento Impactor II da CEAST, utilizando um martelo de 2,75 J. Foram coletados os dados de energia absorvida e resistência, tanto em kJ/m^2 quanto J/m , disponibilizados diretamente pelo equipamento. Foram ensaiados 7 corpos de prova para cada grupo, de modo a obter menos de 10% de variabilidade entre os resultados.

4.2.3.3 Microscopia óptica

Para o estudo da meso estrutura do material, foi utilizado o microscópio ótico Zeiss, modelo Scope A1 com câmera AxioCam ICc5 acoplada. Amostras ensaiadas pelos testes de tração e impacto, fabricados por FDM, foram selecionadas para análise, realizada utilizando-se de lentes focais de 2,5x e acoplado diretamente a câmera.

A análise sobre microscopia óptica permite uma comparação entre as estruturas iniciais e após a fratura, possibilitando visualizar o modo de falha e aderência entre as camadas. Esta análise também possibilita visualizar a quantidade

de vazios encontrados no interior dos corpos de prova padrão, fator de alta influência nos resultados de resistência a tração e impacto.

4.2.3.4 Calorimetria Diferencial Exploratória, DSC

Para estas análises foi utilizado o equipamento DSC da TA Instruments, versão 4.4E. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min com uma rampa de aquecimento da temperatura ambiente (T=25°C) até 200 °C, utilizando nitrogênio como atmosfera de análise.

Esta análise permite obter as temperaturas de cristalização (T_c) e de fusão (T_m), entalpia de fusão (ΔH_f), entalpia de cristalização (ΔH_c) e grau de cristalinidade do polímero (X_c). O grau de cristalinidade é obtido através da Equação 01, abaixo.

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_f - \Delta H_c}{\Delta H_{f,100}} \right) \cdot 100 \quad (01)$$

Onde:

X_c é o grau de cristalinidade a frio em %.

ΔH_f é a entalpia de fusão da amostra.

ΔH_c é a entalpia de cristalização a frio da amostra

ΔH_{f,100} é a entalpia de cristalização do PLA totalmente cristalino.

A entalpia de fusão do PLA totalmente cristalino foi considerada como 93 J/g, segundo a literatura (BATTEGAZZORE *et al.*, 2011).

4.2.3.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A avaliação da interface entre as camadas criadas pela coalescência do material durante a deposição no processo de FDM dos corpos de prova foi realizada a partir de imagens obtidas por MEV. Foi utilizado o equipamento modelo Jeol JSM 6060, (tensão de aceleração de 10 keV) com detector BSE (*Back Scattering Electrons*). As regiões observadas se encontram na parte interna do corpo de prova, perpendicularmente às linhas de deposição. Foi utilizado aumento de 90x, permitindo melhores visualizações das interfaces entre as linhas de deposição.

4.2.3.6 Análise Dimensional

A análise dimensional foi efetuada por meio de um paquímetro, marca Mitutoyo, modelo CD8 série 500, com resolução de 0,01 mm. Todas as amostras foram medidas após sua moldagem, em relação a comprimento e largura, em pelo menos 3 pontos para cada dimensão.

4.2.3.7 Gravimetria

Os corpos de prova foram avaliados quanto a sua massa utilizando uma balança analítica da marca Marte, modelo AY220, com 0,0001 de resolução. Todas as amostras foram pesadas após sua fabricação, com o objetivo de obter uma amostragem completa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para um melhor entendimento serão apresentados os resultados em duas etapas, como separadas durante a metodologia do trabalho. Na primeira etapa são apresentados os resultados relativos ao tipo, quantidade e orientação do preenchimento do material moldado por FDM. Na segunda etapa são apresentados os resultados das variações de parâmetros operacionais do processo de FDM, temperatura de extrusão, velocidade de impressão, temperatura da mesa e espessura da camada, sendo comparados com o processo de injeção.

5.1 Etapa 1

Na primeira etapa foram variados os tipos, quantidade e orientação do preenchimento da peça moldada por FDM. As análises dimensionais, gravimétricas, morfológicas e mecânicas de impacto e tensão são apresentadas a seguir.

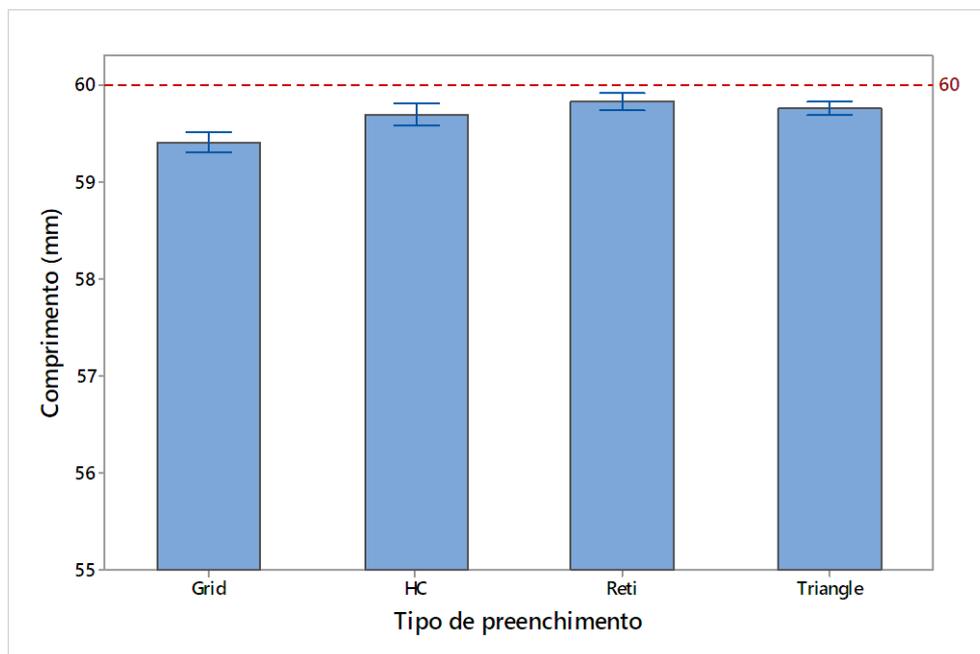
5.1.1 Propriedades Físicas

5.1.1.1 Análise Dimensional

As Figuras 21 a 26 apresentam os resultados das análises dimensionais relativas ao comprimento e largura referentes ao tipo, orientação e quantidade de preenchimento dos corpos de prova moldados por FDM.

Com relação ao grupo de corpos de prova moldados em função do tipo de preenchimento, observa-se na Figura 21 que todas as amostras apresentaram comprimento menor que os 60 mm do corpo de prova definido pelo modelo programado.

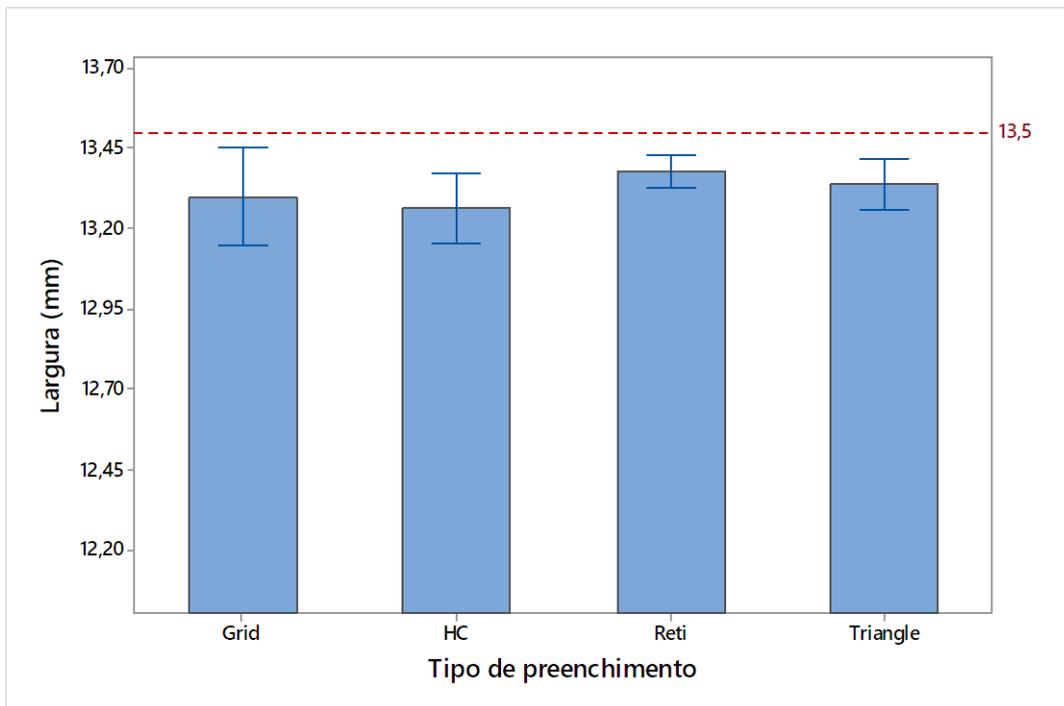
Figura 21 - Comprimento do corpo de prova por tipo de preenchimento



Os grupos HC, Reti e Triangle apresentaram médias na faixa de 59,75 mm \pm desvio padrão, não tendo diferença estatística entre si. Porém, o padrão Grid apresentou menor comprimento médio, 59,4 mm, e sendo estatisticamente menor que os demais corpos de prova. A diferença em relação ao padrão está acima de 0,4 mm, sendo maior que uma espessura de linha de deposição. Estas diferenças podem ser explicadas pela contração térmica do PLA, na ordem de 60 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ (JIANG *et al.*, 2013). Entretanto, isto parece afetar os padrões em diferentes níveis, sendo o padrão Grid mais afetado, possivelmente pelo maior afastamento entre as linhas de deposição, permitindo maior contração durante os resfriamentos (ISLAM *et al.*, 2014).

Em relação a largura dos corpos de prova moldados, os diferentes tipos de preenchimento também se apresentaram em médias menores que o modelo programado, como mostra a Figura 22. O grupo Reti apresentou menor desvio que os demais, possivelmente pela sua estrutura entrelaçada, permitindo menor variação durante a contração. Os demais grupos apresentaram desvios padrão maiores. Logo, apesar da média maior, apresentada também pelo grupo Reti, estatisticamente não há diferença entre as médias dos grupos, devido aos desvios.

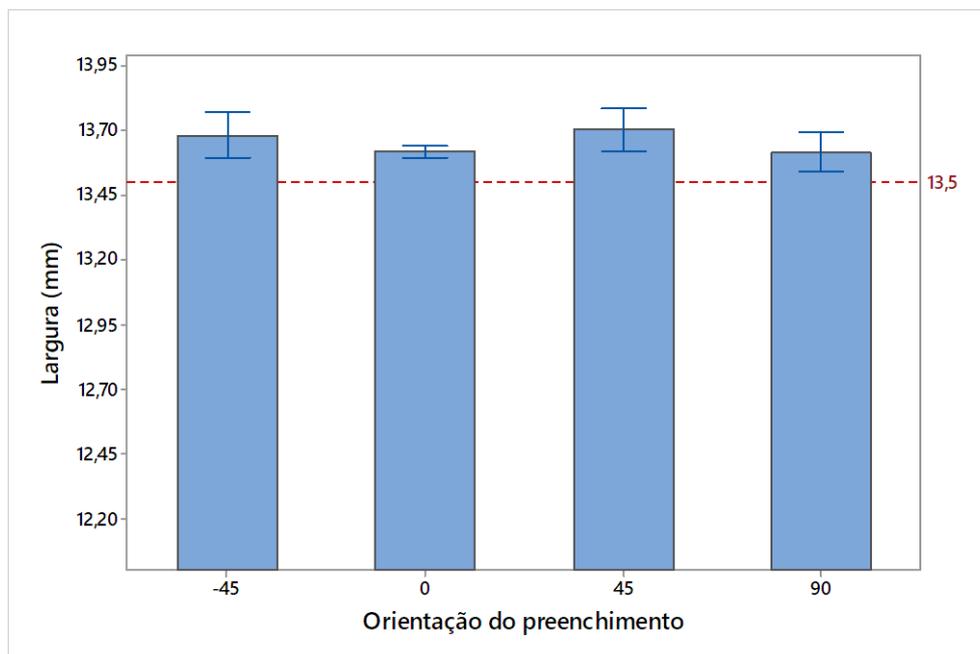
Figura 22 - Largura do corpo de prova por tipo de preenchimento



Com relação à influência da orientação do preenchimento na largura dos corpos de prova moldados, na Figura 23 é observado efeito contrário ao tipo de preenchimento. Todos os grupos apresentaram larguras maiores do que o modelo. Os corpos de prova dos grupos de orientação foram criados com 100 % de preenchimento. Galantucci *et al.*, 2015 discutem que isto se deve a uma combinação de sobre extrusão com erro incremental. A utilização de um preenchimento completo, faz com que, não somente as linhas sejam depositadas o mais próximo possível, mas com que o *software* também compense os vazios entre as mesmas. Esta compensação, junto com pontos de sobre extrusão, podem levar a um aumento incremental, a cada linha de deposição. De fato, a menor média referente a largura dos corpos de prova de orientação é visto para a orientação de 0°, onde não ocorre esta compensação no sentido da largura, mas do comprimento.

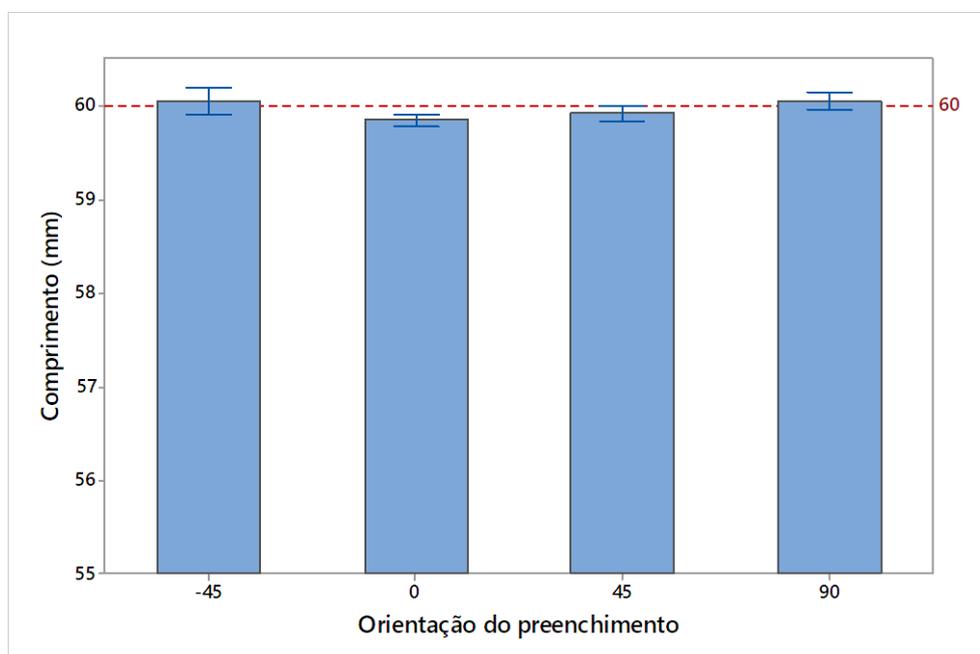
Já considerando os desvios padrões, as médias se tornam estatisticamente iguais. Os grupos com orientação de preenchimento em -45°, 45° e 90° possuem desvios muito superiores ao do grupo com orientação de 0°, reforçando a hipótese de erro incremental. Também pode ser notado que os padrões com orientações de -45° e 45° apresentam, médias e desvios quase idênticos, como esperados por serem espelhados um ao outro.

Figura 23 - Largura do corpo de prova por orientação do preenchimento



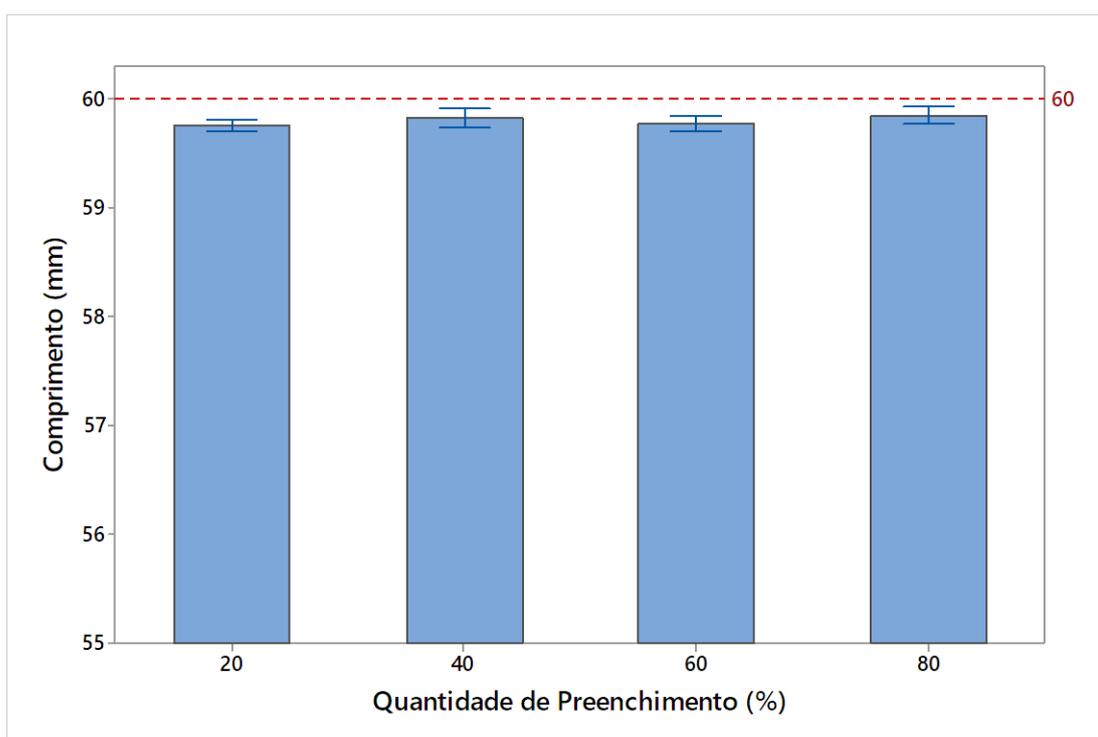
Na Figura 24 é observado que as médias dos comprimentos se encontram mais próximas a referência de 60 mm, com diferenças entre as orientações de 90° e -45°, com média maior, e a orientação 0°, com média menor. O menor comprimento do grupo com orientação de 0° pode ser explicado pela contração térmica, não considerada pelo *slicer*. Os grupos de demais orientações possuem médias dentro da referência, dados os desvios.

Figura 24 - Comprimento do corpo de prova por orientação do preenchimento



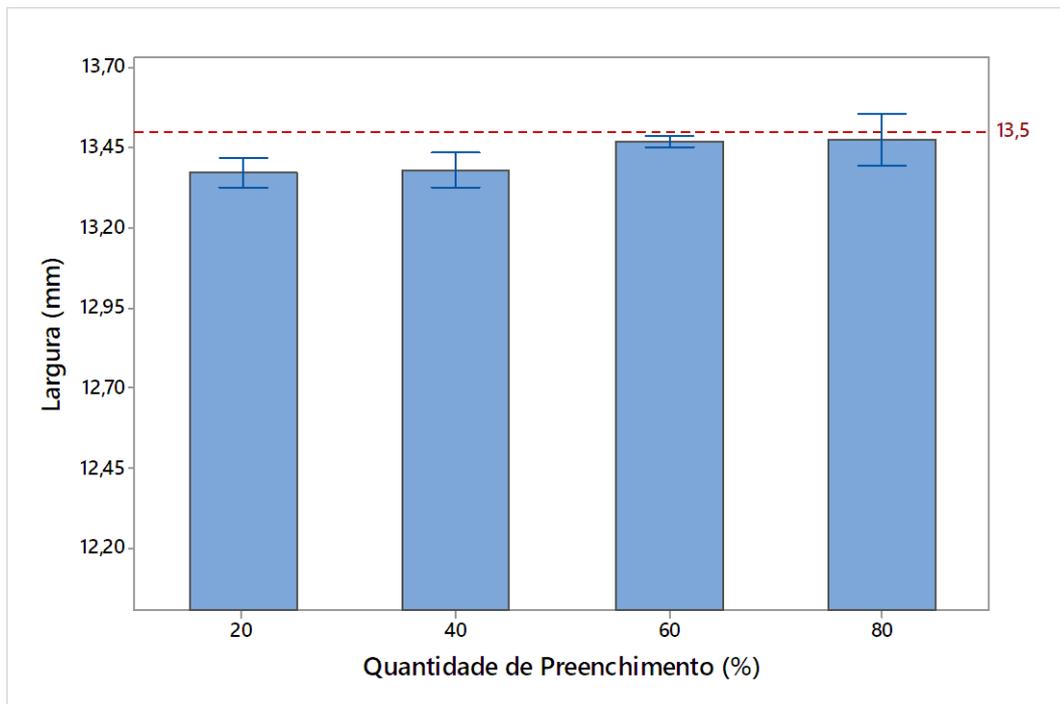
Em relação à quantidade de preenchimento, os corpos de prova não apresentaram um comportamento definido quando comparado seu comprimento, Figura 25, tendo os padrões 20 e 60% comprimentos levemente abaixo da média dos padrões a 40 e 80%. Apesar desta diferença nas médias, o desvio padrão não permite concluir que seja realmente significativa. No entanto, em todos os casos os corpos de prova possuem comprimentos inferiores aos do modelo, assim como para os grupos de diferentes tipos de preenchimento, o que pode ser novamente relacionado a contração térmica dos corpos de prova.

Figura 25 - Comprimento do corpo de prova por quantidade de preenchimento



Quanto a largura, os padrões com 20 e 40% de preenchimento apresentaram dimensão inferior ao modelo, entre 13,35 e 13,40 mm, Figura 26. Já os padrões a 60 e 80% de preenchimento apresentam médias levemente inferiores ao modelo, mas dentro do mesmo devido aos seus desvios padrões. Isto é esperado, uma vez que o padrão Reti foi utilizado para os grupos com variação da quantidade de preenchimento, seguindo a tendência vista para os padrões. Este comportamento pode ser atribuído, como anteriormente, à contração térmica (ISLAM *et al.*, 2014).

Figura 26 - Largura do corpo de prova por quantidade de preenchimento



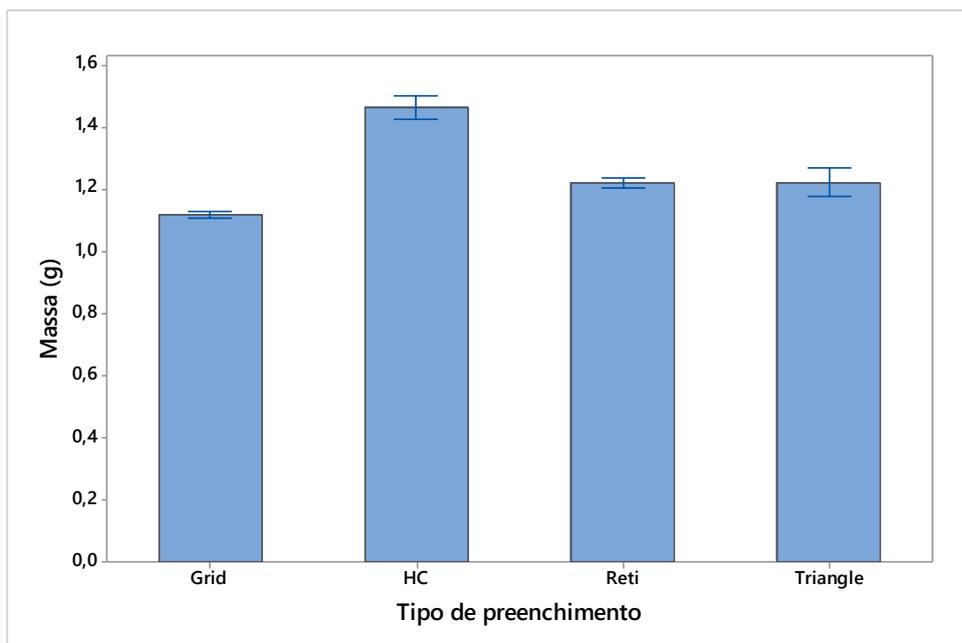
Embora pequenas, essas diferenças, se não levadas em consideração pelo projetista, são suficientes para levar a peça a ter dificuldades de montagem. Em alguns casos, poderia ser necessário utilizar usinagem e acabamento posterior, processos teoricamente desnecessários para peças criadas por impressão 3D, eliminando um dos pontos de vantagem do processo.

5.1.1.2 Gravimetria

As relações de massa dos corpos de prova moldados dos grupos de preenchimento são apresentadas nas Figuras 27, 28 e 29 para os tipos, orientação e quantidade do mesmo.

Quanto aos grupos de diferentes padrões de preenchimento, estes apresentam, apesar da baixa variação dentro dos grupos, diferença significativa entre eles. O grupo HC apresenta corpos de prova com massa média de $1,46 \text{ g} \pm \text{desvio}$, enquanto o grupo Grid apresenta corpos de prova com média $1,11 \text{ g} \pm \text{desvio}$, uma diferença de 31% dentro da mesma quantidade de preenchimento.

Figura 27 - Massa do corpo de prova por tipo de preenchimento



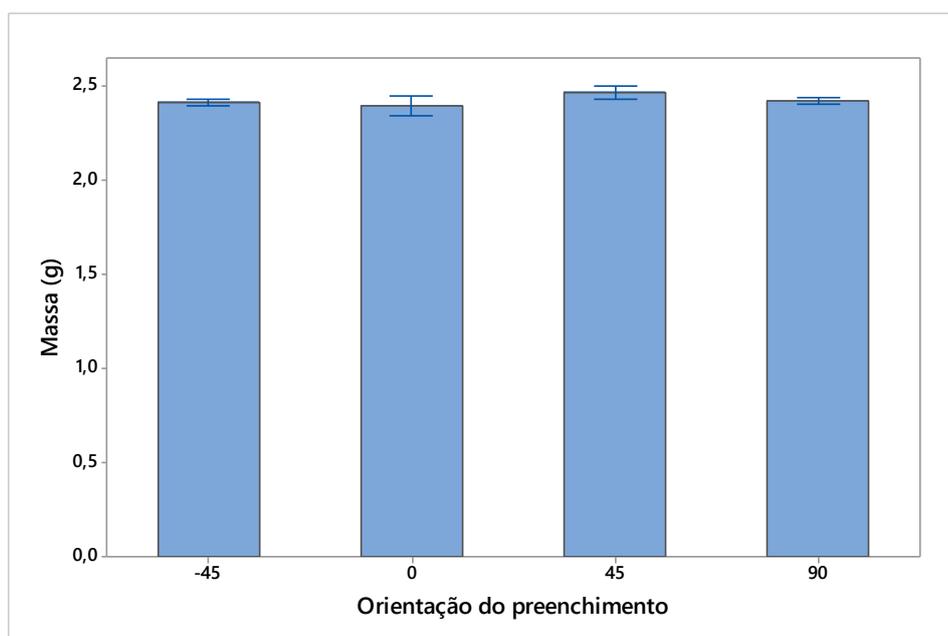
Na Tabela 06 são mostradas algumas características do processo FDM como tempo e quantidade de filamento usado, massas, resistência ao impacto e a eficiência do desempenho mecânico em relação à massa e ao tempo para cada tipo de preenchimento. Observa-se que os padrões Reti e Grid possuem maior relação resistência por tempo ou massa quando comparados aos demais. Como também visualizado, os padrões possuem diferenças entre os tempos de impressão e a quantidade de filamento utilizado, ambos proporcionais à massa média dos corpos de prova. Isto leva a hipótese que a origem da diferença se encontra no modo com o qual o caminho das linhas de deposição é calculado pelo *software* Slic3r.

Tabela 06 – Influência da quantidade de Filamento e tempo de impressão FDM utilizado na eficiência do desempenho mecânico em relação à massa e tempo

Tipo de preenchimento	Comprimento do Filamento utilizado (mm)	Tempo de impressão FDM (min:seg)	Massa (g)	Resistência ao Impacto (kJ/m ²)	Resistência/massa	Resistência/tempo
Grid	450	10:26	1,12	3,38	3,02	0,32
HC	554	12:46	1,46	3,57	2,44	0,28
Reti	476	10:49	1,22	3,83	3,13	0,35
Triangle	464	11:08	1,32	1,56	1,18	0,14

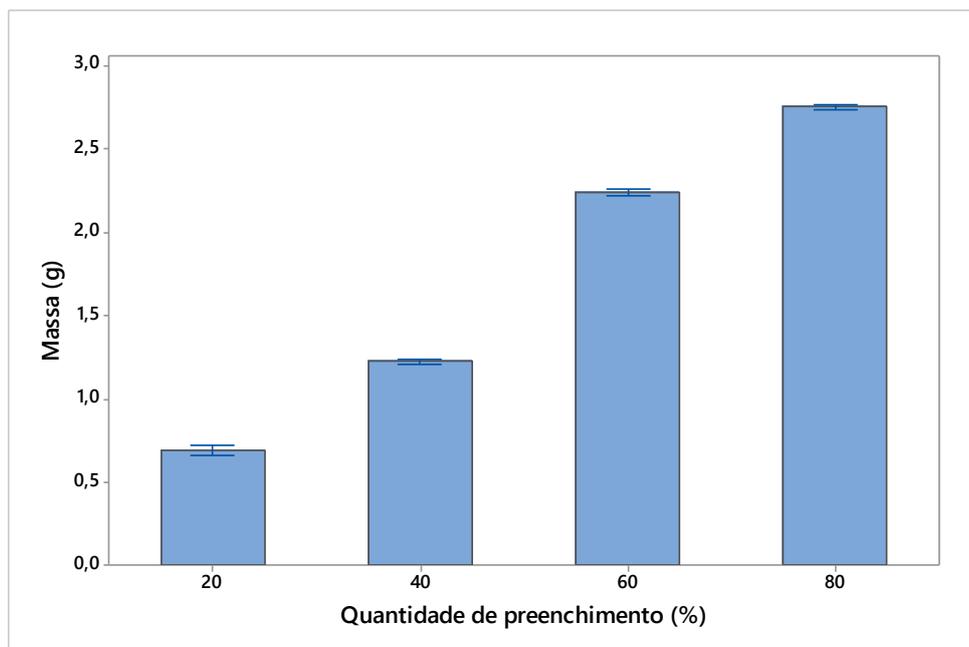
Dentre os grupos de orientação do preenchimento, também podem ser visualizadas, na Figura 28, variações entre as diferentes orientações. A orientação vertical apresenta menores valores de massa tanto estimada (filamento requerido pelo código), quanto experimentalmente, do que as demais orientações. Isto sugere a existência de vazios dentro dos corpos de prova. Pode ser notada uma diferença entre as médias das massas medidas para as orientações de 0 e 90°. Esta pode ser relacionada a uma diferença entre o teor de vazios para diferentes orientações, sendo maior ao longo da linha de deposição do que transversal à mesma. Isto, pois o espaçamento é calculado pelo *software* a partir da espessura da linha de deposição e altura da camada, de forma a ajustar o menor vazio entre as camadas.

Figura 28 - Massa do corpo de prova por orientação do preenchimento



Referente a quantidade de preenchimento, na Figura 29 pode ser visualizado que a massa dos corpos de prova apresenta baixa dispersão e aumenta linearmente com o aumento do preenchimento. Considerando a linearidade, a massa tende a uma massa mínima, o que é esperado, visto que a quantidade de preenchimento não leva em consideração a camada externa do corpo de prova, definida como constante nos corpos de prova. Esta influência também se observa em relação à resistência ao impacto.

Figura 29 - Massa do corpo de prova por quantidade de preenchimento



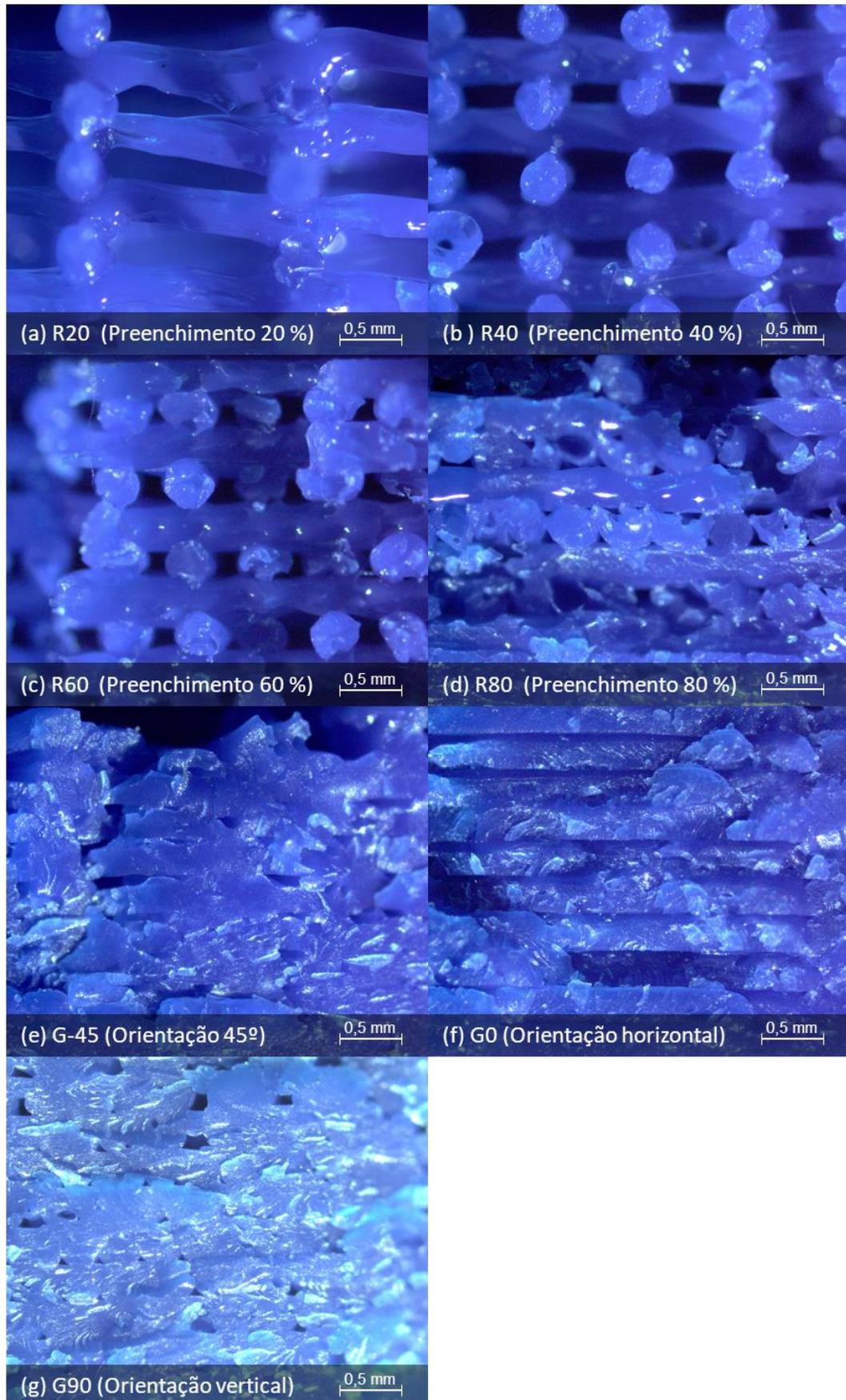
5.1.2 Morfologia

5.1.2.1 Microscopia Óptica

A Figura 30 apresenta as imagens obtidas por microscopia óptica para os diferentes graus e orientações de preenchimento dos corpos de prova, após os ensaios de impacto. Entre os grupos com variação da quantidade de preenchimento, podem ser claramente visualizados os efeitos dos vazios entre as linhas de deposição. Para a amostra com preenchimento de 20% as linhas de deposição se encontram deformadas entre as linhas perpendiculares que servem de apoio, fenômeno denominado *bridging*, onde a linha superior forma uma ponte entre as linhas inferiores. Uma vez que a distância se torna considerável, para estes parâmetros, a deposição do material se torna irregular. Isto já quase não pode ser notado com a quantidade de preenchimento de 40% e superiores.

Os vazios, apesar de diminuírem com o aumento da quantidade de preenchimento, ainda são notáveis para o grau de 80%. Neste, as linhas de deposição paralelas já se encostam, promovendo leves ligações entre as mesmas. Supõe-se que a partir deste grau de preenchimento o material passe a se comportar com características mais próximas ao corpo sólido.

Figura 30 - Micrografia óptica dos corpos de prova por diferentes preenchimentos



A diferença de orientação do preenchimento causa efeitos visíveis na fratura do material. Uma vez que as interfaces entre as linhas de deposição são os elementos mais frágeis, estes são pontos de propagação da fratura. Aos 45 graus a superfície de fratura se apresenta relativamente lisa, mas em diferentes elevações, evidenciando a propagação da trinca preferencialmente pelas interfaces.

O mesmo ocorre para o preenchimento horizontal onde, no caso extremo, as linhas de deposição são descoladas completamente pela fratura, praticamente não havendo falha da linha em si. Isto se reflete nos resultados de impacto, pela baixa absorção de energia, uma vez que esta é absorvida pelos pontos mais fracos da peça, as interfaces (RANKOUHI et al., 2016).

O corpo de prova com preenchimento vertical apresenta delaminações assim como as demais orientações. No entanto, acontece de forma menos agressiva, sendo a falha propagada pela quebra das linhas de forma perpendicular à deposição.

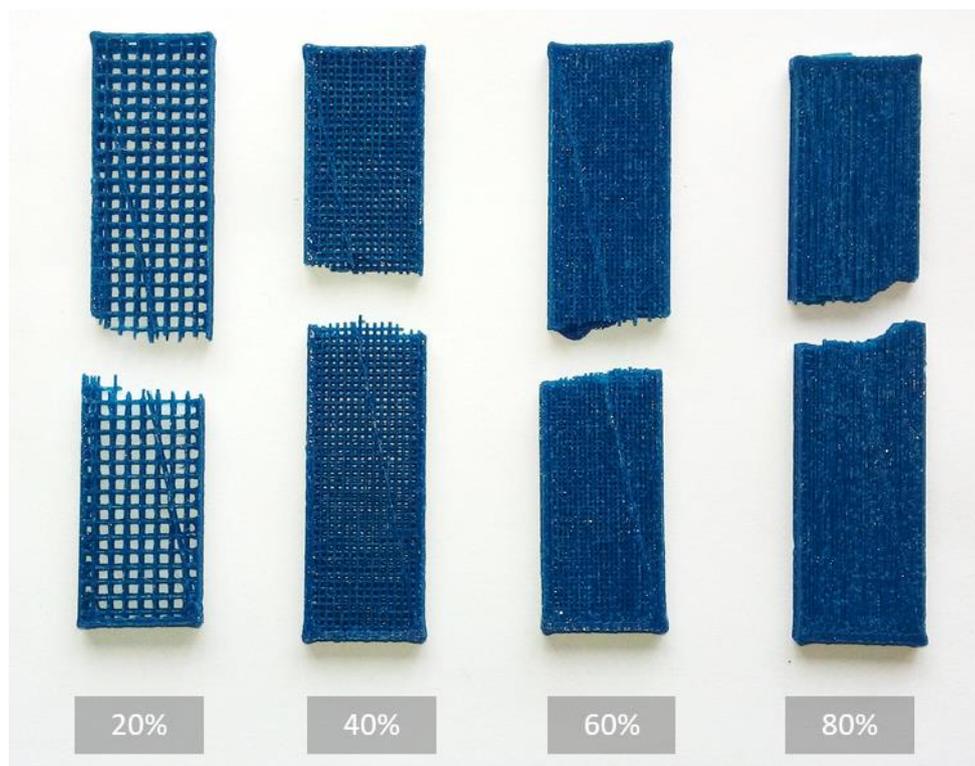
5.1.3 Propriedades Mecânicas

5.1.3.1 Impacto

As Figuras 31 a 36 apresentam as amostras fraturadas nos testes de impacto e as resistências ao impacto para a quantidade, tipo e orientação do preenchimento.

Os corpos de prova de impacto, Figura 31, possuem um gradual decréscimo no teor de vazio com o aumento do grau de preenchimento. Mesmo com as diferenças significativas entre as quantidades de preenchimento entre os grupos, as fraturas ocorrem com aspecto similar, sendo definidas pelo rompimento das linhas de deposição, e não pela delaminação das camadas.

Figura 31 - Corpos de prova após ensaio de impacto com diferentes quantidades de preenchimento.

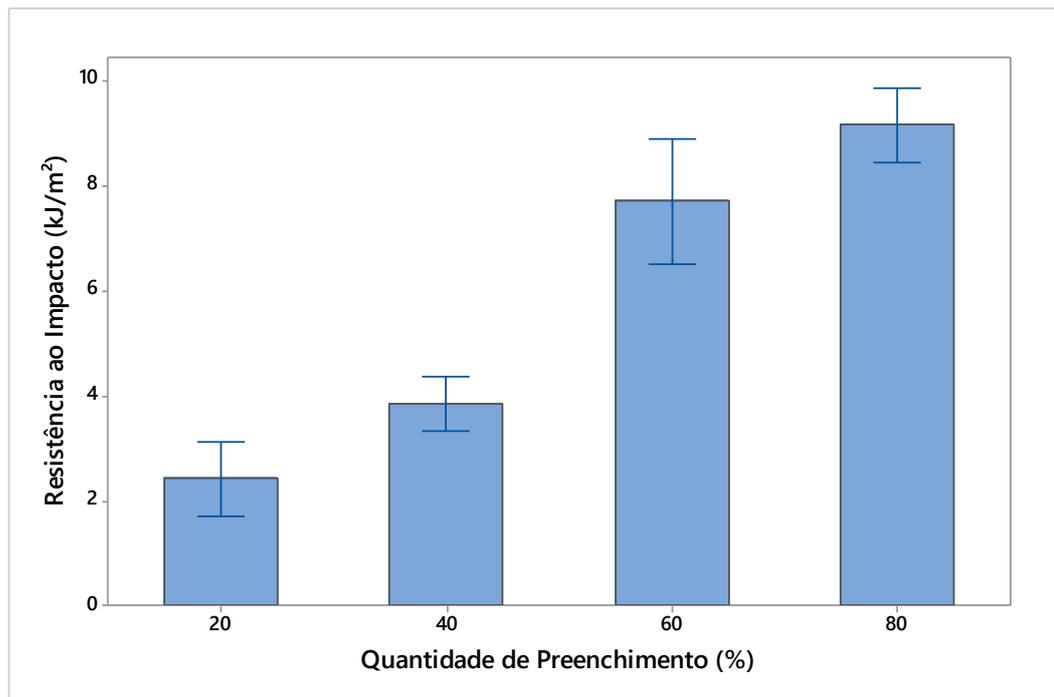


Observa-se um aumento na resistência ao impacto com o aumento do grau de preenchimento dos corpos de prova, Figura 32, no entanto, este aumento não ocorre de forma proporcional, sendo mais acentuada em graus intermediários. Uma das suposições da literatura é de que este comportamento se deve à influência da camada externa, que age como reforço constante (GRIFFITHS *et al.*, 2016). Entretanto, autores como Tsouknidas *et al.* (2016), argumentam que isto se deve à natureza do corpo de prova, relacionando-a a materiais compósitos, mostrando, inclusive, uma curva semelhante às curvas de impacto por quantidade de fibra. Neste caso, ao invés da proporção entre fibras e matriz, acontece a proporção entre preenchimento e vazios associados, proporcionando efeito semelhante.

É possível que ambas as hipóteses influenciem os resultados. A camada externa constante pode servir como base, sendo um limite inferior da resistência ao impacto. Já a quantidade de preenchimento aumenta de forma acentuada até certo ponto, onde possivelmente as linhas de deposição se aproximam ao ponto de haver ligação direta entre elas. A partir deste ponto, o preenchimento forma uma estrutura fechada e seu aumento diminui o teor de vazios. Isto pode ser visualizado na micrografia da

mesoestrutura na Figura 30, onde as linhas de deposição se encontram separadas para as quantidades de preenchimento de 20 a 60 %. A partir de 60 % a resistência ao impacto já é mais semelhante à quantidade de 80 %, onde as linhas de deposição começam a se encostar.

Figura 32 - Resistência ao Impacto por quantidade de preenchimento



Em relação aos tipos de preenchimento, Figuras 33 e 34, os resultados dos ensaios de impacto mostram dois pontos importantes. Primeiramente, com exceção do padrão Triangle, nota-se um comportamento constante na média da resistência ao impacto dos padrões. Outro ponto observável se refere ao desvio padrão dos tipos de preenchimento. O padrão HC apresentou maiores dispersões nos resultados quando comparados com os padrões Reti, Grid e Triangle. Uma análise dos corpos de prova após os testes, como visualizados na Figura 33 permite identificar diferentes caminhos na propagação da fratura, o que pode indicar a existência de mais de uma espécie de propagação da trinca ou falha. Estes diferentes modos de falha podem ser relacionados a diferentes resistências, levando ao maior desvio padrão do grupo HC.

Figura 33 - Corpos de prova após ensaio de impacto com diferentes tipos de preenchimento

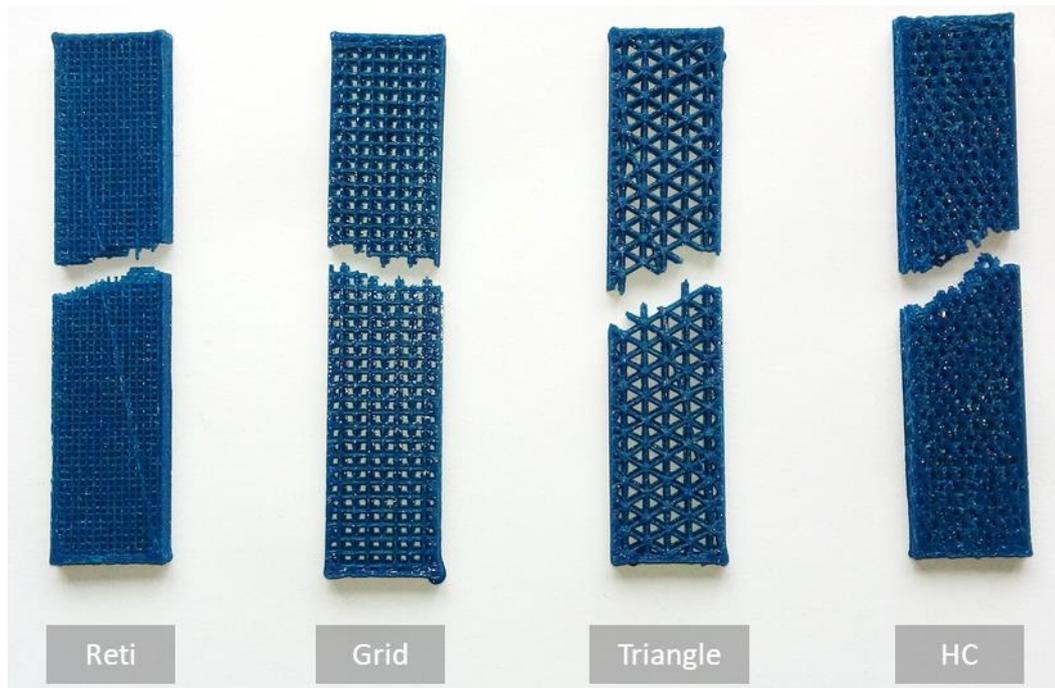
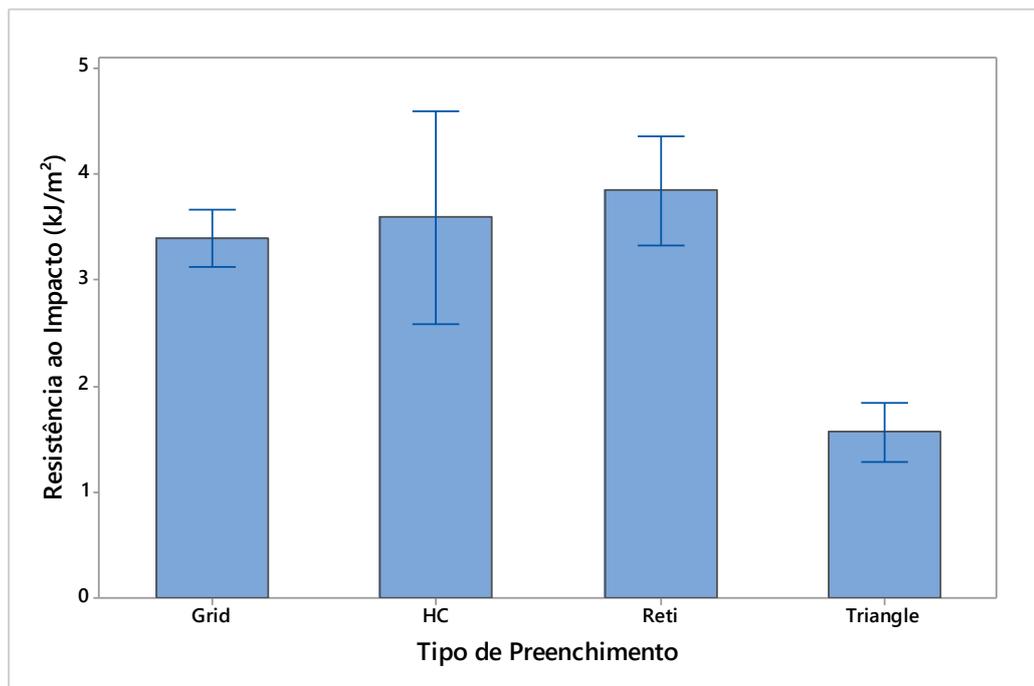


Figura 34 - Resistência ao Impacto por tipo de preenchimento.



Dentre os padrões selecionados, os estilos Grid e Reti se tornam os mais atraentes para uso, tendo menor dispersão e média parecidas às do HC, diferente do Triangle, que apresentou média inferior aos demais. De fato, estes dois padrões são parecidos do ponto de vista geométrico, ambos, formando uma grade por linhas

perpendiculares, sendo a diferença na camada em que é aplicada a linha perpendicular. Uma análise estatística não encontra diferença significativa entre estes grupos dentro de 95% de confiança para este número de amostras. Estes padrões são os que apresentam características mais similares a materiais laminados (ZOU *et al.*, 2016), tendo seu comportamento estudado em diversos casos de maneira análoga à lâminas [0/90]. Este comportamento análogo pode ser utilizado de forma vantajosa, abrindo a possibilidade de utilizar técnicas e teorias já bem estabelecidas ao material criado por FDM.

De maneira similar aos resultados dos ensaios de impacto dos tipos de preenchimento, duas características podem ser observadas quanto a orientação do mesmo na Figura 35. Primeiramente, a média dos resultados sofre grande influência do ângulo utilizado no preenchimento, tendo valores maiores para preenchimentos em -45° e 90° e menores em 45° e 0° , resultados encontrados também na literatura (DAWOUD *et al.*, 2016). Em segundo, é notada a diferença no desvio padrão. Neste caso uma análise dos modos de fratura, mostrados na Figura 36, permite observar dois modos de falha: um entre a adesão das linhas de deposição e outro sobre a fratura das linhas. A maior dispersão nos resultados acontece quando, em teoria, não há modo de falha predominante, abrindo a possibilidade de falha por diferentes caminhos, levando a diferenças significativas na absorção de impacto.

Figura 35 - Resistência ao Impacto por orientação do preenchimento

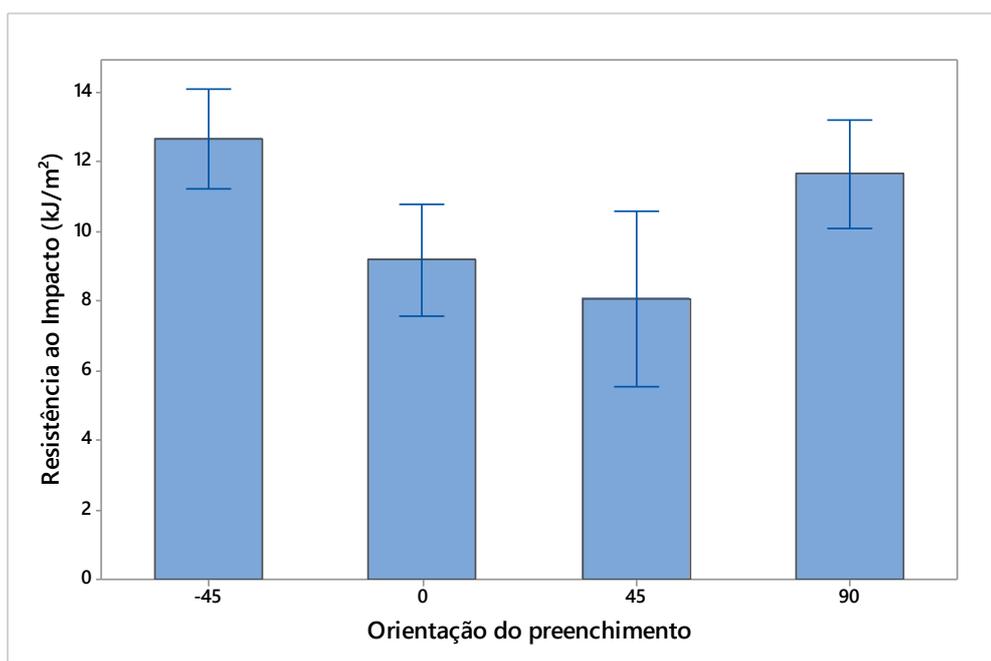
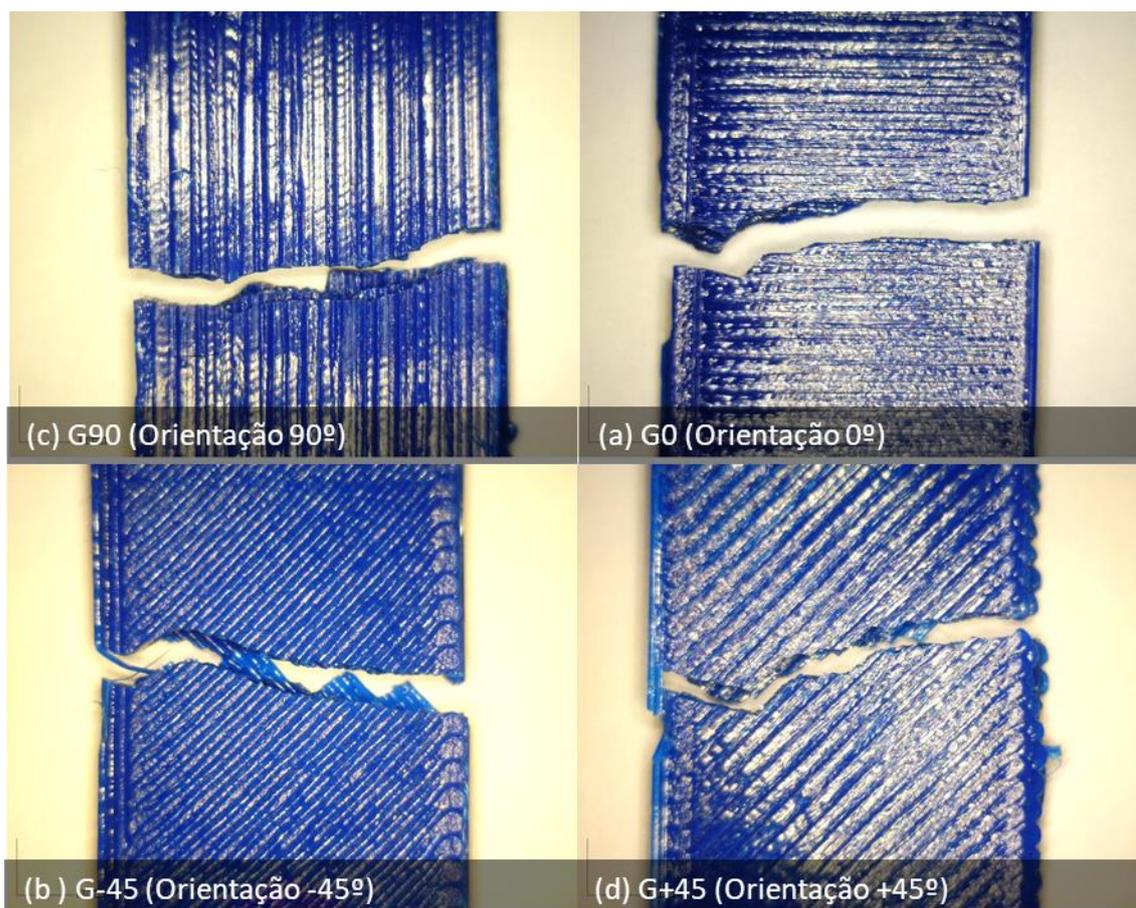


Figura 36 – Imagens de corpos de prova após ensaio de impacto com diferentes orientações de preenchimento



Segundo o modelo de materiais laminados sobre tração, a literatura (AHN et al., 2002); (DOMINGO-ESPIN et al., 2015), relaciona este comportamento a maior fragilidade que ocorre entre as linhas de deposição, tornando o material análogo a laminados unidirecionais, onde as linhas de deposição atuam como fibras na matriz. Estes modelos são estudados em diversos trabalhos, tanto para PLA quanto ABS, (CASAVOLA *et al.*, 2016), inclusive, utilizando-se de modelos computacionais (CROCCOLO *et al.*, 2013). Segundo estes, os corpos de prova rompem com maior facilidade quando as tensões atuantes se encontram na interface entre as linhas de deposição, do que quando atuam na direção da própria linha de deposição.

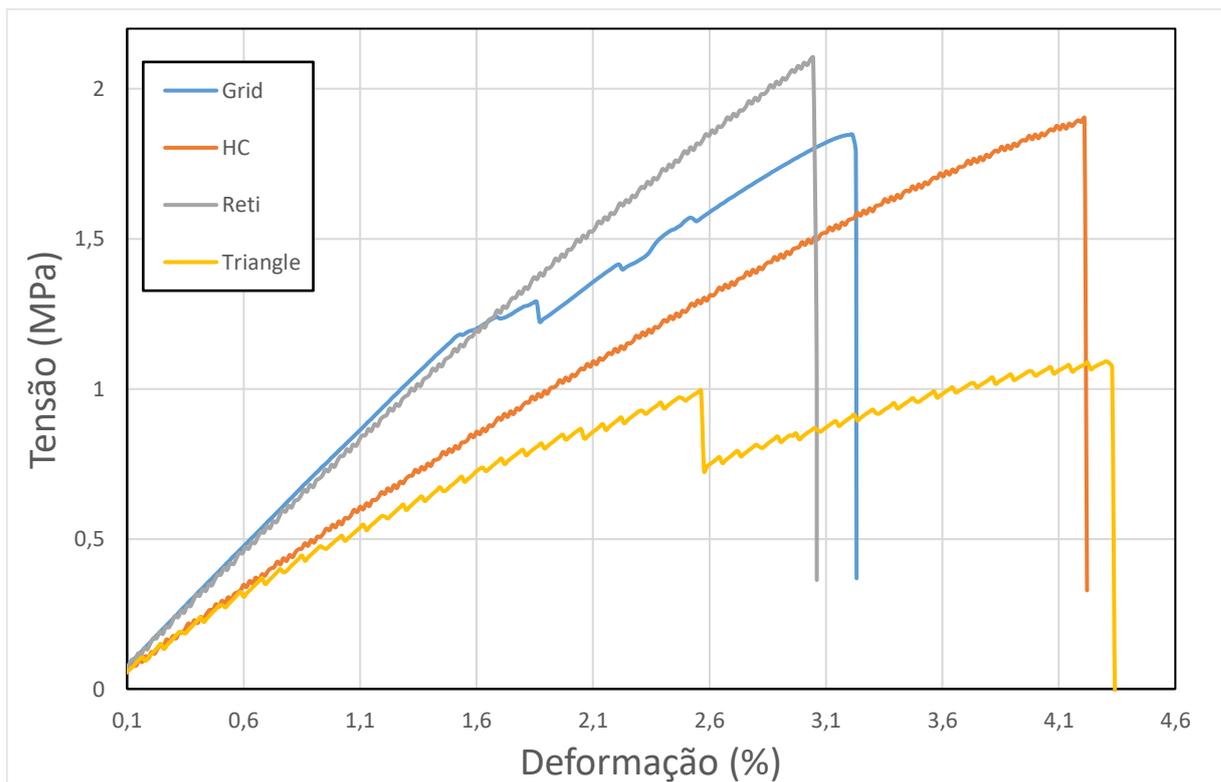
Os resultados se encontram em acordo com estes modelos. Durante o teste de impacto, os corpos de prova com orientações transversas aos esforços, -45 e 90° absorvem maior energia que os corpos de impacto com deposição em orientações mais paralelas à sollicitação, 45 e 0°. Uma observação das médias, ainda que com

poucos pontos, permite visualizar um padrão senoidal em função dos ângulos de deposição, análogo ao que ocorre em materiais laminados sobre tração (LI et al., 2002; CARNEIRO et al., 2015).

5.1.3.2 Tração

A Figura 37 apresenta os resultados das curvas de tensão-deformação obtidas pelo ensaio de tração com relação ao tipo de preenchimento das amostras moldadas por FDM.

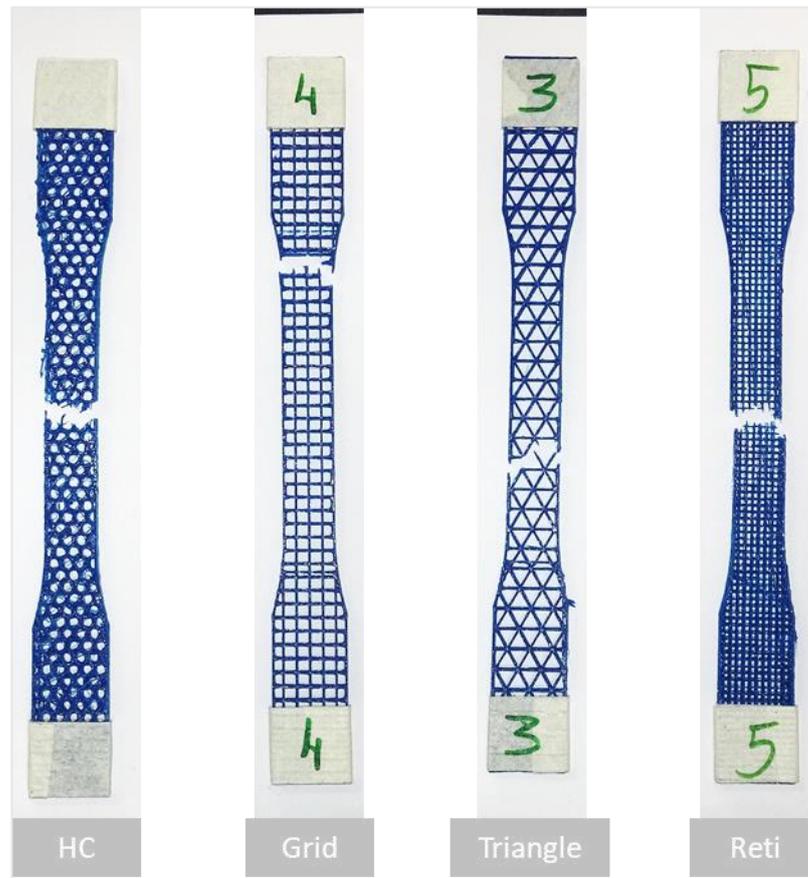
Figura 37 - Curva tensão x deformação para as amostras de diferentes tipos de preenchimentos



Observa-se que as quatro curvas médias se encontram com ruído, efeito possivelmente causado pelo escorregamento das amostras sobre as garras. Para evitar que isto aconteça maior pressão deveria ter sido utilizada, no entanto, para estes corpos de prova, acabariam danificando-os. Também é visível um decréscimo na resistência à tensão para a amostra de preenchimento Triangle. Estes decréscimos foram visíveis em todos os ensaios, sendo ocasionadas pela ruptura parcial da estrutura. Os corpos de prova ensaiados podem ser visualizados na Figura 38. O padrão Grid sofreu, em diversos corpos de prova, fratura no início do pescoço,

indicando um ponto de fragilidade. Os demais tipos sofreram fraturas no meio do pescoço do corpo de prova, sem apresentar falhas específicas.

Figura 38 - Corpos de prova após ensaio de tração com diferentes tipos de preenchimento



Os tipos de preenchimento afetam profundamente, não somente a tensão de escoamento, mas também o módulo elástico. Na Tabela 07 é apresentado um resumo das propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração. Os padrões tipos Grid e Reti apresentam módulos de elasticidade maiores, 78 MPa e 73 MPa respectivamente, enquanto os padrões HC e Triangle apresentam módulos de elasticidade aproximadamente 30% menores, em torno de 53 MPa e 49 MPa. Estes resultados estão de acordo com resultados de KHAN *et al.* (2017). Uma vez que nos tipos Grid e Reti, as linhas de deposição são alinhadas com a força aplicada durante o ensaio, e estas apresentam maior resistência a deformação, pois a absorvem diretamente, de forma puramente trativa. Já os tipos HC e Triangle apresentam

geometrias com estruturas em ângulos em relação à força aplicada durante o ensaio, fazendo com que haja um comportamento interno de flexão, com maior liberdade de deformação, o que também influencia na deformação de escoamento. (BODAGHI *et al.*, 2017).

Tabela 07 – Módulo, tensão de escoamento e deformação de escoamento das amostras de diferentes tipos de preenchimento

Tipo de preenchimento	Módulo Elástico (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Def. de escoamento (mm)	Def. de escoamento (%)
Grid	78,8 (0,41)	1,75 (0,18)	0,7 (0,83)	2,69
HC	53,1 (1,27)	1,81 (0,08)	1,05 (0,16)	4,19
Reti	73,4 (1,17)	2,38 (0,12)	0,95 (0,16)	3,91
Triangle	49,6 (2,38)	1,10 (0,13)	0,7 (0,28)	2,73

Os grupos Grid e HC apresentam resistências ao escoamento com média em torno de 1,8 MPa, enquanto o grupo Reti possui resistência maior, de 2,4 MPa e o grupo Triangle, resistência menor, de 1,1 MPa. A menor resistência do grupo Triangle pode ser explicada pela sua geometria, na forma de uma estrutura treliçada, havendo pontos de concentração de tensões durante a solitação. Além dos pontos de concentração a estrutura treliçada acaba por criar esforços internos adicionais, limitando a carga máxima que pode ser aplicada sobre o corpo de prova, e reduzindo efetivamente a sua tensão de escoamento. O mesmo efeito ocorre para o padrão HC, no entanto, este possui ângulos menores, e linhas mais grossas, tendo de fato mais material, como discutido na seção 5.1.1.2. Estes fatores levam o tipo HC, apesar de ter um módulo elástico menor, e apresentar uma deformação consideravelmente alta, e conseqüentemente, uma tensão de ruptura na faixa dos padrões Grid e Reti. O efeito da estrutura interna do padrão HC é semelhante ao efeito ocasionado pela estrutura do padrão Triangle, porém, de forma menos acentuada, quando comparado aos padrões Grid e Reti. Os padrões Grid e Reti apresentam linhas orientadas diretamente na direção do carregamento. Isto faz com que os esforços sejam puramente trativas, sem esforços adicionais, o que se reflete na maior tensão de escoamento destes grupos.

Quanto à deformação, os grupos Grid e Triangle apresentam fraturas em torno de 0,7 mm de deformação, enquanto os grupos HC e Reti, resultados superiores, de aproximadamente 1mm. O padrão Triangle apresenta, como já citado, estrutura treliçada, sendo mais suscetível às tensões do que os demais. Esta suscetibilidade deveria ser eliminada para o padrão Grid, porém, uma análise dos corpos de prova após o ensaio revela que todos fraturaram próximo do pescoço do corpo de prova. Neste ponto há maior concentração de tensões. Estas deveriam ser conduzidas para o pescoço do corpo de prova de forma suave, entretanto, o espaçamento do tipo Grid, ao contrário do tipo Reti é demasiadamente grande, possivelmente causando saltos nas tensões e pontos de concentração de tensões, levando a falhas.

Estes comportamentos evidenciam que as particularidades do preenchimento afetam as propriedades mecânicas, não havendo um parâmetro preferencial no sentido de que, uma vez que para cada aplicação há uma diferente solicitação, estes devem ser escolhidos de acordo. Em compensação, outros padrões possibilitam a criação de meta materiais, como apresenta a literatura (BODAGHI *et al.*, 2017), possibilitando estruturas com propriedades diferentes, como áreas com coeficientes de *Poisson* distintos, onde parte do material se deforma de maneiras diferentes quando submetidas aos mesmos esforços.

5.2 ETAPA 2

Na segunda etapa são apresentados os resultados sobre a influência da variação dos parâmetros morfológicos de impressão por FDM: velocidade de impressão, temperatura da matriz, temperatura da mesa e espessura da camada. Os corpos de prova moldados foram caracterizados por análise dimensional, gravimetria, propriedades térmicas, morfologia, e propriedades mecânicas. Os resultados e a discussão são apresentados a seguir.

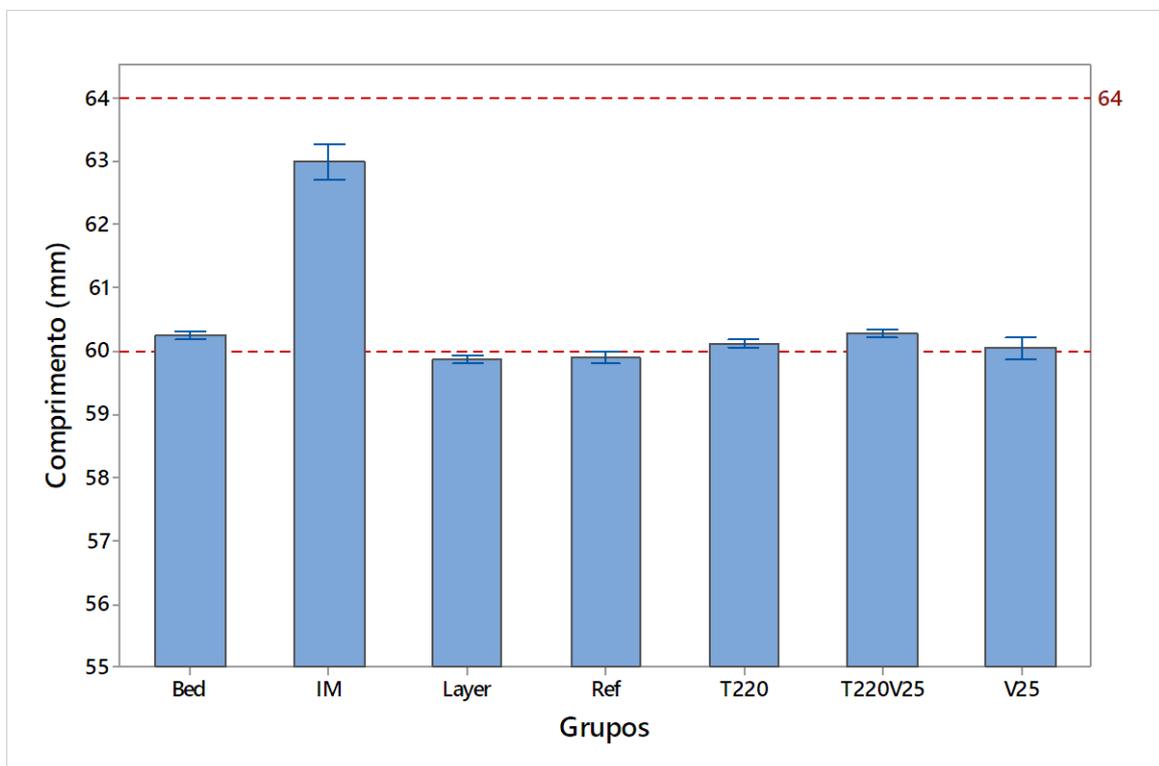
5.2.1 Propriedades Físicas

5.2.2.1 Análise Dimensional

As relações dos comprimentos e larguras dos corpos de prova de grupos de processamento são mostradas nas Figuras 39 e 40, respectivamente.

Observa-se que o comprimento dos corpos de prova sofre alteração de acordo com os parâmetros de processamento, como mostrado na Figura 39. Em relação ao grupo Ref, o aumento de velocidade implica em comprimentos maiores com maior dispersão (V25), que apesar disto se encontram com valor próximo ao comprimento do modelo. Este desvio pode ser atribuído à rigidez da estrutura, desvio no passo dos motores e a deformação do próprio material. (GO *et al.*, 2017)

Figura 39 - Comprimento dos corpos de prova por grupo de processamento



Com o aumento da temperatura de impressão ocorre um aumento no comprimento, sendo levemente maior do que grupo Ref. Este aumento pode ser gerado pela redução excessiva da viscosidade do material com a temperatura,

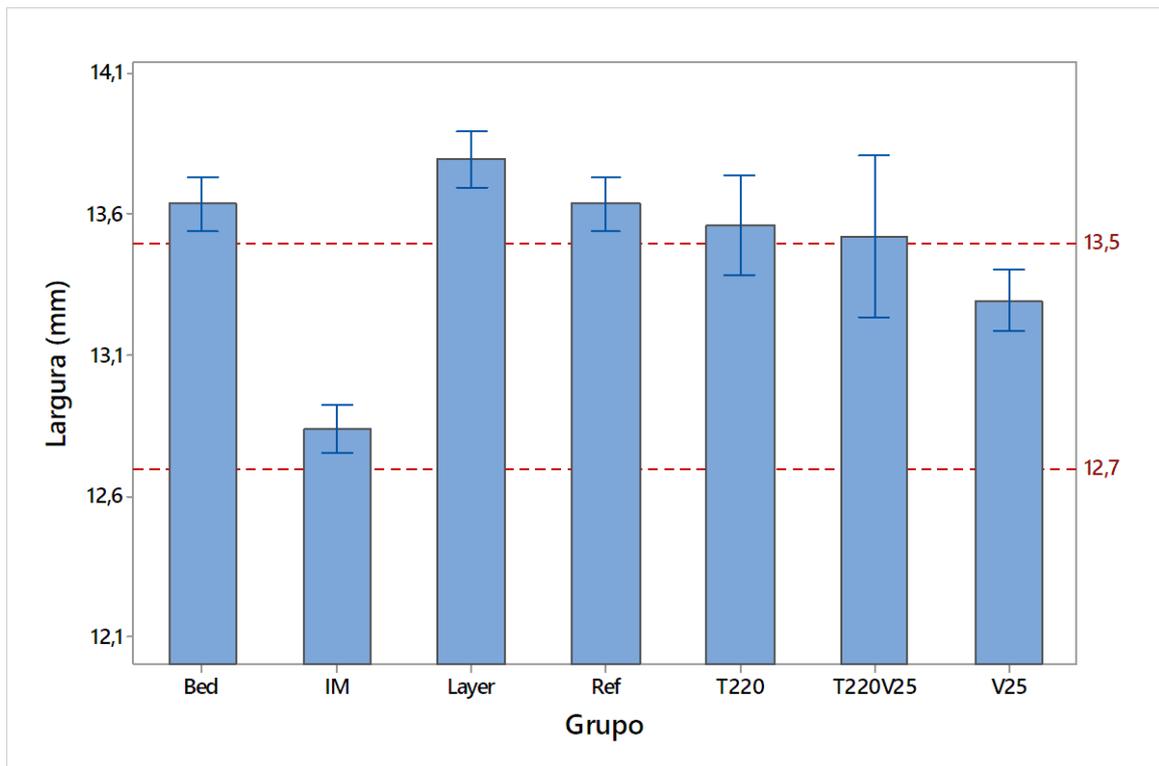
ocorrendo o efeito de *oozing* nas partes extremas do corpo e prova. Neste fenômeno a temperatura excessiva faz com que mais material seja depositado ao final de uma linha de deposição do que o requisitado pelo código da máquina (HERGEL *et al.*, 2014). Os efeitos da velocidade e temperatura de impressão são mais severos quando ambos os parâmetros são elevados (T220V25), causando uma diferença de 0,4 mm contra o padrão, o mesmo que uma linha de deposição.

A largura dos corpos de prova foi afetada de maneira mais uniforme com a variação dos parâmetros de processamento (Figura 40). Com exceção do grupo V25, os demais, apesar de terem tido médias diferentes, não possuem diferença estatística quando considerados os desvios padrões. O grupo V25 foi o único com largura inferior a nominal do modelo. Isto pode ser relacionado com a maior velocidade de deposição, orientando a linha de maneira a sofrer menor inchamento, semelhante ao aumento de velocidade da bobina de enrolamento em uma extrusora convencional (KRISHNARAJ *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2018).

Os grupos com variação de temperatura apresentaram médias dentro da largura nominal, porém maior desvio. Este aumento no desvio pode ser atribuído a maior temperatura, possibilitando maior relaxamento do material lateralmente antes do polímero perder mobilidade das cadeias durante o resfriamento (ZHANG *et al.*, 2017).

Já o grupo processado por injeção apresentou comprimento com maior diferença em relação ao seu comprimento nominal. Esta diferença pode ser atribuída a contração ocasionada durante o próprio resfriamento do material, que possui maior liberdade nesta direção (HARADA, 2004). De maneira geral, o processo de FDM apresentou maior precisão dimensional em relação a sua referência, quando comparado com o processo de injeção.

Figura 40 - Largura dos corpos de prova por grupo de processamento



Entre o padrão Ref e o grupo com aumento de temperatura da mesa não há diferenças entre as médias e os desvios são praticamente iguais, indicando que o efeito da temperatura da mesa sobre a largura é mínimo para a temperatura de mesa utilizada. Porém o comprimento dos corpos de prova do grupo Bed apresentaram-se maiores do que os padrões, com médias 0,25 mm maiores. Possivelmente ao ser mantido acima da T_g durante o processamento e bruscamente resfriado uniformemente, o material do corpo de prova solidificou-se antes de haver a contração térmica (MANRICH, 2005).

Para o grupo com menor espessura de camada, o maior resultado foi medido, em 13,8 mm, aumentando, ao invés de diminuir como aconteceu referente a seu comprimento. Isto pode ser relacionado com o achatamento da linha de deposição durante o processamento. Uma vez que diminuir a altura da camada aumenta a relação entre altura da camada e largura da linha de deposição, diminuir a vazão volumétrica faz com que haja menor deposição na orientação da linha, no comprimento, mas maior interferência entre as linhas adjacentes e nas direções perpendiculares a deposição, aumentando a largura. Este efeito é esperado, utilizado

para promover a melhor adesão entre as linhas de deposição (WU *et al.*, 2015) e para conferir melhor acabamento na peça produzida. Entretanto, de maneira similar ao que ocorre na seção 5.1.1.1, um aumento no número de linhas de deposição pode criar um sobre compensação durante a extrusão. Esta, acaba por gerar um erro incremental a cada linha depositada, aumentando a espessura efetiva, uma vez que a compensação não consegue preencher de maneira adequada os vazios.

Novamente, assim como na seção 5.1.1.1. podem ser visualizadas diferenças dimensionais causadas pelos parâmetros utilizados, neste caso os de processamento. Estas diferenças podem se tornar significativas e devem ser levadas em consideração durante o projeto da peça e processamento.

Contrário ao seu comprimento, os corpos de prova injetados apresentaram medidas superiores à referência. Este inchamento é relacionado a sua solidificação. Ao entrar em contato com as paredes do molde, a massa fundida da superfície se solidifica antes, gerando maior pressão devido ao acúmulo de material, causando o inchamento (HARADA, 2004).

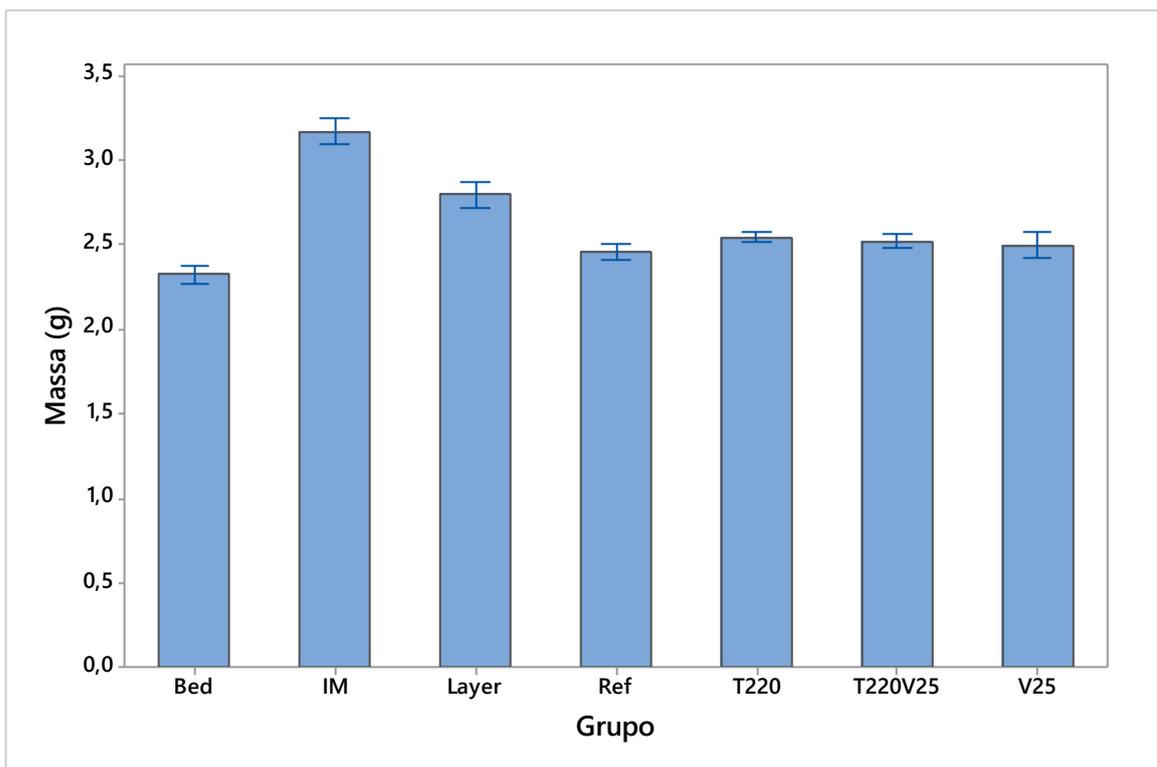
Comparando, em ambos os processos ocorrem desvios em relação as suas referências. Para o processo de FDM, isto pode ser compensado com o ajuste das variáveis de processamento ou do projeto, enquanto para o processo de injeção, este deve ser compensado pelo projeto do molde.

5.2.2.2 Gravimetria

A Figura 41 apresenta as relações de massas dos corpos de prova dos grupos de processamento. Os resultados em relação à massa dos corpos de prova permitem observar diferenças entre as mesmas em relação aos parâmetros utilizados. De maneira geral, em relação ao padrão Ref, a variação da temperatura e velocidade não levaram a mudanças estatisticamente significativas, apesar do aumento de temperatura aumentar a média em relação ao padrão. Pode ser notado que o aumento da velocidade leva a um aumento no desvio padrão, possivelmente relacionado a perda de precisão associada.

A maior diferença se encontra na alteração da altura de camada, onde o grupo Layer apresentou massa superior aos demais grupos, com média de 2,8 g. Isto pode ser relacionado com a menor taxa de deposição volumétrica, permitindo melhor controle da deposição e preenchendo de maneira mais uniforme os vazios entre as linhas de deposição. Durante o processamento, o filamento ainda sólido é empurrado e puxado pelo motor de passo, causando a deposição desejada do material, e causando um efeito de histerese, uma vez que isto não ocorre de forma instantânea. Com uma menor taxa de deposição volumétrica, este efeito de histerese diminui, facilitando a deposição (GO *et al.*, 2017; SUKINDAR *et al.*, 2017).

Figura 41 - Massa dos corpos de prova por grupo de processamento



O aumento da temperatura da mesa de impressão, no entanto, fez com que a massa dos corpos de prova diminuísse em relação ao padrão. É possível que o empenamento da placa de aquecimento tenha causado este efeito de forma indireta, limitando a deposição de parte da primeira camada, diminuindo a quantidade de material depositado. Isto pode ser atribuído a natureza do equipamento, que por se tratar de um modelo próprio, foi decidido realizar a impressão diretamente na mesa aquecida, para melhor calibração da temperatura. Este problema pode ser

futuramente evitado mediante a utilização de uma técnica de mapeamento para a calibração da altura da mesa de impressão.

Em todos os casos, os corpos de prova apresentaram massas inferiores às massas dos corpos de prova criados por injeção do mesmo material. Os corpos de prova injetados tiveram massa média de 3,2 g \pm desvios. Esta diferença é significativa e relacionada aos vazios causados pelo processo de impressão e pela alta pressão utilizada no processo de injeção, que permite maior compactação do material (AHN *et al.*, 2002).

A diferença de massa, e logo material, causa diferenças nas propriedades mecânicas, sendo relacionada a menores absorções de impacto e tensões de escoamento. De um ponto de vista prático isto deve ser considerado na manufatura não somente pela resistência, mas pelo fato de os insumos serem comercializados por massa. Curiosamente, apesar de terem propriedades mecânicas levemente inferiores, a massa utilizada no processo de impressão é inferior, além de não sofrer com as perdas de material durante o processamento, podendo torna-lo, por kg de material, mais eficiente em alguns aspectos.

5.2.2 Morfologia

5.2.2.1 Microscopia Óptica

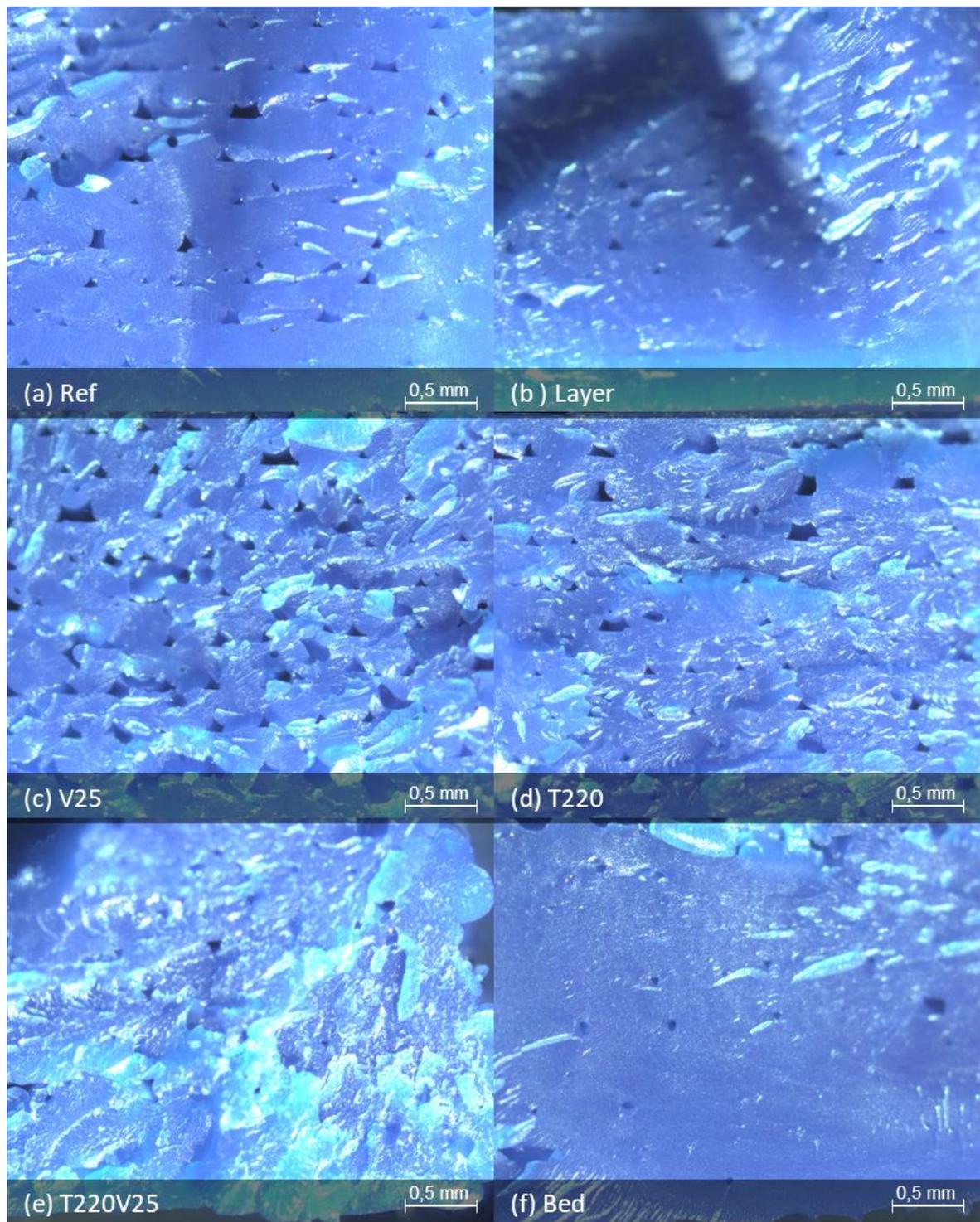
As diferentes estruturas e tipos de fraturas podem ser visualizadas nas imagens da superfície de fratura obtidas pela microscopia óptica, na Figura 42, contendo os diferentes grupos de processamento.

Ao observar as amostras fraturadas pelo ensaio de impacto através do microscópio ótico, podem ser observadas diferenças significativas quanto a sua morfologia. A mostra Ref, Figura 42 (a), apresenta fratura limpa e nivelada, com um grau intermediário de vazios em relação às demais.

Já a amostra de menor espessura de camada, Figura 42 (b), apresenta menor teor de vazios, quando comparada com a amostra Ref, assim como mencionado na literatura (DAWOUD *et al.*, 2016). A fratura, apesar da aparência lisa apresenta ondulações, indicando melhor aderência das camadas.

A amostra criada com maior velocidade de impressão, Figura 42 (c), possui maior teor de vazios e superfície irregular. Isso pode ser ocasionado por teor de vazios superior durante a impressão da peça ou menor grau de coalescência, levando a uma fratura não uniforme.

Figura 42 - Micrografia da superfície de fratura dos corpos de prova para diferentes grupos de processamento



A amostra criada a partir de temperatura de impressão mais elevada (Figura 42 (d)) possui zonas de maior coalescência, com melhor adesão, estando intactas após o teste de impacto (ABBOTT *et al.*, 2018). As irregularidades têm aparência menor, também indicando maior coesão entre as camadas e fratura mais frágil.

Já a amostra do grupo de maior temperatura e velocidade de impressão, Figura 42 (e), apresenta características intermediárias entre os grupos de velocidade e temperatura. A falha apresenta níveis distintos, mas em blocos maiores, indicando maior aderência entre as linhas de impressão.

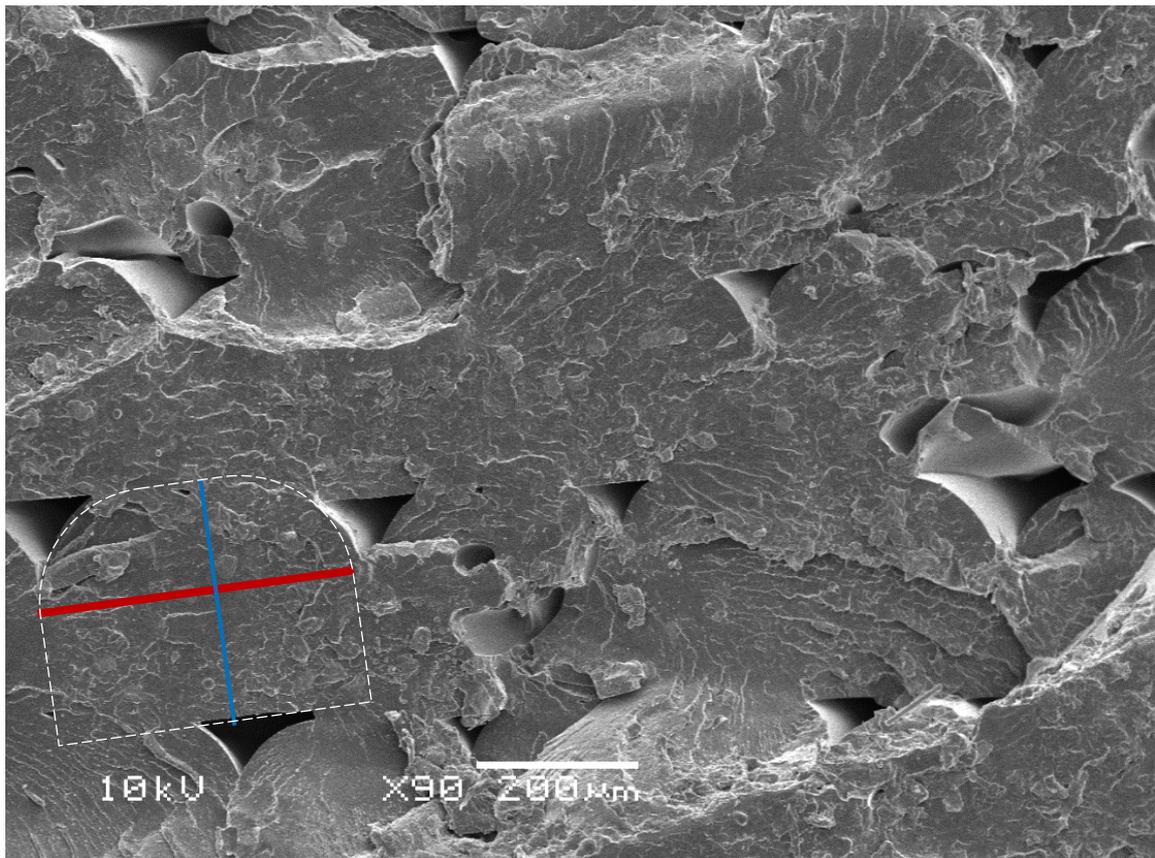
Por fim, a Figura 42 (f) apresenta o corpo de prova criado utilizando-se maior temperatura da mesa. A superfície apresenta uma fratura limpa e lisa, com menor teor de vazios, se aproximando de um corpo injetado, onde estes vazios não devem ser encontrados, uma vez que o material é processado em alta pressão, eliminando-os.

5.2.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figuras 43 a 47 apresentam as micrografias da superfície de fratura obtidas pela microscopia eletrônica de varredura das amostras dentro dos grupos de processamento.

Similarmente às micrografias ópticas, a amostra Ref, Figura 43, apresenta intervalos vazios entre as linhas de deposição. Também podem ser vistos pontos de relevo na superfície de fratura, principalmente entre camadas, indicando a menor resistência nestes pontos. A diferença de orientação das ranhuras suporta esta hipótese, havendo diferentes caminhos de propagação, alternando entre fratura da linha de deposição e delaminação.

Figura 43 – Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra Ref

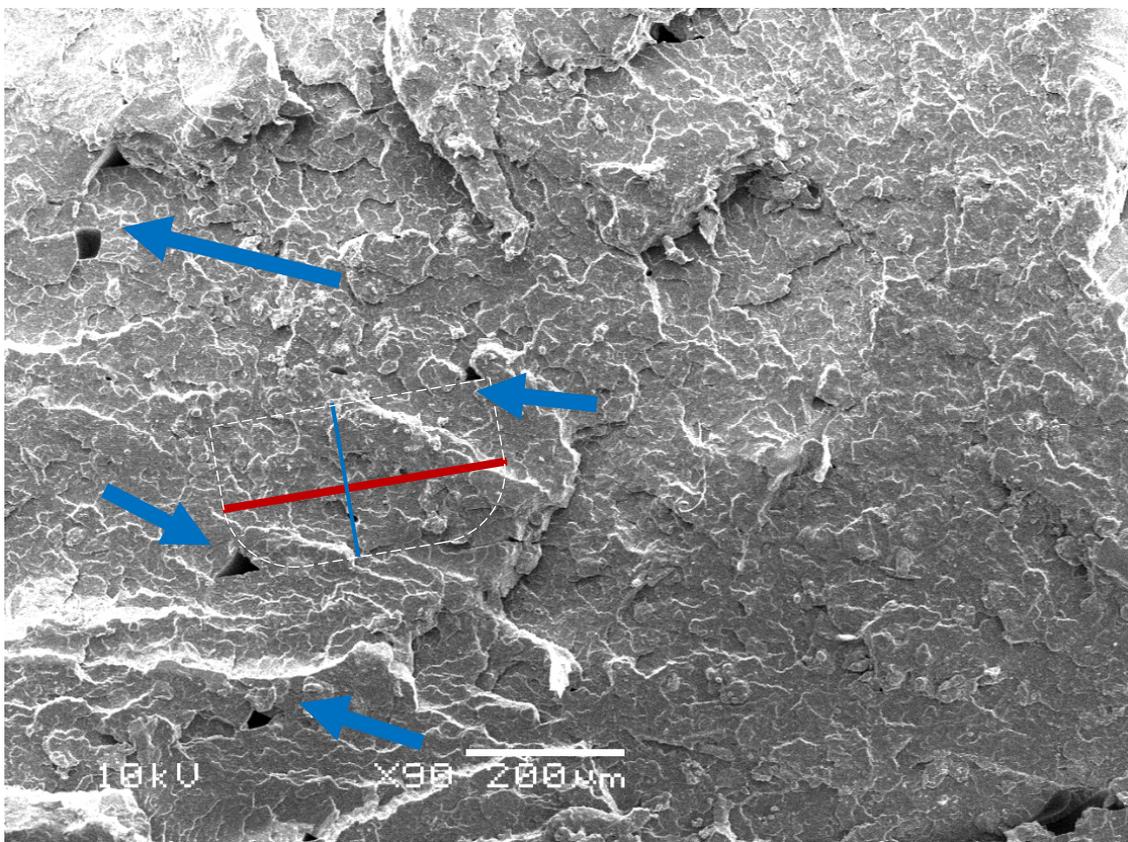


Na imagem, também pode ser visualizada a altura da camada (azul) e a espessura da linha de deposição (vermelho), assim como o formato imposto pela deposição de uma das linhas.

A espessura e altura se encontram dentro dos parâmetros estabelecidos, entretanto, o formato não se encontra simétrico, como o perfil da matriz. A parte inferior da linha se encontra de forma plana, enquanto a parte superior em forma arredondada. Uma hipótese seria relacionar este efeito com a coalescência inicial do material quando este entra em contato com a linha adjacente. Quando, com as tensões superficiais, a parte inferior da linha de deposição toma forma a fim de minimizar a distância entre os pontos de aderência criado pelas linhas das linhas inferiores havendo, inclusive, menor teor de vazios nesta região, o que não acontece na parte superior. No entanto este efeito deve ser estudado de maneira mais aprofundada.

Já no caso da amostra Layer, esta apresenta um teor menor de vazios devido à menor espessura da camada utilizada, como visualizado na Figura 44. As linhas de deposição não são facilmente reconhecíveis, sendo indicadas apenas pelos vazios, caracterizando melhor aderência entre as mesmas. Diferente da amostra Ref, não é notada orientação nas linhas de fratura, havendo pequenas diferenças entre os planos de propagação da fratura, indicando o *descolamento* (*pull-out*) do material. Esta melhor adesão entre as linhas de deposição, quando camadas menores são utilizadas, também é notada por WANG e GARDNER (2017) em PP, sendo possivelmente um fenômeno inerente entre os polímeros termoplásticos utilizados em FDM.

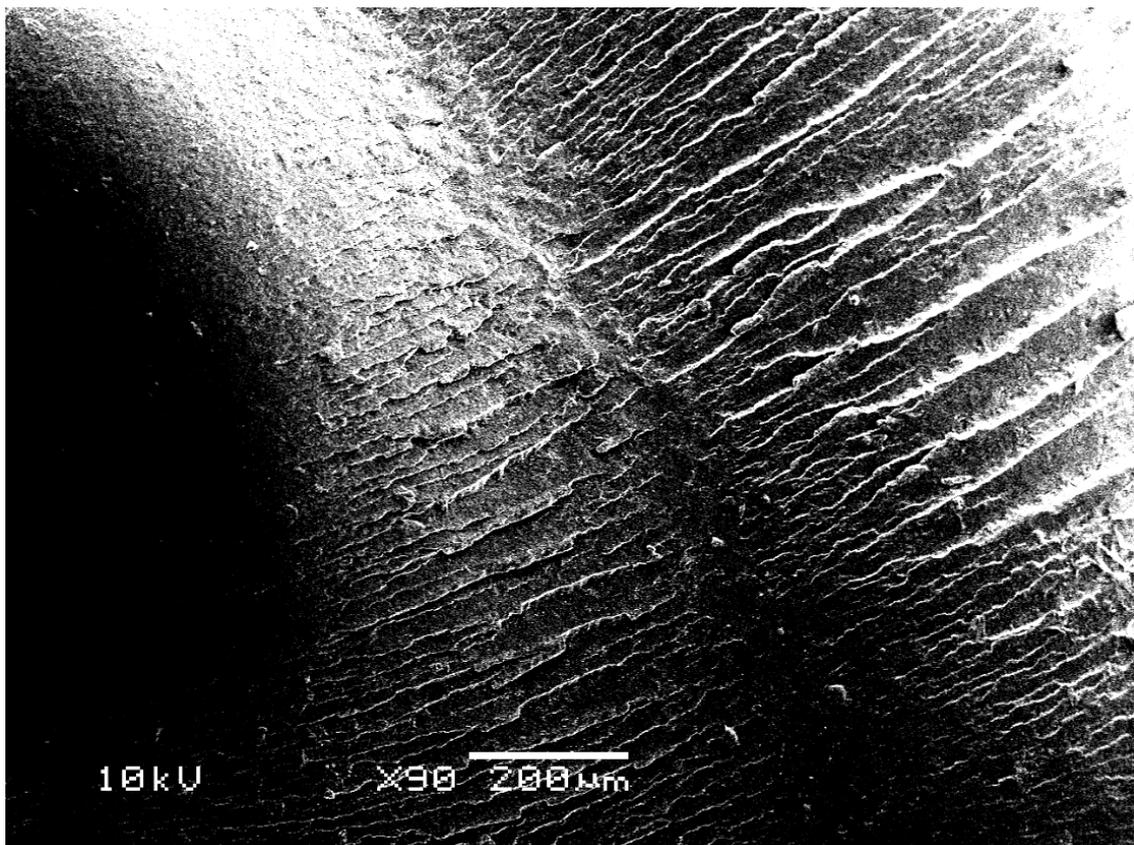
Figura 44 - Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra Layer



A micrografia da superfície de fratura da amostra moldada por injeção (IM), mostrada na Figura 45, não apresenta vazios, como esperado de uma peça injetada, tendo superfície de fratura mais lisa e compacta quando comparada às peças criadas

por FDM. As ondulações criadas durante a propagação da trinca são facilmente visíveis e perpendiculares, indicando uma propagação uniforme. Apesar das ondulações, observa-se uma superfície plana, o que indica uma fratura frágil e rápida. O alto contraste e a região escura presente na parte esquerda da imagem indicam que a tensão de 10kV é alta demais para este material, danificando a amostra.

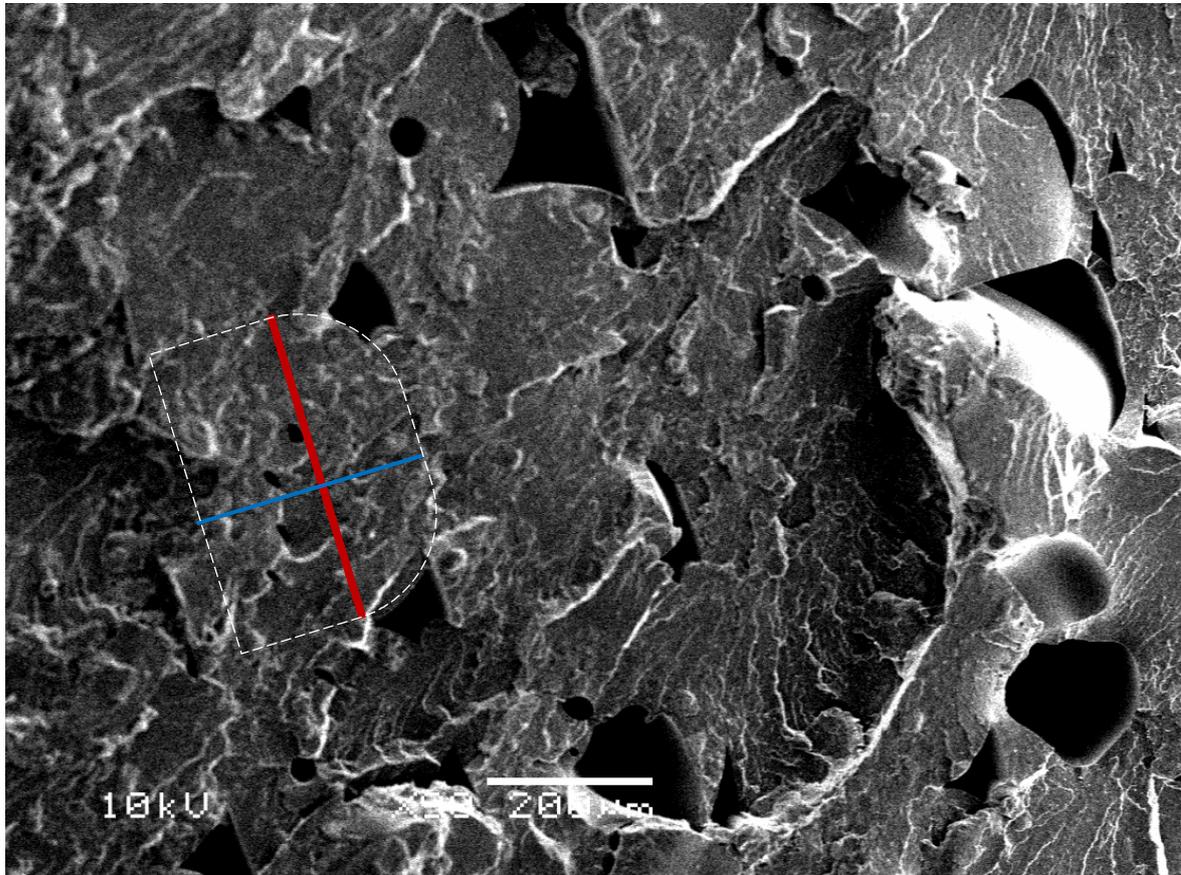
Figura 45 - Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra moldada por injeção (IM)



A micrografia da superfície de fratura da amostra V25 mostrada na Figura 46 apresenta uma superfície mais danificada, quando comparada às demais, sendo visível a delaminação causada pelo descolamento entre as linhas de deposição e a propagação da falha. Apesar da delaminação, as linhas se apresentam coesas, sendo perceptíveis as linhas de falha alinhadas, indicando a propagação da trinca. Também pode ser visualizado o fenômeno de *pull out*, onde linhas de deposição são arrancadas durante a fratura. Apesar da coesão, as linhas se encontram deformadas ao ponto de

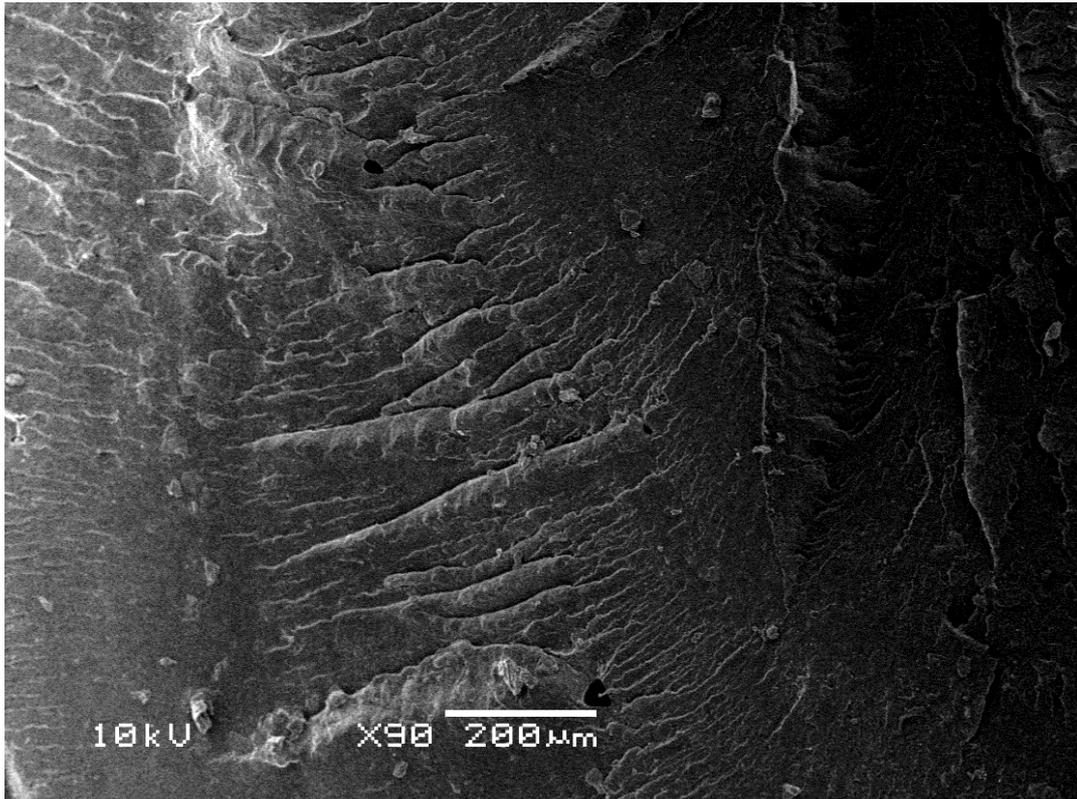
dificultar a identificação, sofrendo visivelmente mais danos do que os demais grupos de amostras.

Figura 46 - Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra V25



A micrografia da superfície de fratura da amostra Bed, Figura 47, apresenta-se semelhante à amostra moldada por injeção. Verificou-se pequenos vazios, decorrentes da incompleta coalescência entre as linhas de deposição. No entanto, as linhas em si não podem ser diferenciadas, o que indica um alto grau de coalescência e união. Este pode ser diretamente atribuído ao maior tempo que o material se encontra acima da T_g sobre estas condições, promovendo maior difusão entre as cadeias e crescimento de fases cristalinas (AWAJA, 2016). A fratura apresenta áreas intercaladas entre superfície lisa e superfície com ranhuras, similar a amostra produzidas por injeção.

Figura 47 - Micrografia da superfície de fratura obtida por MEV da amostra Bed

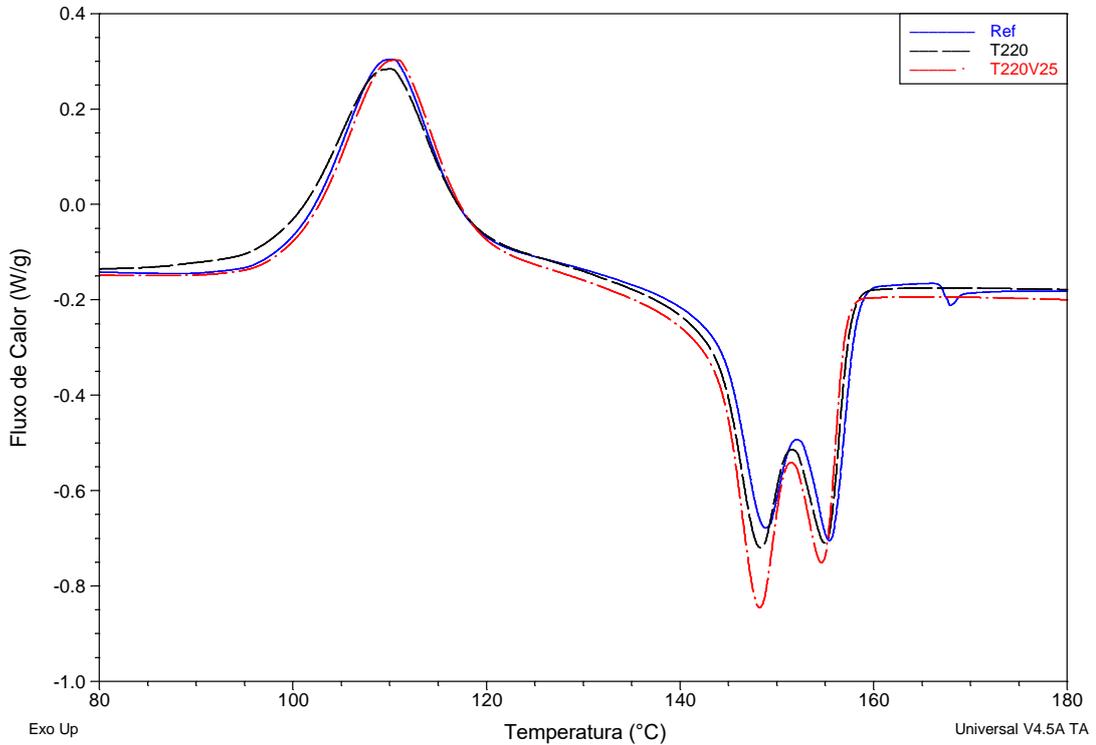


5.2.3 Análise Calorimétrica Diferencial (DSC)

Os termogramas obtidos por DSC para as amostras escolhidas dentro dos diferentes grupos de processamento são mostrados nas Figuras 48 a 52. Para todas as curvas termográficas, podem ser notados dois picos durante a fusão, menos expressivos para o processo de injeção. Isto pode ser relacionado a diferentes tipos de cristalitos formados durante o resfriamento do PLA. Segundo (TÁBI et al., 2016), estruturas cristalinas do tipo α e α' são formadas por diferenças na cinética de cristalização e resfriamento do PLA. Isto pode ser associado ao primeiro resfriamento do material durante a deposição no processo de FDM e os consequentes reaquecimentos. Por outro lado, o processo de injeção sofre um resfriamento único, o que então seria associado a uma maior uniformidade dos tipos de cristalitos. De fato, a curva termográfica da amostra IM (moldada por injeção) apresenta um pico com maior saliência, em temperatura mais baixa.

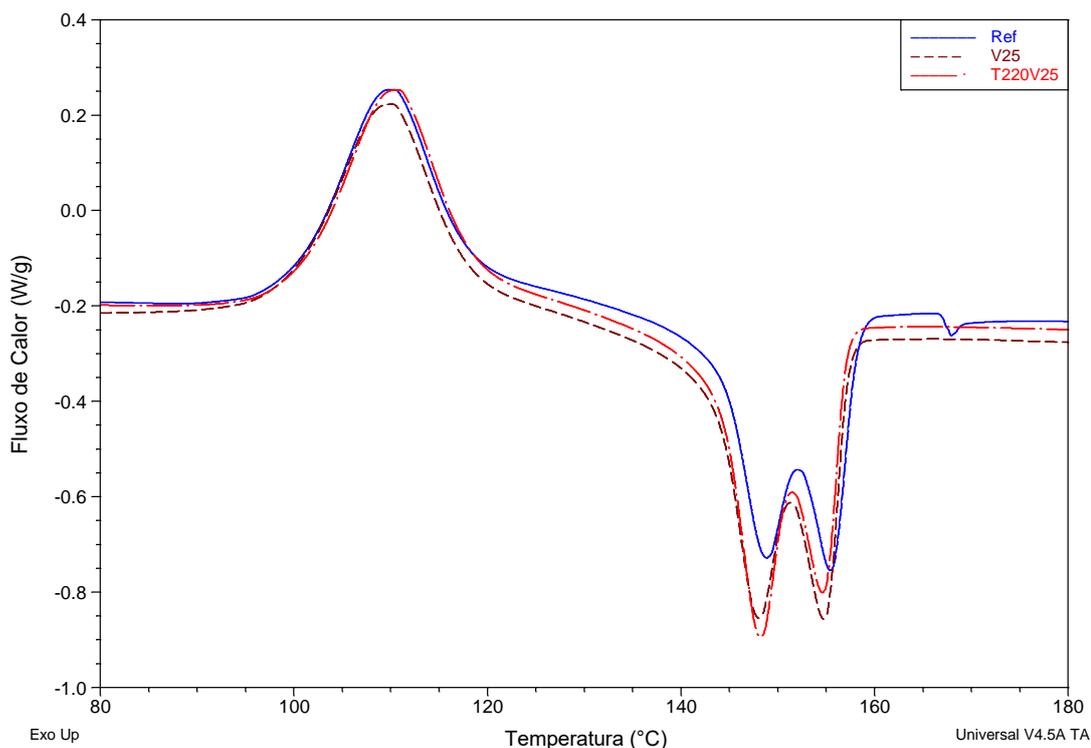
Com o aumento da temperatura, Figura 48, ocorre aumento na entalpia de fusão, com diferenciação entre os picos, sendo mais pronunciado o sub pico de temperatura inferior. Já o pico de cristalização a frio sofreu pouca variação.

Figura 48 – Termogramas de DSC para as amostras processadas em diferentes temperaturas



O mesmo ocorre para o aumento da velocidade, Figura 49, tendo efeito parecido ao de aumento de temperatura. O pico de fusão se torna mais acentuado e com um sub pico maior na temperatura inferior, enquanto o pico de cristalização a frio sofre poucas alterações.

Figura 49 - Termogramas de DSC para as amostras processadas em diferentes velocidades



Já para espessuras diferentes de camadas, Figura 50, ocorre diferenciação do pico de cristalização a frio. Com espessura de camada menor, o pico tem seu máximo em uma temperatura inferior, 108,6 °C. É possível que isto esteja relacionado à energia de tensões residuais causadas pela deposição de camadas de menor espessura. Já o pico da temperatura de fusão aumenta mas, ao contrário das amostras de diferente temperatura e velocidade, o sub pico mais afetado é o de maior temperatura, indicando cristalitos maiores.

O aumento da temperatura de mesa, Figura 51, levou um aumento do pico de fusão, como os demais parâmetros, sendo, no entanto, de forma similar a amostra Ref. Já o pico de cristalização a frio sofre leve decréscimo na sua temperatura de ponto máximo, em 109,3 °C.

Figura 50 - Termogramas de DSC para as amostras processadas em diferentes espessuras de camada

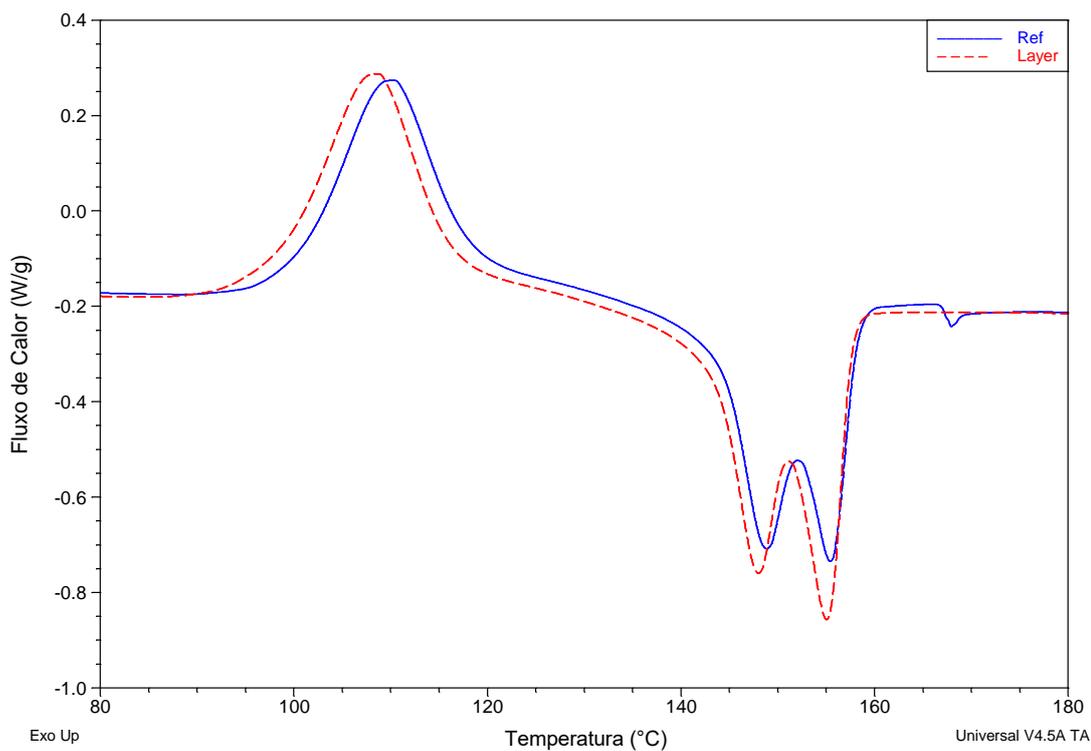
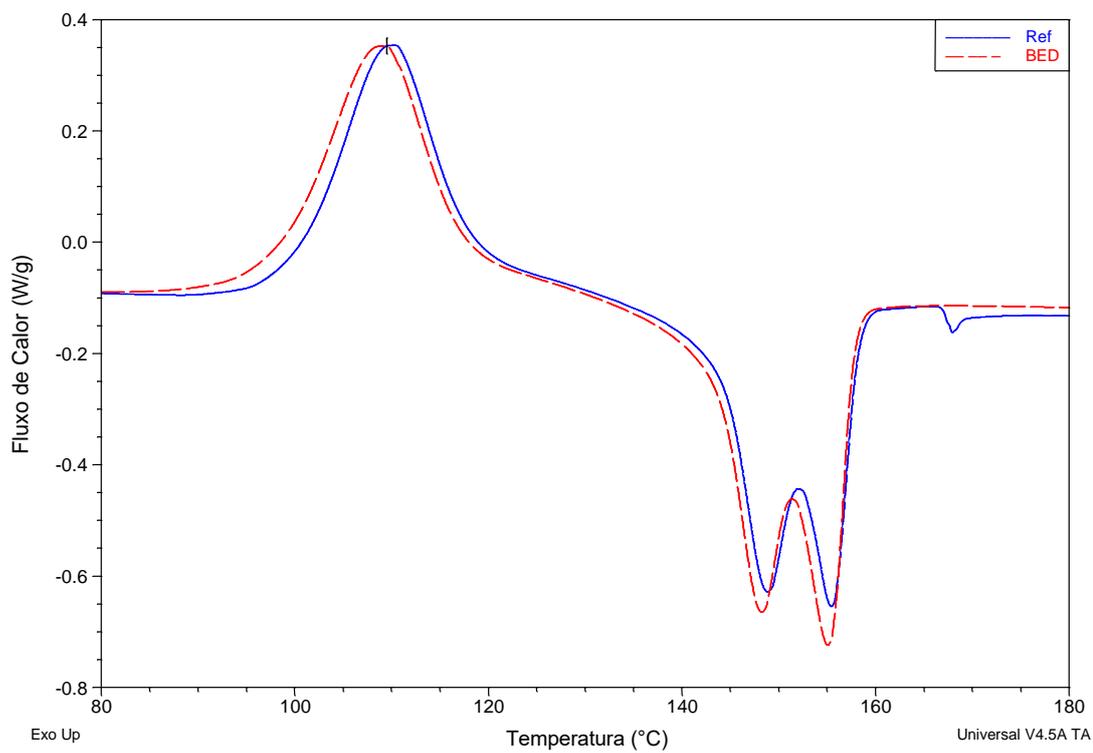
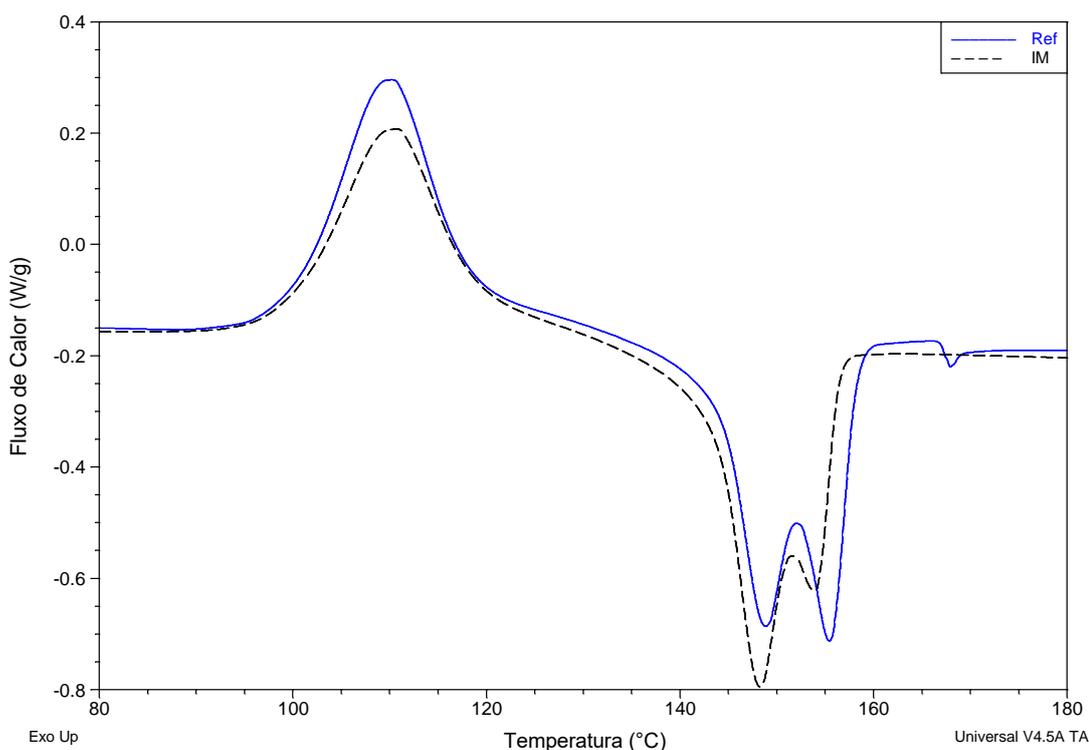


Figura 51 - Termogramas de DSC para as amostras processadas em diferentes temperaturas de mesa



Comparando a amostra Ref com o corpo de prova moldado por injeção, Figura 52, diferenças significativas podem ser observadas. O pico de cristalização a frio, apesar de ter ponto máximo similar, possui área menor. Os picos de fusão, apesar de áreas totais diferentes, apresentam os mesmos sub picos, sendo que a amostra IM apresenta um pico mais estreito, o que pode ser atribuído a maior homogeneidade no tamanho dos cristalitos.

Figura 52 - Termogramas de DSC para as amostras moldadas por injeção e FDM (Ref)



Na Tabela 08 são apresentados os resultados obtidos pela análise de DSC das amostras avaliadas. A amostra Ref apresenta o menor grau de cristalinidade, 9,6%, entre os diferentes grupos, fato que pode ser relacionado ao seu rápido resfriamento durante o processo de FDM. Os corpos de prova dos demais grupos de processamento apresentam valores de cristalinidade na mesma faixa e parecidos com o valor encontrado para a amostra injetada. Primeiramente pode ser concluído que o processo de FDM possibilita o processamento de materiais com graus de cristalinidade iguais aos criados por injeção. Em segundo, os parâmetros utilizados

para o teste levaram a graus cristalinidade similares, sendo possível então, dentro do processo de FDM, a alteração de um ou mais parâmetros de forma a contrabalançar outro, o que também é mencionado na literatura (SUN *et al.*, 2008; COSTA *et al.*, 2017). Uma vez que dentro do processo de FDM estes parâmetros podem ser reajustados ao longo do processamento, isto abre a possibilidade de criar peças com estrutura e morfologia personalizadas e não uniformes, podendo apresentar regiões de maior ou menor cristalinidade (WANG, L. *et al.*, 2017).

Tabela 08 - Resultados da análise térmica de DSC das amostras avaliadas.

Amostra	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_g (°C)	T_f (°C)	ΔH_f (J/g)	X_c (%)
IM	110,6	25,44	62,6	155,4	37,69	13,1
Ref	110,1	29,73	58,3	148,2	38,69	9,6
Bed	109,3	29,67	60,6	154,9	42,7	14,0
T220	110,0	28,59	61,3	148,2	40,59	12,9
T220V25	110,5	30,7	59,9	148,1	42,81	13,0
V25	110,1	30,1	60,6	147,9	42,73	13,5
Layer	108,6	29,81	57,8	155,0	42,19	13,3

Os efeitos que levam ao aumento da cristalinidade com a mudança dos parâmetros de processamento, estão relacionados ao tempo de resfriamento da amostra e o tempo que o material passa acima da sua T_g, como discutido anteriormente. Ao utilizar temperaturas maiores, é necessário maior tempo para resfriamento até abaixo da T_g, visto que o coeficiente de transferência de calor não é alterado, devido ao modo de resfriamento da peça ser igual.

Ao elevar a velocidade de deposição, a linha de deposição adjacente passará mais cedo ao lado da linha anterior, reaquecendo antes que haja resfriamento em maior grau. Com isto o reaquecimento pela passagem da linha adjacente leva a linha primária a uma temperatura maior do que ocorreria em velocidades baixas e, novamente, a maior tempo acima da T_g.

Já para o caso de menor espessura de camada, há maior número de passagens perto das linhas, principalmente na direção vertical, visto que há mais número de

linhas de deposição por unidade de altura. Em segundo, há menor massa sendo depositada e menor massa sobre a linha adjacente, fazendo com que o calor emitido pelo cabeçote de injeção eleve o material à temperaturas maiores, que novamente passa mais tempo acima da T_g (ZHANG *et al.*, 2017).

Utilizando-se do aquecimento da mesa de deposição, nota-se uma elevação razoável no grau de cristalinidade do material. Isto pois a mesa aquecida é, assim como o molde de injeção, mantida constantemente a 60°C. No entanto, o processamento da peça por FDM requer maior tempo do que o utilizado no processo de injeção, permitindo que o material passe maior tempo acima da sua T_g . De certa forma, isto pode ser observado como um tratamento térmico durante o processamento, tendo o mesmo efeito prático. Além de ser mantida acima da T_g , os reaquescimentos subsequentes causados pelos passes das linhas adjacentes elevam a temperatura, dando maior energia e mobilidade ao material, promovendo ainda mais o processo de formação e crescimento de cristalitos (TÁBI *et al.*, 2010). Possivelmente, com o uso de maiores temperaturas de mesa, maiores graus de cristalinidade podem ser alcançados. No entanto mais estudos se fazem necessários.

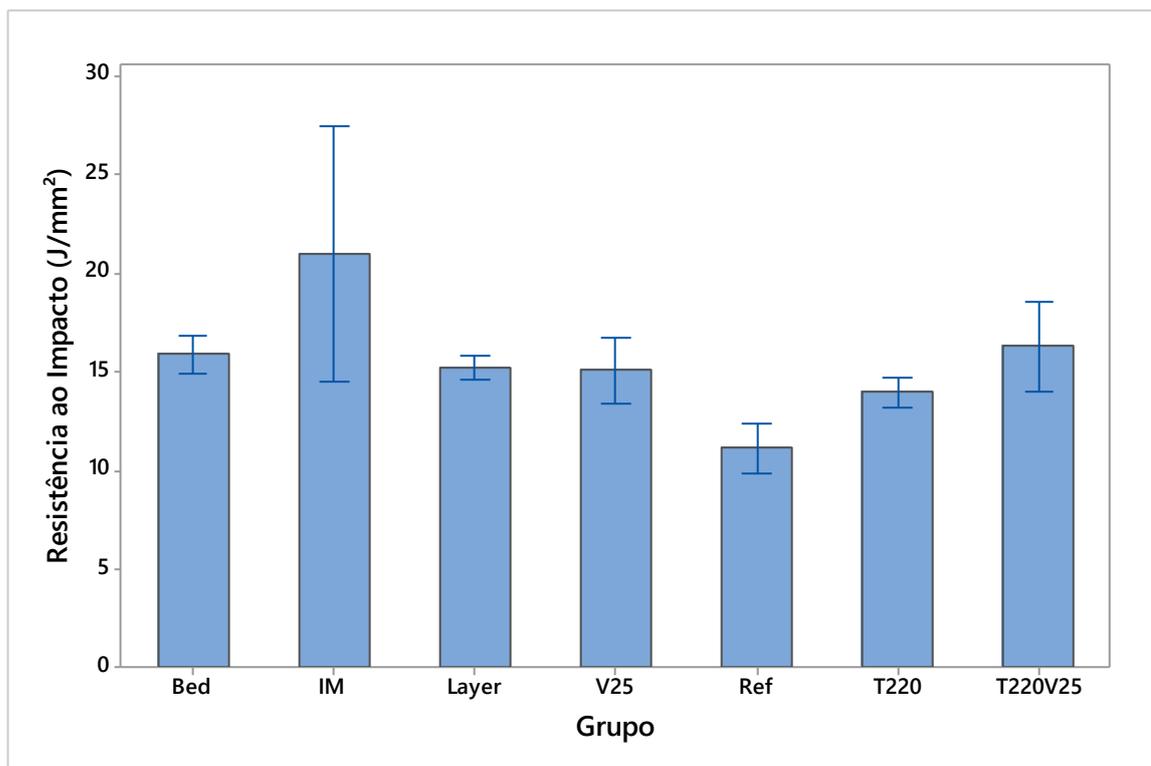
5.2.4 Propriedades Mecânicas

5.2.4.1 Impacto

A Figura 53 apresenta os resultados de resistência ao impacto para os grupos de amostras de processamento FDM e para o grupo processado por injeção.

Quando comparado dentre os grupos, o grupo Ref apresenta menor resistência ao impacto, indicando influência dos parâmetros de impressão FDM nas propriedades do corpo de prova. Através da análise estatística, é observado que ambas as modificações aos parâmetros levam a um aumento nos resultados de resistência ao impacto. Um aumento de velocidade e um aumento de temperatura de impressão levam a este resultado. No entanto o aumento de ambas variáveis leva a um aumento levemente maior, indicando que há interação entre os efeitos ou um limite para o mecanismo de resistência.

Figura 53 - Resistência ao Impacto por grupo de amostras de processamento



De acordo com a literatura (COSTA *et al.*, 2017), o aumento da velocidade ou temperatura de impressão fazem com que o material impresso tenha maior tempo acima da T_g durante o seu resfriamento, promovendo o efeito de coalescência entre as linhas de deposição. Isto pode ser visualizado na seção 5.2.2.2, onde para as amostras dos grupos com maior temperatura ocorrem menores teores de vazios entre as linhas de deposição do que para as amostras do grupo Ref. No entanto esta diminuição nos vazios não é vista para o grupo V25, indicando que outro efeito, além da coalescência, influencia a resistência ao impacto. Na sua pesquisa, ZHANG *et al.*, (2017) propõe que isto está ligado ao grau de cristalinidade, fator que também tem influência na resistência ao impacto do material.

O fato de passar mais tempo acima da sua T_g não afeta somente a coalescência do polímero, mas também a sua cristalinidade. Faixas de temperatura acima da T_g tendem a promover a criação e crescimento de cristalitos. Porém, com o efeito de pulsos criado pelos subseqüentes reaquecimentos, não ocorre movimentação suficiente das cadeias para um grande crescimento dos cristalitos havendo, porém, maior nucleação e, conseqüentemente, maior quantidade de cristalitos de tamanho menor, o que é benéfico para o fator de absorção de impacto (WANG *et al.*, 2017).

Quanto a espessura da camada, pode ser visualizado na Figura 53 que um aumento da resistência ao impacto ocorre com a diminuição da espessura de camada utilizada na impressão. Neste caso, dois fatores podem ser atribuídos a este aumento. O primeiro fator é novamente a coalescência do polímero, onde um maior número de passagens por filamentos adjacentes promove aquecimentos repetitivos diminuindo o teor de vazios (SUN *et al.*, 2008).

Outro fator se deve a própria geometria da camada. Uma vez que a camada tenha sua espessura diminuída, o filamento tende a ser depositado de forma mais precisa, como visto na Figura 44. Esta mudança na geometria da deposição faz com que o material depositado apresente, em teoria, menores vazios entre cada linha de deposição (WU *et al.*, 2015). Tais vazios são, em teoria, compensados pelo *slicer* utilizado, mas ainda se encontram presentes. No entanto, o simples fato de haver maior área de contato com o filamento adjacente serve como ajuda para o efeito de coalescência, diminuindo o teor de vazios, como observado na Figura 44.

Novamente a cristalinidade também deve ser considerada, uma vez que o maior número de passagens e menor espessura das camadas, promove mais reaquecimentos do material durante a deposição das camadas superiores. Este reaquecimento, apesar de ténue pode levar o polímero acima da sua Tg (WANG, L. *et al.*, 2017) e promover aumento da cristalinidade.

Em relação à temperatura da mesa, os ensaios de impacto apresentam um aumento quando, para as mesmas condições de processamento, a temperatura de mesa é elevada de 20°C (temperatura ambiente, amostra Ref) até a temperatura de 60°C (amostra Bed). Estes resultados encontram-se de acordo com a pesquisa de BELLEHUMEUR *et al.* (2004). A explicação mais aceita se baseia na coalescência e aumento da cristalinidade. Uma vez que o material se encontra acima da sua Tg, este possui maior mobilidade e um tempo levemente superior acima dela antes do resfriamento, possibilitando maiores adesões entre os filamentos depositados (WANG; GARDNER, 2017) e criação e crescimento de cristalitos (YANG *et al.*, 2017).

Isto pode ser visualizado na Figura 42, onde para a temperatura ambiente ocorrem maiores vazios no interior do corpo de prova, quando comparado com o mesmo criado a temperatura de mesa de 60°C. Além do efeito direto da mesa, a cada passagem do bico de extrusão, depositando filamentos adjacentes, ocorre o

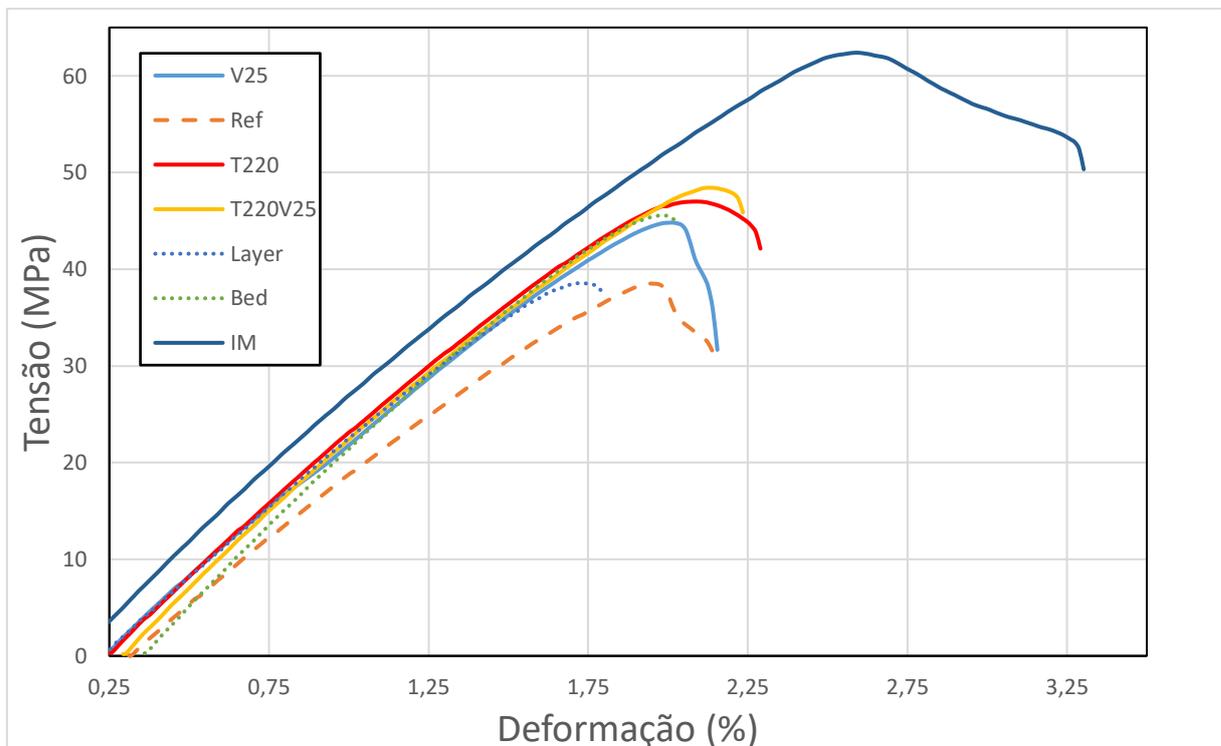
reaquecimento do material novamente a temperaturas superiores a T_g (KISHORE *et al.*, 2017), também promovendo a ambos os efeitos de coalescência e aumento de cristalinidade.

Por final, como esperado, as amostras criadas pelo processo de injeção apresentam médias de resistência ao impacto superiores às dos grupos criados pelo processo de FDM. Isto se deve a maior compactação efetuada pelo processo de injeção, eliminando os vazios, pontos de fragilidade no material (ZIEMIAN *et al.*, 2012).

5.2.4.2 Tração

Os resultados dos testes de tração para os diferentes grupos de processamento são apresentados na Figura 54, por curvas significativas.

Figura 54 - Curva tensão x deformação das amostras para diferentes parâmetros de processamento



Os resultados dos ensaios de tração para os grupos demonstram um comportamento similar aos resultados dos ensaios de impacto, onde a elevação da

temperatura e velocidade de impressão ocasionam em aumento do desempenho mecânico. Um sumário dos resultados pode ser visualizado na Tabela 09.

Pode ser observado na Figura 54, um aumento no módulo elástico. Em relação ao padrão, as demais amostras apresentam maiores médias. No entanto, apenas com a elevação da temperatura de impressão este aumento se torna significativo estatisticamente. A maior média é visualizada para a elevação tanto da temperatura quanto velocidade de impressão. Estes resultados estão de acordo com as propostas da literatura (YANG et al., 2017; ZHANG et al., 2017) e, como discutido na seção anterior, sugerem que maiores temperaturas e velocidades de impressão levem a maior grau de cristalinidade, elevando a dureza do material.

Tabela 09 – Resultados do ensaio de tração das amostras de diferentes parâmetros de processamento

Tipo de preenchimento	Módulo Elástico (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Def. de escoamento (%)
Bed	2930 (41)	44,47 (2,55)	1,86 (0,11)
Layer	2664 (98)	38,83 (0,5)	1,79 (0,03)
Ref	2386 (79)	40,24 (1,6)	2 (0,13)
T220	2662 (29)	46,04 (0,92)	2,1 (0,12)
T220V25	2794 (106)	47,73 (0,59)	2,21 (0,03)
V25	2588 (101)	43 (1,59)	2,07 (0,08)
IM	2641 (160)	63,5 (2,16)	3,04 (0,09)

Com o aumento da temperatura da mesa de impressão, ocorre um aumento significativo no módulo de elasticidade do material. Este aumento é condizente com a proposta de maior grau de cristalinidade, visto que o aumento do mesmo implica em um material mais rígido. O efeito do maior grau de cristalinidade é similar ao efeito causado nas peças injetadas (VADORI *et al.*, 2013) e visualizado, também, na deformação de ruptura, levemente inferior ao padrão. No entanto, como visto no gráfico, a elevação da temperatura da mesa, apesar de ser positiva em relação à tensão de ruptura, ainda se encontra na faixa dos grupos com aumento de temperatura e velocidade. Isto pode ser atribuído a menor deformação de escoamento, também condizente com o aumento da cristalinidade.

Pode ser observado que peças com menor espessura de camada apresentam maior módulo elástico. Isto é esperado, uma vez que a diminuição da espessura da camada leva a maior precisão da impressão, diminuindo o teor de vazios e, com o aumento do número de passes, a peças com maior grau de cristalinidade quando comparadas com o padrão.

No entanto, a deformação de escoamento diminui em torno de 10%, enquanto a tensão de escoamento permanece constante. Novamente, o aumento do módulo e decréscimo na deformação pode ser relacionado com o aumento da cristalinidade. No entanto, o efeito da precisão e facilitação da coalescência pela maior área de contato também deve ser levada em consideração (WAKAI *et al.*, 2016). Outro efeito possível, de acordo com a literatura, (LEON *et al.*) é de que o maior número de camadas leve a um maior número de pontos de falha, para quando a interface entre as camadas seja mais fraca e leve a falha prematura. O oposto é citado por (NIDAGUNDI *et al.*, 2015), que verifica um aumento da resistência com o maior número de camadas. Uma conciliação destes resultados é dada por pesquisas de SOOD *et al.* (2010) e CHACÓN *et al.* (2017), que discutem que a resistência quando relacionada à espessura da camada pode aumentar ou diminuir, dependendo dos demais parâmetros, pois neste caso, além do efeito da coalescência e interface, os efeitos de ductilidade e tensões residuais atuam de forma mais acentuada.

Os corpos de prova moldados por injeção apresentaram módulo elástico na faixa de 2640 MPa, intermediária entre os grupos processados por FDM. No entanto, sua tensão de escoamento e deformação no mesmo apresentaram valores superiores, em 63,5 MPa e 3,04, respectivamente. Isto é esperado, uma vez que os corpos de prova moldados pelo processo de injeção são criados com alta pressão, promovendo alta compactação do material e eliminando os vazios, o que leva a maior área transversal efetiva de material e maior resistência (ZIEMIAN *et al.*, 2012).

Este comportamento implica que estas variáveis possuem influências semelhantes nas propriedades mecânicas, podendo ser utilizadas de forma a que um parâmetro possa balancear o outro ou de forma a complementarem-se (ZHANG *et al.*, 2017). Isto faz com que os parâmetros devam ser escolhidos não somente para melhor acabamento do material, mas também de acordo com a propriedade mecânica desejada.

6 CONCLUSÕES

Durante a primeira etapa da pesquisa, a caracterização mecânica mostrou enorme influência dos parâmetros de preenchimento em relação as propriedades do material. O tipo Triangle se mostrou o mais frágil dentre os demais, que possuem resistências ao impacto semelhantes. A orientação de preenchimento também levou a diferenças entre as resistências ao impacto, sendo relacionada ao modo de fratura e a menor resistência das interfaces entre as linhas de deposição. Também, como esperado a resistência ao impacto aumenta de acordo com a quantidade de preenchimento, apesar deste aumento não ocorrer de forma uniforme.

A resistência ao impacto também é influenciada pelos parâmetros de processamento, sendo maior com o aumento da velocidade, temperatura de mesa, temperatura de extrusão e utilizando menor espessura de camada.

Sobre o desempenho mecânico à tração os tipos de preenchimento apresentaram diferenças significativas entre os módulos elásticos, o que se considera relacionado a sua característica geométrica. Já as tensões e deformações de escoamento possuem menor diferença, com exceção do padrão Triangle que possui resistência inferior.

De maneira similar a resistência ao impacto, o módulo elástico aumenta com a mesma diferenciação dos parâmetros de processamento. No entanto, a tensão de escoamento sofre diferenças relativas entre os parâmetros, abrindo a possibilidade de personalização do material a nível morfológico.

As alterações causadas pelos parâmetros de processamento são ligadas aos vazios dentro da estrutura, causados pela incompleta coalescência entre as linhas de deposição, e pela diferença de cristalinidade.

A diferença na mesoestrutura foi avaliada por microscopia óptica e eletrônica, sendo visível a diferença nas superfícies de falha causadas pelas diferenças entre os parâmetros de processamento e sendo visível a diferença nas interfaces entre as linhas de deposição.

A cristalinidade do material, avaliada por DSC, também apresentou alterações de acordo com os parâmetros de processamento, sendo menor para o padrão Ref e maior para o grupo Bed.

A massa dos corpos de prova criados por FDM sofreram variações de acordo com os parâmetros, e são inferiores as massas dos corpos de prova criados por injeção. Este fato pode ser relacionado com a pressão de injeção que compacta o material de maneira mais eficiente, evitando os vazios causados pelo processo de FDM. Entretanto, o processo de FDM pode se tornar atrativo devido a este fato, uma vez que as características mecânicas inferiores podem ser compensadas pela menor utilização de material.

Para que as peças moldadas por FDM tenham as características mais semelhantes às moldadas pelo processo de injeção, conclui-se que deve ser utilizado o preenchimento em 100 %, do tipo Retilinear e orientação 90°, sendo processado a partir de temperaturas de extrusão e mesa altas (220 e 60 °C, respectivamente) e espessura de camada em 0,3 mm e alta velocidade.

A análise dimensional revelou um ponto importante, havendo diferenças significativas de acordo com os parâmetros utilizados. Do ponto de vista dimensional, o processo de FDM se mostrou tão preciso ou mais do que o processo de injeção.

De maneira geral, as peças criadas pelo processo de FDM abrem grandes possibilidades na manufatura. As peças, para que sejam melhor utilizadas, devem ser projetadas para o processo de FDM. No entanto, isto permite opções de personalização do material que os demais processos de manufatura não conseguem oferecer, como a variação projetada na morfologia e características mecânicas do material.

7 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de ensaios comparando a utilização de diferentes termoplásticos no processo.
- Estudo sobre utilização de cargas e fibras no processo, buscando melhores propriedades mecânicas e facilidade de processamento.
- Estudo sobre a utilização de blendas poliméricas no processo.
- Estudo sobre a utilização de materiais para otimização do processo e para diferentes funcionalidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 52900:2015, A. Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. **ASTM International**, v. i, p. 1–9, 2015. Disponível em: <http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52900+15>. .
- ABBOTT, A. C.; TANDON, G. P.; BRADFORD, R. L.; KOERNER, H.; BAUR, J. W. Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. **Additive Manufacturing**, v. 19, p. 29–38, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.002>>. .
- AHN, S.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid Prototyping Journal**, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002.
- ALIHEIDARI, N.; TRIPURANENI, R.; AMELI, A.; NADIMPALLI, S. Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. **Polymer Testing**, v. 60, p. 94–101, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941817300065>>. .
- ASTM INTERNATIONAL. Standard test method for tensile properties of plastics. **ASTM International**, v. 08, p. 46–58, 2003. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Standard+Test+Method+for+Tensile+Properties+of+Plastics#0>>. .
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D256 - Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–20, 2010.
- AWAJA, F. Autohesion of polymers. **Polymer (United Kingdom)**, v. 97, p. 387–407, 2016.
- BASSETT, K.; CARRIVEAU, R.; TING, D. S. K. 3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 11, p. 186–193, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2015.01.002>>. .
- BATTEGAZZORE, D.; BOCCHINI, S.; FRACHE, A. Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites. **Express Polymer Letters**, v. 5, n. 10, p. 849–858, 2011.
- BELLEHUMEUR, C.; LI, L.; SUN, Q.; GU, P. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 6, n. 2, p. 170–178, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612504700717>>. .
- BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012. “Kelley School of Business, Indiana University.” Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>>. .
- BIXBY, S. Feasibility Study for the Manufacturing of a Shock Absorber Using 3D Printing Technology. **Published Masters Thesis**, v. 1, 2014.
- BODAGHI, M.; DAMANPACK, A. R.; HU, G. F.; LIAO, W. H. Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing. **Materials and Design**, v. 131, n. May, p. 81–91,

2017.

BOPARAI, K. S.; SINGH, R.; FABBROCINO, F.; FRATERNALI, F. Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 106, p. 42–47, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816315876>>. .

BOSCHETTO, A.; BOTTINI, L. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 37, p. 103–114, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.07.005>>. .

BRANS, K. 3D Printing, a Maturing Technology. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 7, p. 468–472, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667015357190>>. Acesso em: 30/5/2017.

CALLISTER, W. D. J. **Materials Science and Engineering**. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CANEVAROLLO, JR., S. J. **Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2007.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials and Design**, v. 83, p. 768–776, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>>. .

CASAVOLA, C.; CAZZATO, A.; MORAMARCO, V.; PAPPALETTERA, G. Residual stress measurement in Fused Deposition Modelling parts. **Polymer Testing**, v. 58, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941816312946>>. .

CASAVOLA, C.; CAZZATO, A.; MORAMARCO, V.; PAPPALETTERE, C. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. **JMADE**, v. 90, p. 453–458, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>>. .

CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. A.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials & Design**, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127517303143>>. .

CHOI, Y.-H.; KIM, C.-M.; JEONG, H.-S.; YOUN, J.-H. Influence of Bed Temperature on Heat Shrinkage Shape Error in FDM Additive Manufacturing of the ABS-Engineering Plastic. **World Journal of Engineering and Technology**, v. 04, n. 03, p. 186–192, 2016. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/wjet.2016.43D022>>. .

COSTA, S. F.; DUARTE, F. M.; COVAS, J. A. Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 245, p. 167–179, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617300791>>. .

CROCCOLO, D.; AGOSTINIS, M. DE; OLMI, G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. **Computational Materials Science**, v. 79, p. 506–518, 2013. Elsevier B.V. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041>>. .

DAI, X.; CAO, Y.; SHI, X.; WANG, X. RSC Advances degradation behavior and mechanical properties of. **RSC Advances**, v. 6, p. 71461–71471, 2016. Royal Society of Chemistry. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C6RA14190K>>. .

DAWOUD, M.; TAHA, I.; EBEID, S. J. Mechanical behaviour of ABS : An experimental study using FDM and injection moulding techniques. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 21, p. 39–45, 2016. The Society of Manufacturing Engineers. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002>>. .

DOMINGO-ESPIN, M.; PUIGORIOL-FORCADA, J. M.; GARCIA-GRANADA, A. A.; et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. **Materials and Design**, v. 83, p. 670–677, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>>. .

DUIGOU, A. LE; CASTRO, M.; BEVAN, R.; MARTIN, N. 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. **Materials and Design**, v. 96, p. 106–114, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>>. .

DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 228–235, 2014. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?issn=1355-2546&volume=20&issue=3&articleid=17111235&show=html>>. .

ESPALIN, D.; ALBERTO RAMIREZ, J.; MEDINA, F.; et al. Rapid Prototyping Journal A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal Rapid Prototyping Journal Rapid Prototyping Journal Iss Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1108/%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1108/RPJ-12-2012-0112%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1108/RPJ-06-2012-0058>>. .

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications ??? A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367–392, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>>. .

GALANTUCCI, L. M.; BODI, I.; KACANI, J.; LAVECCHIA, F. Analysis of Dimensional Performance for a 3D Open-source Printer Based on Fused Deposition Modeling Technique. **Procedia CIRP**, v. 28, p. 82–87, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827115002760>>. .

GARLOTTA, D. A Literature Review of Poly (Lactic Acid). , v. 9, n. 2, 2002.

GO, J.; SCHIFFRES, S. N.; STEVENS, A. G.; HART, A. J. Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. **Additive Manufacturing**, v. 16, p. 1–11, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860416302834>>. .

GOMEZ-GRAS, G.; JEREZ-MESA, R.; ANTONIO TRAVIESO-RODRIGUEZ, J.; LLUMA-FUENTES, J.

Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. **Materials & Design**, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127517311036>>. .

GRIFFITHS, C. A.; HOWARTH, J.; ROWBOTHAM, G. D. A.; REES, A. Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling. **Procedia CIRP**, v. 49, p. 28–32, 2016. The Author(s). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.024>>. .

HAMAD, K.; KASEEM, M.; DERI, F. Melt Rheology of Poly(Lactic Acid)/Low Density Polyethylene Polymer Blends. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 01, n. 04, p. 208–214, 2011. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/aces.2011.14030>>. .

HAMAD, K.; KASEEM, M.; YANG, H. W.; DERI, F.; KO, Y. G. Properties and medical applications of polylactic acid : A review. , v. 9, n. 5, p. 435–455, 2015.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: Projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.

HERGEL, J.; LEFEBVRE, S. Clean color: Improving multi-filament 3D prints. **Computer Graphics Forum**, v. 33, n. 2, p. 469–478, 2014.

ISLAM, M.; BOSWELL, B.; PRAMANIK, A. Dimensional accuracy achievable by three-dimensional printing. **IAENG Transactions on Engineering Sciences**, , n. May 2015, p. 263–268, 2014. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b16763-29>>. .

JAMSHIDIAN, M.; TEHRANY, E. A.; IMRAN, M.; JACQUOT, M.; DESOBRY, S. Poly-Lactic Acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 5, p. 552–571, 2010.

JEREZ-MESA, R.; TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. A.; CORBELLA, X.; BUSQUÉ, R.; GOMEZ-GRAS, G. Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. **Mechatronics**, v. 36, p. 119–126, 2016. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/mechatronics>. .

JIANG, J.; SU, L.; ZHANG, K.; WU, G. Rubber-toughened PLA blends with low thermal expansion. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 128, n. 6, p. 3993–4000, 2013.

KHAN, S. A.; SIDDIQUI, B. A.; FAHAD, M.; KHAN, M. A. Evaluation of the Effect of Infill Pattern on Mechanical Strength of Additively Manufactured Specimen. **Materials Science Forum**, v. 887, n. March, p. 128–132, 2017. Disponível em: <<http://www.scientific.net/MSF.887.128>>. .

KISHORE, V.; AJINJERU, C.; NYCZ, A.; et al. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. **Additive Manufacturing**, v. 14, p. 7–12, 2017.

KOUSIATZA, C.; KARALEKAS, D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process. **Materials & Design**, v. 97, p. 400–406, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.099>>. .

KRISHNARAJ, V.; PRABUKARTHI, A.; RAMANATHAN, A.; et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 4, p. 1791–1799, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.007>>. .

LEE, J.-Y.; AN, J.; CHUA, C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. **Applied Materials Today**, v. 7, p. 120–133, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352940717300173>>. .

LEON, R.; LING, T.; LEASE, J. Optimizing Layer Thickness and Print Orientation of 3D objects for Enhanced Mechanical Property using STRUCTO 3D Printers. .

LI, L.; SUN, Q.; BELLEHUMEUR, C.; GU, P. Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 4, n. 2, p. 129–141, 2002.

LI, Q.; KUCUKKOC, I.; ZHANG, D. Z. Production planning in additive manufacturing and 3D printing. **Computers and Operations Research**, v. 83, p. 1339–1351, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054817300138>>. .

LIU, W.; ZHOU, J.; MA, Y.; WANG, J.; XU, J. Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 275, n. 1, 2018.

LIU, Z.; ZHAN, J.; FARD, M.; DAVY, J. L. Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel. **Applied Acoustics**, v. 121, p. 25–32, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X16306041>>. .

MANRICH, S. Processamento de termoplásticos. , p. 1–12, 2005a.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**. São Paulo: Artliber, 2005b.

MURR, L. E. Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: From Human Organs to Aircraft Fabrication. **Journal of Materials Science & Technology**, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2016.08.011>>. .

NICKEL, A. H.; BARNETT, D. M.; PRINZ, F. B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. **Materials Science and Engineering A**, v. 317, n. 1–2, p. 59–64, 2001.

NIDAGUNDI, V. B.; KESHAVAMURTHY, R.; PRAKASH, C. P. S. Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4–5, p. 1691–1699, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.097>>. .

NING, F.; CONG, W.; QIU, J.; WEI, J.; WANG, S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. **Composites Part B: Engineering**, v. 80, p. 369–378, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>>. .

PAN, A. Q.; HUANG, Z. F.; GUO, R. J.; LIU, J. Effect of FDM Process on Adhesive Strength of Polylactic Acid(PLA) Filament. **Key Engineering Materials**, v. 667, p. 181–186, 2015. Disponível em: <<http://www.scientific.net/KEM.667.181>>. .

PENG, T. Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 62–67, 2016.

RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.; DELFANIAN, F.; LETCHER, T. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. **Journal**

of Failure Analysis and Prevention, v. 16, n. 3, p. 467–481, 2016. Springer US.

RAVI, A. K.; DESHPANDE, A.; HSU, K. H. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 24, p. 179–185, 2016. The Society of Manufacturing Engineers. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>>. .

RAYNA, T.; STRIUKOVA, L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 102, p. 214–224, 2016. Elsevier B.V. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>>. .

ROCCA-SMITH, J. R.; CHAU, N.; CHAMPION, D.; et al. Effect of the state of water and relative humidity on ageing of PLA films. **Food Chemistry**, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814617303096>>. .

SINGH, J.; SINGH, R.; SINGH, K.; PENNA, R.; FRATERNALI, F. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications. , v. 117, p. 138–149, 2017.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials and Design**, v. 31, n. 1, p. 287–295, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>>. .

STEUBEN, J. C.; ILIOPOULOS, A. P.; MICHPOULOS, J. G. Discrete element modeling of particle-based additive manufacturing processes. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 305, p. 537–561, 2016. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2016.02.023>>. .

SUKINDAR, N. A. BIN; MOHD ARIFFIN, M. K. A. BIN; TUAH BIN BAHARUDIN, B. T. H.; BINTI JAAFAR, C. N. A.; ISMAIL, M. I. S. BIN. Analysis on temperature setting for extruding polylactic acid using open-source 3D printer. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1348–1353, 2017.

SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.

TÁBI, T.; HAJBA, S.; KOVÁCS, J. G. Effect of crystalline forms (α' and α) of poly(lactic acid) on its mechanical, thermo-mechanical, heat deflection temperature and creep properties. **European Polymer Journal**, v. 82, p. 232–243, 2016.

TÁBI, T.; SAJÓ, I. E.; SZABÓ, F.; LUYT, A. S.; KOVÁCS, J. G. Crystalline structure of annealed polylactic acid and its. , v. 4, n. 10, p. 659–668, 2010.

TANIKELLA, N.; WITTBRODT, B.; PEARCE, J. Tensile Strength of Commercial Polymer Materials for Fused Filament Fabrication 3-D Printing. **Additive Manufacturing**, v. 15, p. 15, 2017. Elsevier B.V. Disponível em:
<https://www.academia.edu/26772825/Tensile_Strength_of_Commercial_Polymer_Materials_for_Fused_Filament_Fabrication_3-D_Printing>. .

- THIAGO, R.; FERREIRA, L.; CARDOSO, I.; ASSIS, T.; BÜRGER, D. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. , v. 124, p. 88–100, 2017.
- TIAN, X.; LIU, T.; YANG, C.; WANG, Q.; LI, D. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 88, p. 198–205, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.139>>. .
- TORRADO, A. R.; ROBERSON, D. A. Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 16, n. 1, p. 154–164, 2016. Springer US.
- VADORI, R.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. The effect of mold temperature on the performance of injection molded Poly(lactic acid)-based bioplastic. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 298, n. 9, p. 981–990, 2013.
- VEGA, V.; CLEMENTS, J.; LAM, T.; et al. The effect of layer orientation on the mechanical properties and microstructure of a polymer. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 20, n. 6, p. 978–988, 2011.
- WAKAI, F.; KATSURA, K.; KANCHIKA, S.; et al. Sintering force behind the viscous sintering of two particles. **Acta Materialia**, v. 109, p. 292–299, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.006>>. .
- WANG, L.; GARDNER, D. J. Effect of fused layer modeling (FLM) processing parameters on impact strength of cellular polypropylene. **Polymer**, v. 113, p. 74–80, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386117301799>>. .
- WANG, L.; GRAMLICH, W. M.; GARDNER, D. J. Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM). **Polymer**, v. 114, p. 242–248, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386117302586>>. .
- WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites : A review and prospective. **Composites Part B**, v. 110, p. 442–458, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>>. .
- WELLER, C. Economic perspectives on 3D printing [Doctoral dissertation]. , p. 1–214, 2015. Disponível em: <<https://publications.rwth-aachen.de/record/481083/files/481083.pdf>>. .
- WU, W.; GENG, P.; LI, G.; et al. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. **Materials**, v. 8, n. 9, p. 5834–5846, 2015.
- WULLE, F.; COUPEK, D.; SCHÄFFNER, F.; et al. Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 229–234, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.046>>. .
- XIAO, L.; WANG, B.; YANG, G.; GAUTHIER, M. Poly (Lactic Acid) -Based Biomaterials : Synthesis , Modification and Applications. **iomedical Science, Engineering and Technology**, p. 249–283, 2012.
- YADOLLAHI, A.; SHAMSAEI, N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials:

Challenges and opportunities. **International Journal of Fatigue**, v. 98, p. 14–31, 2017. Elsevier Ltd. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.001>>. .

YANG, C.; TIAN, X.; LI, D.; et al. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 248, n. January, p. 1–7, 2017. Elsevier. Disponible em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013617301620>>. .

ZHANG, J.; WANG, X. Z.; YU, W. W.; DENG, Y. H. Numerical investigation of the influence of process conditions on the temperature variation in fused deposition modeling. , v. 130, n. March, p. 59–68, 2017. Disponible em: <www.elsevier.com/locate/matdes>. .

ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMI, S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. **Mechanical Engineering**, 2012. Disponible em: <<http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropic-mechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling->>. .

ZOU, R.; XIA, Y.; LIU, S.; et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. **Composites Part B: Engineering**, v. 99, p. 506–513, 2016a.

ZOU, R.; XIA, Y.; LIU, S.; et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. **Composites Part B: Engineering**, v. 99, p. 506–513, 2016b.