

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PLA FRENTE
AOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

por

Lucas Wagner Gusberti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2019.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PLA FRENTE
AOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

por

Lucas Wagner Gusberti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 4 de Julho de 2019.

GUSBERTI, L. W. **Um estudo experimental do comportamento mecânico do PLA frente aos parâmetros do processo de impressão 3D**. 2019. 16. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

A impressão 3D pelo método de deposição de material fundido tem inúmeras possibilidades frente às suas aplicações em fabricação de componentes. Este processo já é largamente utilizado, principalmente em prototipagem, devido a sua flexibilidade. Para que sua aplicação possa ser estendida para a produção industrial, existem problemas associados ao custo de produção devido ao fato de que este método ainda é lento. Além disso, há certa dificuldade técnica em prever o comportamento mecânico dos componentes impressos 3D. Um dos motivos para isso é que este processo pode gerar peças com diferentes comportamentos mecânicos segundo os parâmetros de impressão. A rigidez e a resistência do componente, bem como o grau de anisotropia, podem ser significativamente diferentes. Isto normalmente inviabiliza sua utilização para fabricar componentes com responsabilidade mecânica, uma vez que não se tem muita segurança nas propriedades mecânicas. Assim, este trabalho apresenta um estudo sobre como diferentes velocidades de impressão e da utilização de ventilação forçada afetam a resposta mecânica e as dimensões do componente. Para o estudo foi utilizado o Poliláctico (PLA) devido à sua larga utilização em impressão 3D e por ser um material biodegradável e bioabsorvível. Corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração. Os resultados, por fim, foram analisados por análises estatísticas para determinar quais fatores tiveram influência sobre os parâmetros em estudo. Foi concluído que a velocidade de impressão e a utilização de ventilação demonstraram influência sobre as propriedades mecânicas no sentido transversal, porém não no sentido longitudinal. Outra conclusão foi que a velocidade de impressão apresentou influência sobre as dimensões dos corpos de prova impressos no sentido transversal. Por fim, foi encontrada uma combinação de parâmetros que produziu corpos de prova com propriedades mecânicas estatisticamente não anisotrópicas.

PALAVRAS-CHAVE: impressão 3D, PLA, ensaio de tração.

GUSBERTI, L. W. **An experimental study of PLA mechanical behavior against 3D printing process parameters**. 2019. 16. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The 3D printing by fused material deposition modeling method has numerous possibilities relative to its applications in components manufacturing. This process already is widely used, mostly for prototyping, due to its flexibility. So that its application can be extended to industrial manufacturing there is a cost difficulty, since this method is still slow. In addition, there are technical difficulties to predict the 3D printed material mechanical behavior. One of the reasons for this difficulty is that this process results in parts with different mechanical behavior depending on the printing parameters. The part rigidity and strength, as well as the anisotropy degree, can be significantly different. Usually this characteristic makes it complex to produce parts that require mechanical performance, since there is uncertainty over its mechanical properties. In view of this, this work presents a study about how different printing speeds and the use of ventilation affects the mechanical behavior and the dimensions of the component. The material used for this study was PLA due to its wide use in 3D printing and because it is biodegradable and bioabsorbable. Test specimens were subjected to tensile tests. Lastly, the results were analyzed by statistical analysis to determine which parameters had influence on the properties under study. It was concluded that the printing speed and the use of ventilation showed an influence on the mechanical properties in the transverse orientation, but not in the longitudinal. Another conclusion was that the printing speed showed influence on the dimensions of the test specimens printed in the transverse orientation. Finally, a combination of printing parameters that produced test specimens with statistically non-anisotropic mechanical properties was found.

KEYWORDS: 3D printing, PLA, tensile test.

Índice

1	Introdução	1
2	Objetivos.....	2
3	Revisão (teórica / estado da arte).....	2
3.1	Termoplásticos.....	2
3.1.1	Resposta mecânica dos plásticos	3
3.1.2	PLA (Poliácido Láctico)	3
3.1.3	Processos de Fabricação	4
3.2	Ensaio Mecânicos.....	6
4	Metodologia	6
5	Resultados e Discussão	9
5.1	Caso 1 - Análise das Propriedades Mecânicas.....	10
5.2	Caso 2 - Análise Dimensional	11
6	Conclusões	13
	Referências Bibliográficas.....	14
	Apêndice A – Curvas Tensão-Deformação Completas.....	16

1 Introdução

Desde sua invenção, a modelagem por deposição de material fundido (FDM), popularmente conhecida por impressão 3D, vem crescendo com as novas tecnologias e se difundindo como uma nova opção disponível entre os métodos de fabricação. Sua aplicação já é relativamente bem difundida em prototipagem, componentes com baixo volume de produção, peças de decoração, geometrias de elevada complexidade, componentes de pequena dimensão, entre outras, incluindo ambientes industriais, comerciais e até mesmo domésticos.

Apesar de ser um processo já conhecido e bem difundido para algumas aplicações, ainda existem barreiras que dificultam a utilização do método FDM em larga escala e em componentes de elevada responsabilidade mecânica. Uma dessas barreiras é a velocidade do processo, pois este tende a ser mais lento do que os já consolidados em linhas de produção, como usinagem, corte, solda, injeção, rotomoldagem, processos de conformação, etc. O elevado custo de fabricação de componentes impressos está ligado à velocidade do método. Existem previsões que dizem que a impressão 3D terá seu custo reduzido pela metade caso haja um aumento de quatro vezes na sua velocidade (CABREIRA, 2018). Para baixos volumes de produção, o FDM pode ser vantajoso economicamente, pois muitos processos necessitam elevados investimentos em ferramental. Porém a médio e longo prazo, conforme este investimento se dilui no aumento do volume produzido, o FDM passa a ser mais caro, deixando de ser competitivo.

O compromisso entre a velocidade, custo e complexidade geométrica são fatores importantes na escolha do processo de fabricação de um componente mecânico, bem como o entendimento de como este se correlaciona com as propriedades mecânicas.

O uso de métodos de impressão na fabricação de plásticos tem como principal dificuldade o desconhecimento do comportamento mecânico final do componente, que leva a uma limitação na aplicação em componentes que desempenham função estrutural. Esta característica é intrínseca ao método de fabricação.

Estas dificuldades técnicas podem ser levadas em consideração conforme o conhecimento sobre o assunto se desenvolve, reduzindo as incertezas sobre o comportamento mecânico dos componentes fabricados por FDM.

Existem vários parâmetros que devem ser escolhidos corretamente ao fazer o *setup* do processo, de forma a se obter um componente com a geometria e características mecânicas desejadas. Uma escolha inadequada pode levar a um componente muito flexível, muito frágil, ou até mesmo sem acurácia dimensional.

2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é estudar como alguns parâmetros de impressão influenciam as propriedades mecânicas de um componente impresso 3D, por deposição de material fundido, assim como sua influência nas dimensões do componente produzido. Este trabalho será delimitado a realizar este estudo com o PLA (Poliácido Láctico), material comumente utilizado em FDM.

Como a dificuldade de prever o comportamento mecânico do material impresso 3D é uma das barreiras que limitam seu emprego em diversas aplicações, o objetivo secundário deste trabalho é verificar se existe alguma combinação de parâmetros de impressão que levam a respostas isotrópicas.

3 Revisão (teórica / estado da arte)

3.1 Termoplásticos

Polímeros são materiais que, na maioria das vezes, são de origem orgânica e compostos por hidrocarbonetos (Callister e Rethwisch, 2012). Uma possível classificação de polímeros é entre termofixos – que uma vez sintetizados seu reprocessamento é muito difícil – e termoplásticos – que são facilmente reprocessados (Askeland e Wright, 2014).

Termoplásticos, também chamados apenas de plásticos, são polímeros que amolecem quando aquecidos (podendo até mesmo ficar líquidos), e endurecem quando resfriados, sendo que ambos os processos devem ser completamente reversíveis. Os plásticos amolecem quando aquecidos porque o aumento de temperatura favorece o movimento das moléculas que constituem o material, diminuindo as ligações secundárias entre elas e, por consequência, isso facilita o movimento relativo entre as cadeias moleculares quando são aplicadas tensões no material (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

A norma ASTM D883 subdivide os plásticos em três tipos: rígidos, semirrígidos e não rígidos. Segundo a mesma, o plástico é rígido quando apresenta módulo de elasticidade maior que 700 MPa ao ser ensaiado a 23°C. O plástico é semirrígido quando apresenta módulo de elasticidade entre 70 e 700 MPa, e é não rígido quando apresenta módulo de elasticidade abaixo de 70 MPa, ambos seguindo as mesmas condições de ensaio descritas para os plásticos rígidos (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

Outra característica, esta não apenas dos plásticos, mas sim de todos os polímeros, é que estes materiais podem apresentar uma organização cristalina na sua microestrutura (cristalinidade). Porém, diferente dos metais e cerâmicos, para os polímeros a cristalinidade é definida como a organização ordenada das cadeias moleculares (CALLISTER;

RETHWISCH, 2009, p. 552). O grau de cristalinidade depende da taxa de resfriamento aplicada ao material durante sua solidificação. Quando o material está na forma líquida, as cadeias estão organizadas de forma aleatória. Para que haja uma estrutura cristalina, o fluido deve ser resfriado lentamente, dando tempo para que as cadeias poliméricas se alinhem. Além disso, o grau de cristalinidade tem influência sobre as propriedades físicas e mecânicas dos polímeros. Geralmente os polímeros cristalinos têm maior resistência mecânica, à dissolução e ao calor (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

3.1.1 Resposta mecânica dos plásticos

Dentre os polímeros termoplásticos é possível encontrar três tipos de comportamento para a curva tensão-deformação: frágil, plástico e elastomérico. Os fatores que favorecem a fragilidade dos plásticos são redução de temperatura, aumento de taxa de deformação, concentradores de tensão, elevada espessura do corpo de prova e modificações na estrutura do plástico que aumentam a temperatura de transição vítrea (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

A Figura 3.1 mostra os três comportamentos possíveis. A curva *A* mostra a curva típica de um polímero frágil, apresentando quase nenhuma ou nenhuma plasticidade. A curva *B* representa a resposta mecânica à tensão de um polímero tipicamente plástico, com regiões elástica e plástica definidas. A curva *C* mostra como se comportam polímeros completamente elásticos, denominados elastômeros.

Vale ressaltar que curvas intermediárias às curvas *A*, *B* e *C* também são encontrados como respostas de polímeros.

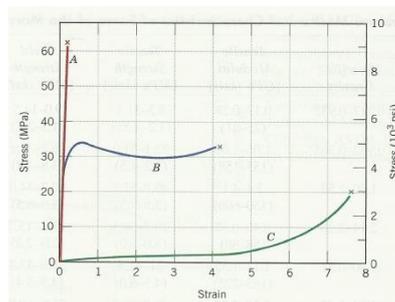


Figura 3.1 - Comportamento tensão-deformação dos polímeros (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

3.1.2 PLA (Poliácido Láctico)

Segundo Chen (2003 apud JAHNO, 2005), o Poliácido Láctico (PLA) é um material polimérico de grande interesse, pois é biodegradável e biocompatível. O PLA demora algo entre 6 meses e 2 anos para se degradar no ambiente (SINCLAIR, 1996). Outra característica

é que o PLA demonstra resistência mecânica, plasticidade térmica e fabricabilidade satisfatórias (PROIKAKIS, 2002). Além disso, o corpo humano consegue quebrar as cadeias do PLA em compostos reabsorvíveis pelo metabolismo (PROIKAKIS, 2002). A temperatura de transição vítrea (T_g) do PLA fica na faixa entre 50 e 80°C. Já a temperatura de fusão (T_m) fica na faixa entre 130 e 180°C. Essas propriedades do PLA permitem que ele seja processado por injeção, extrusão, sopro ou termoformagem (AURAS, et al, 2003). O PLA é encontrado desde amorfo com temperatura de transição vítrea de 60°C até cristalino com temperatura de fusão entre 130 e 180°C (LUNT, 1998).

3.1.3 Processos de Fabricação

Segundo Callister (2012), o processo de fabricação mais comum para os plásticos é a moldagem, podendo ser por compressão, transferência, sopro, injeção e extrusão. Em todos esses processos o plástico tem sua temperatura elevada a fim de permitir sua fluidez e, ao preencher a forma desejada, é resfriado, recuperando sua rigidez. Dentre estes processos, os que mais se assemelham com FDM são a extrusão e a injeção. No processo de extrusão ocorre a compactação do material, o qual é fundido e forçado a passar por uma matriz com extremidade aberta. Este processo pode ser contínuo e o material é transportado por uma rosca sem fim. Há a possibilidade de utilizar sopradores de ar para acelerar a solidificação do material após sua moldagem (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). A impressão 3D por FDM é um processo muito semelhante, pois também aquece um plástico até sua fusão e depois força o material liquefeito a passar por um bocal. Bumgarner¹ (2013, apud Stephens et al., 2013) descreve o processo de impressão 3D como um bocal extrusor controlado por computador que liquefaz um filamento plástico e o deposita sobre uma mesa móvel. Esse processo segue, camada por camada, até que um sólido é formado, como ilustrado pela Figura 3.2.



Figura 3.2 – Deposição de material fundido sobre as camadas inferiores já sólidas. Fonte: Boa Impressão 3D²

Alguns dos parâmetros de impressão são a temperatura do bocal, a altura de camada, o preenchimento, o número de paredes, a temperatura da mesa, a velocidade de impressão, o

¹Bumgarner, B., 2013. Getting started with a 3D printer. Make, 12–16.

²Disponível em: <<https://boaimpressao3d.com.br/aplicacoes/como-funciona-impressora-3d-fdm/>> Acesso em junho de 2019.

uso de ventilador e o uso de suportes (ULTIMAKER, 2019). A temperatura do bocal influencia a fluidez do plástico no momento da extrusão. A altura de camada determina a qualidade da impressão, como demonstrado pela Figura 3.3 abaixo. Quanto menor a altura de camada, menos perceptíveis elas serão e melhor elas reproduzem o modelo, porém, mais demorada é a impressão (GUO, 2019).

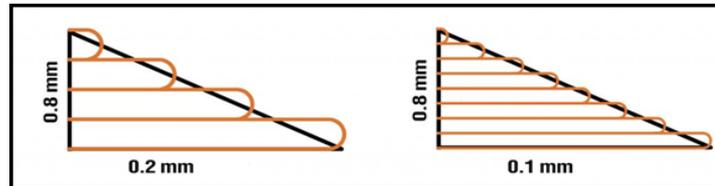


Figura 3.3 – Influência da altura de camada sobre a capacidade de reproduzir a geometria. Fonte: 3DLAB³.

O preenchimento é definido pelo tipo e pela densidade de preenchimento. O tipo de preenchimento pode ser linear, triangular, cúbico, favo-de-mel, entre outros. Este basicamente define a estrutura do preenchimento interno do sólido. A densidade de preenchimento define quanto preenchido é o interior do sólido. Se for 0%, o sólido é oco (será constituído apenas por uma casca). Se for 100%, o sólido é maciço. O número de paredes define a espessura da casca que forma o sólido. Um número de paredes igual a 1 significa que a casca terá a espessura de um passe de filamento. Se for 2, a casca terá a espessura de dois passes de filamento, e assim por diante (ULTIMAKER, 2019). A Figura 3.4 abaixo mostra diferentes níveis de preenchimento. Para 0%, o sólido é composto apenas por paredes.

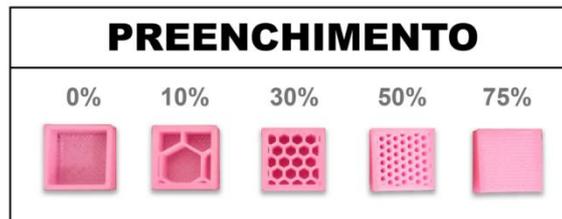


Figura 3.4 – Demonstração da densidade de preenchimento. Fonte: 3DLAB⁴.

A temperatura da mesa influencia a aderência do material à mesa (ULTIMAKER, 2019)⁵. A falta de aderência é prejudicial ao resultado final da impressão, sendo necessário escolher a temperatura correta da mesa. Esse cuidado evita o desprendimento do sólido durante a impressão. A velocidade de impressão determina a velocidade de translação do bocal, influenciando diretamente o tempo de impressão do sólido (GUO, 2019). O uso de ventiladores é comum para sólidos que apresentam camadas parcialmente suportadas pelas camadas inferiores (*overhang*) (ULTIMAKER, 2019). Nestes casos há deposição de matéria

³Disponível em: <<https://3dlab.com.br/impressao-3d-o-que-e/>> Acesso em junho de 2019.

⁴Disponível em: <<https://3dlab.com.br/impressao-3d-o-que-e/>> Acesso em junho de 2019.

⁵Disponível em: <<https://ultimaker.com/en/resources/158-print-not-sticking-to-build-plate>> Acesso em junho de 2019

“no ar”. Se o *overhang* for muito grande, é possível que o material derretido fique sem suporte suficiente das camadas inferiores, causando sua queda. O ventilador ajuda a solidificar o material mais rapidamente, aumentando o *overhang* permitido. Os suportes são estruturas adjacentes ao sólido feitas para dar suporte a regiões onde o *overhang* é muito elevado. A Figura 3.5 ilustra o ângulo de *overhang*.

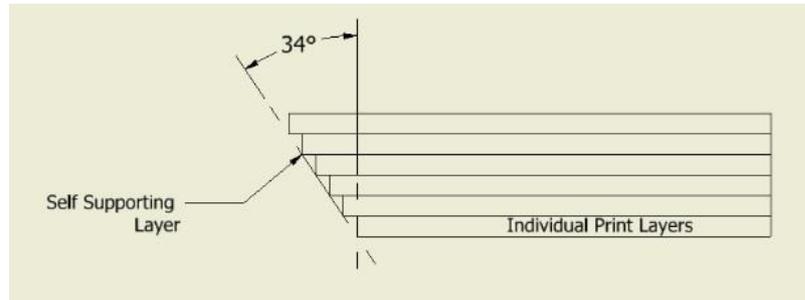


Figura 3.5 – Ilustração do ângulo de *overhang*. Fonte: AES⁶.

3.2 Ensaios Mecânicos

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas principalmente pelo módulo de elasticidade, pela tensão de escoamento e pela resistência à tração. Estas propriedades podem ser sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química do ambiente (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). Os cálculos para obter as propriedades mecânicas por ensaio de tração especificados na norma ASTM D638 utilizam as hipóteses de que o corpo de prova será submetido a um esforço normal, provocando um estado uniaxial de tensões, gerando uma distribuição uniforme de tensões na região de seção reduzida do CP, que pode ser aproximada pela tensão média. A norma ASTM D638 indica formatos de corpos de prova que favorecem essas hipóteses. Para cada série de testes, deve-se reportar a média aritmética dos valores obtidos, junto do desvio padrão, sendo essas duas informações necessárias para descrever uma propriedade desejada obtida pelos ensaios. Além disso, é recomendado que sejam ensaiados pelo menos 5 corpos de prova para cada série de teste. Caso o material seja anisotrópico, esse valor é ampliado para 5 corpos de prova na direção do eixo principal de anisotropia e 5 na direção transversal ao eixo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

4 Metodologia

Para este trabalho, os corpos de prova foram fabricados com uma impressora 3D modelo Creality CR-10 S300 com bocal de 0,4 mm, utilizando o filamento de PLA branco da

⁶Disponível em: <<https://www.additiveeng.com/self-supporting-angles-in-large-scale-additive-manufacturing/>> Acesso em junho de 2019.

marca 3D Prime com precisão dimensional de $\pm 0,02$ mm em seu diâmetro. O código de impressão foi gerado importando o modelo em CAD para o software Ultimaker Cura. Os parâmetros de impressão comuns a todos CPs são duas camadas de parede (isso foi definido para garantir que as superfícies laterais do CP não apresentassem aspecto serrilhado), altura de camada de 0,2 mm, preenchimento de 100%, temperatura da mesa de 60°C e placa de adesão do tipo *Brim* com 4 linhas. Além disso, para evitar problemas de falta de preenchimento do corpo de prova, a taxa de deposição de material foi elevada para 110%.

Através de ensaios mecânicos preliminares definiu-se a rigidez do plástico, onde foi possível classificá-lo como plástico rígido (ASTM D883, 2017). A geometria recomendada neste caso é do tipo I e velocidade de deslocamento da garra de 5 mm/min (ASTM D638, 2014). Devido ao tempo de fabricação e custos envolvidos, as dimensões dos corpos de prova foram reduzidas por um fator de escala de 0,6, mantendo as proporções. As regiões de agarre e de seção reduzida do CP foram alongadas, para permitir melhor agarre e posicionamento de um *clip gauge*.

Os parâmetros escolhidos neste estudo foram a velocidade de impressão e o uso ou não de ventilação. Esta escolha foi feita porque o aumento da velocidade de impressão pode tornar o processo mais competitivo e, portanto, é importante entender se o aumento deste parâmetro traz algum prejuízo às propriedades mecânicas do material. Já o uso de ventilação forçada influencia na taxa de resfriamento do material, o que causa mudanças na sua microestrutura e modifica suas propriedades mecânicas. Além disso, foram definidos dois casos de estudo, como mostrado na Figura 4.1. O Caso 1 é o estudo da influência destes parâmetros sobre as propriedades mecânicas do material, e o Caso 2 é o estudo das influências sobre as dimensões dos componentes.

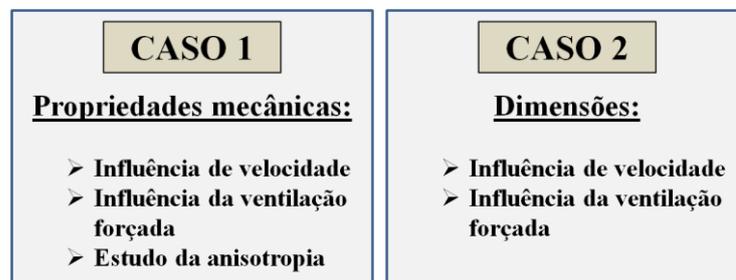


Figura 4.1 – Casos de estudo.

Assim, foram feitos cinco corpos de prova com preenchimento orientado a 0° e outros cinco CPs a 90° para cada conjunto de parâmetros, respeitando o que é recomendado pela norma ASTM D638. Isso resultou em um total de trinta e dois corpos de prova. Os conjuntos de parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 4.1 abaixo por seis grupos diferentes.

Tabela 4.1 – Grupos de CPs e seus parâmetros de impressão.

Grupo	Nome	Velocidade [mm/s]	Orientação	Ventilação	Nº de CPs
1	20SVL	20	0° (1)	Não (0)	5
2	40SVL	40	0° (1)	Não (0)	5
3	40CVL	40	0° (1)	Sim (1)	6
4	20SVT	20	90° (2)	Não (0)	5
5	40SVT	40	90° (2)	Não (0)	5
6	40CVT	40	90° (2)	Sim (1)	6

Os nomes dos CPs seguem o código “AA.BB.C.D”, onde “AA” é a velocidade de impressão, “BB” é SV (sem ventilação) ou CV (com ventilação), “C” é a orientação de impressão e “D” é o um número para identificação individual dos CPs.

O procedimento de impressão seguiu as seguintes operações: limpeza da mesa, aquecimento da mesa, nivelamento da mesa, aquecimento do bocal, início e fim das impressões, resfriamento da mesa até 30°C, retirada dos CPs e gravação do código de identificação de cada CP. Esta sequência é mostrada pela Figura 4.2. Os corpos de prova foram impressos em lotes de 4, porém sua fabricação foi sequencial. Ou seja, o *setup* foi feito para produzir 4 CPs em sequência sem parada da máquina. Isso foi feito para economizar tempo, pois o tempo de setup e o tempo de resfriamento são aproximadamente iguais para cada lote de impressão, independente de quantos corpos de prova são fabricados.

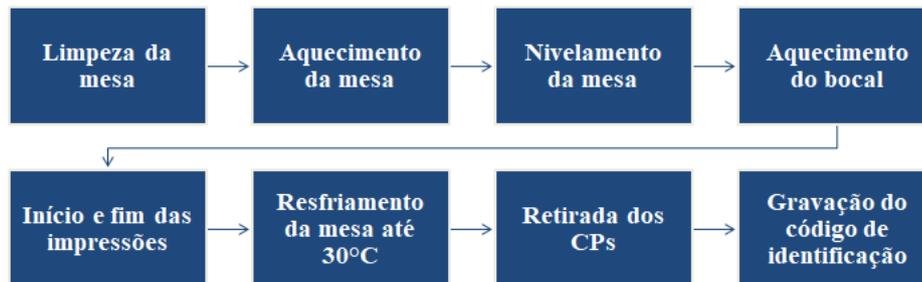


Figura 4.2 – Diagrama do procedimento de impressão.

Com o intuito de avaliar a geometria final, uma análise dimensional dos corpos de prova foi realizada fazendo as medições da largura e da espessura da região útil (seção estreita) dos CPs no centro e nas extremidades, além das medições do comprimento do CP nas duas extremidades. A espessura e a largura foram medidas com um micrômetro, enquanto o comprimento foi medido com paquímetro. Para o cálculo de tensões, a área inicial é calculada considerando a largura e espessura média do CP. Para a análise dimensional, é feita a média e o desvio padrão das medidas médias dos CPs para cada grupo de parâmetros de impressão.

Os ensaios de tração dos 32 corpos de prova foram realizados respeitando as recomendações da norma ASTM D638. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios da EMIC com célula de carga de 1 KN e um *clip gauge* de 50 mm. Com as curvas obtidas para cada CP, foram calculados o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento do PLA para os diferentes parâmetros de impressão. O módulo de elasticidade foi calculado como a inclinação da curva tensão-deformação na região linear da curva, de acordo com a norma ASTM D638. A tensão de escoamento foi calculada criando uma reta paralela à região linear da curva tensão-deformação, porém deslocada 0,1% no eixo da deformação. Esta tensão foi definida como a tensão correspondente ao ponto de intersecção da curva tensão-deformação com a reta deslocada 0,1%. Este método é encontrado na norma ASTM D638. A tensão de ruptura não foi calculada porque a grande maioria dos CPs não rompeu na região útil durante o ensaio.

Com os resultados das propriedades mecânicas do material e das dimensões dos CPS, foi feita uma análise estatística, para, assim, poder concluir se de fato há alguma diferença entre os diversos resultados obtidos. Esta análise foi feita com o software SPSS disponibilizado pela UFRGS, com uma confiabilidade de 95%. Foi feito o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade das amostras e o teste T para as análises estatísticas.

5 Resultados e Discussão

Os resultados foram divididos entre as influências de cada parâmetro de impressão sobre as propriedades mecânicas (Caso 1) e sobre a acurácia dimensional dos CPs frente ao sólido modelado em CAD (Caso 2), onde se deu ênfase apenas às observações mais significantes. As curvas de tensão e deformação são apresentadas na Figura 5.1 e no Apêndice A.

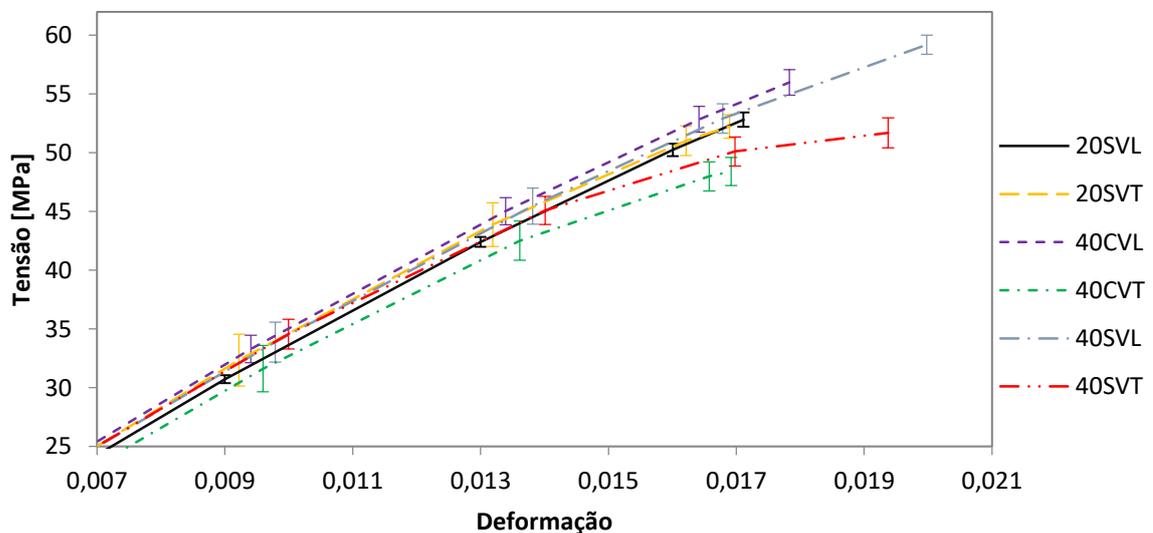


Figura 5.1 – Visão geral das curvas tensão-deformação.

5.1 Caso 1 - Análise das Propriedades Mecânicas

A Figura 5.2 a seguir mostra uma visão geral dos resultados obtidos.

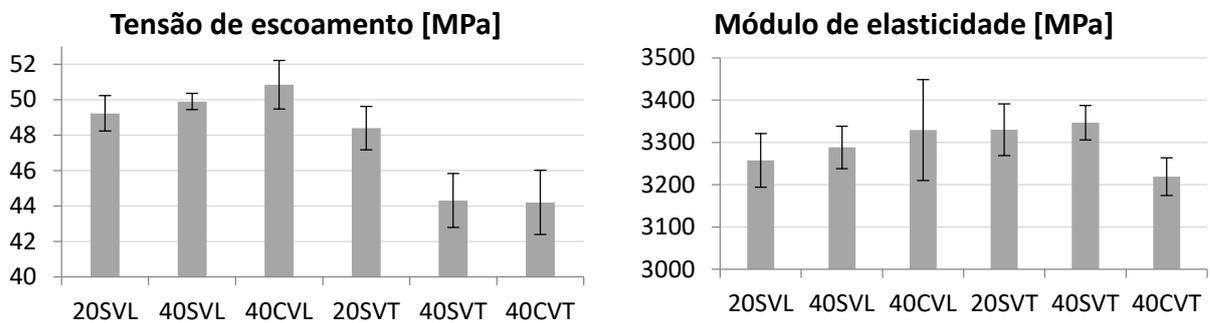


Figura 5.2 – Visão geral dos resultados de propriedades mecânicas.

Isolando os efeitos da velocidade de impressão é possível concluir estatisticamente que a mesma possui influência sobre a resistência de escoamento no sentido transversal do material (Teste T com $p = 0,002$). A redução da velocidade de impressão promoveu o aumento da tensão de escoamento transversal. Em relação às demais propriedades, não é possível afirmar que a velocidade influenciou os resultados. A Figura 5.3 mostra a influência da velocidade sobre a tensão de escoamento.

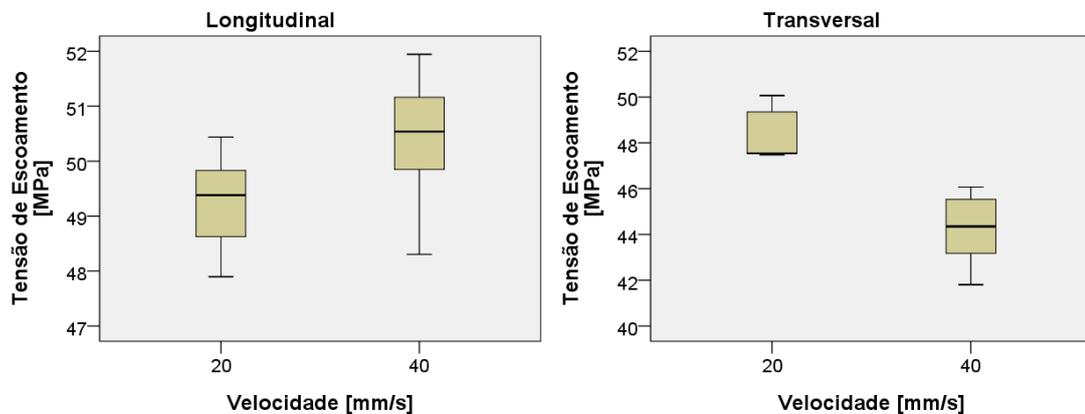


Figura 5.3 – Análise estatística da influência da velocidade na tensão de escoamento.

Um resultado interessante é trazido pela Figura 5.4. Ao comparar estatisticamente as propriedades dos grupos 20SVL e 20SVT, a orientação das linhas de impressão não influenciou as propriedades mecânicas estudadas (Teste T com $p = 0,269$). Ou seja, estes parâmetros de impressão proporcionaram um corpo de prova com comportamento sem anisotropia significativa, considerando confiabilidade de 95% para a análise estatística. Esta característica pode ser importante em diversas aplicações. Este resultado mostra que, mesmo que a impressão 3D por FDM construa componentes depositando linhas alinhadas de filamento, é possível dar ao material uma característica isotrópica ao fazer o setup de impressão com os parâmetros adequados. Pode ser que esta característica foi obtida devido à

combinação do acréscimo de 10% de deposição de material e a baixa velocidade de impressão. Uma maior taxa de deposição de material melhora o preenchimento do CP e a redução de velocidade aumenta o tempo que este termoplástico liquefeito fica sob pressão ajudando-o a ligar-se ao material solidificado. Para verificar se esta observação é verdadeira seria necessário fazer análises adicionais.

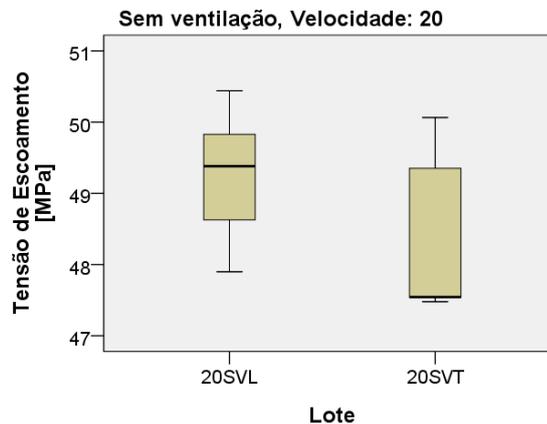


Figura 5.4 – Comparação estatística entre a tensão de escoamento longitudinal e transversal dos CPs impressos com 20 mm/s de velocidade e sem ventilação.

A utilização ou não de ventilação mostrou pouca influência sobre a tensão de escoamento. Já sobre o módulo de elasticidade, a utilização de ventilação provocou sua redução na direção transversal (Teste T com $p = 0,001$), mas não mostrou influência sobre seu valor no sentido longitudinal, conforme a Figura 5.5.

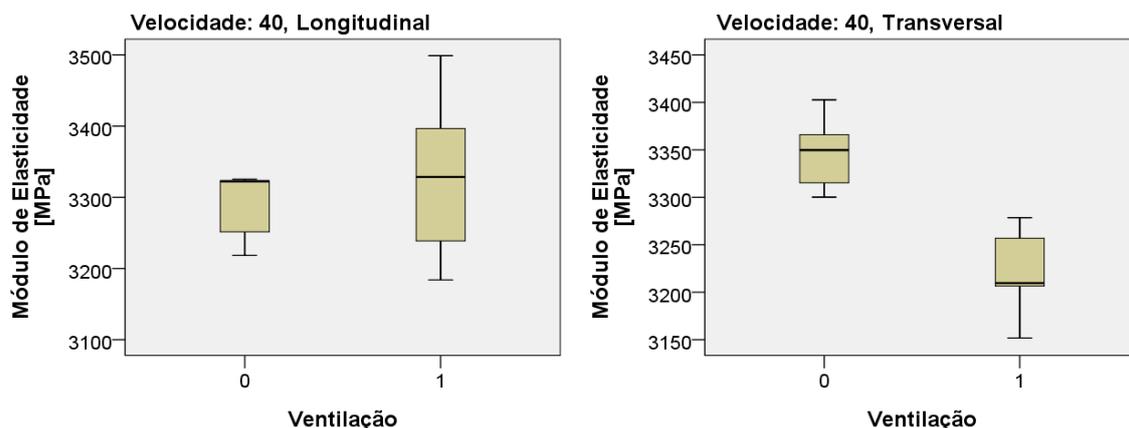


Figura 5.5 – Análise estatística da influência da ventilação no módulo de elasticidade. O valor 0 corresponde a sem ventilação e 1 a com ventilação.

5.2 Caso 2 - Análise Dimensional

A Figura 5.6 apresenta os resultados obtidos com a análise dimensional dos corpos de prova. As barras dos gráficos tem seu zero nas dimensões do modelo em CAD para facilitar a compreensão. O primeiro resultado que chama atenção é que tanto a largura quanto o comprimento médio dos CPs ficou acima do especificado no modelo computacional. Isso

pode ser um resultado causado pelo aumento em 10% da extrusão de material pelo bocal em relação ao padrão.

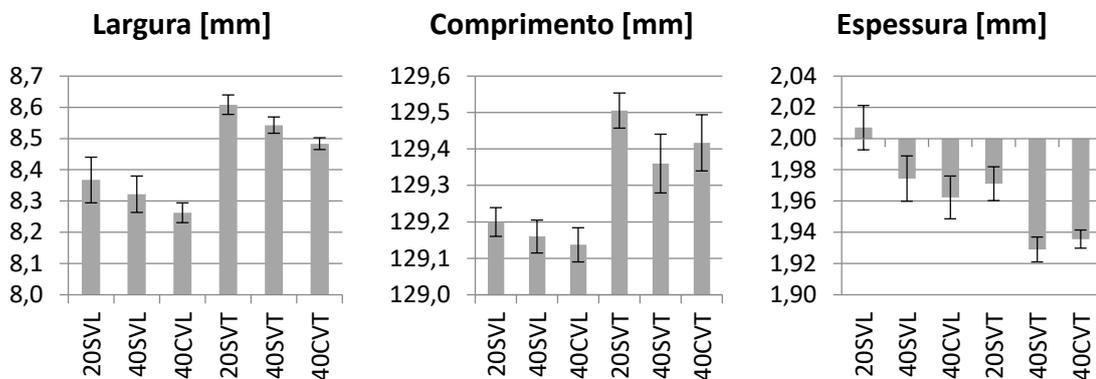


Figura 5.6 – Visão geral dos resultados da análise dimensional.

O fator que apresentou maior influência sobre a acurácia dimensional dos componentes foi a orientação do filamento (Teste T com $p = 0,000$). Os corpos de prova com orientação longitudinal se mostraram mais próximos das dimensões do modelo em CAD. Isso dá indícios de que o tipo de preenchimento e sua orientação podem afetar a capacidade da máquina de reproduzir corretamente a geometria do modelo. A Figura 5.7 abaixo mostra a análise estatística da largura, espessura e do comprimento para os corpos de prova separando-os em longitudinais e transversais. As linhas horizontais representam a dimensão especificada para o modelo em CAD.

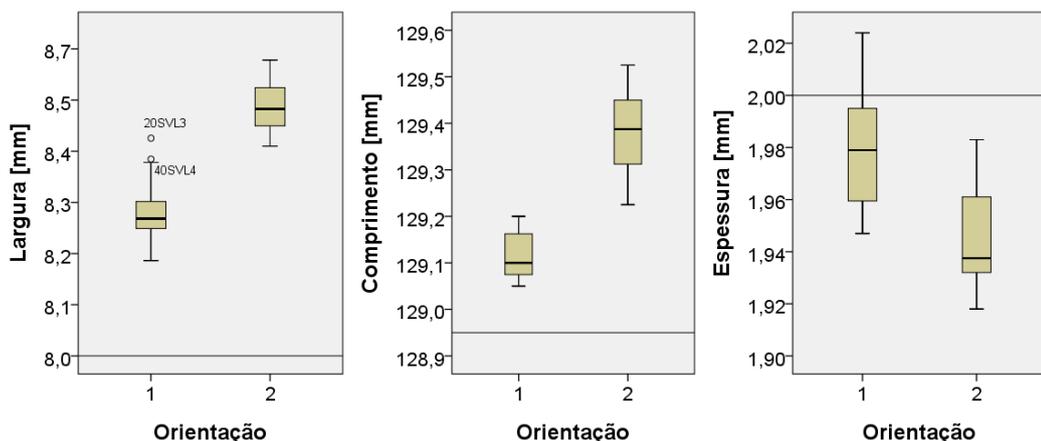


Figura 5.7 – Análise estatística da influência da orientação do preenchimento sobre as dimensões do CP.

Outra observação foi que a velocidade afetou as dimensões dos corpos de prova quando impressos no sentido transversal (Teste T com $p = 0,008$). Para a largura e o comprimento, maior velocidade mostrou aproximar as dimensões dos CPs frente ao especificado em CAD. Agora sobre a espessura, o aumento de velocidade provocou um

afastamento da dimensão especificada em CAD. Estes efeitos estão representados pela Figura 5.8.

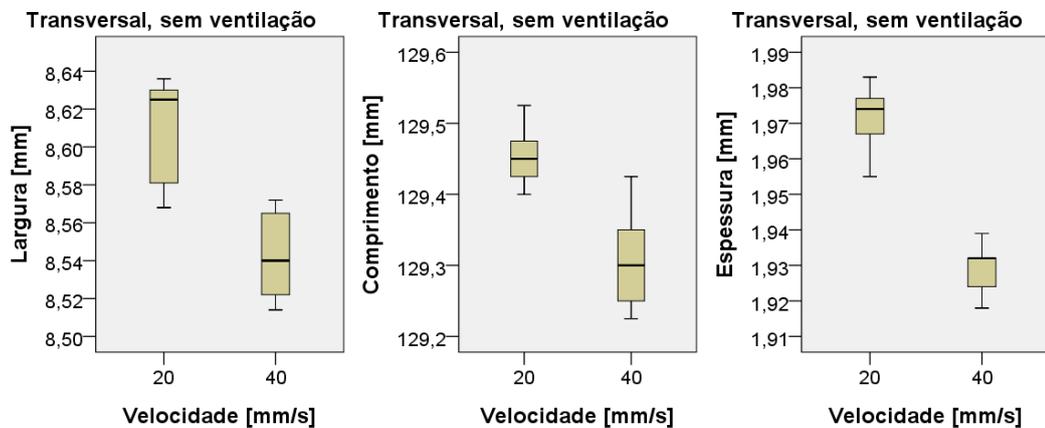


Figura 5.8 – Análise estatística da influência da velocidade sobre as dimensões dos CPs impressos transversais.

Porém, estatisticamente não é possível afirmar que a velocidade apresentou influência sobre as dimensões dos corpos de prova impressos com orientação longitudinal. A utilização de ventilação também não apresentou influência sobre as dimensões. Apesar disso, os CPs com ventilação e com 40 mm/s apresentaram largura e comprimento mais próximos das dimensões especificadas em CAD do que os CPs sem ventilação e com 20 mm/s (Teste T com $p = 0,042$). Novamente, para este caso houve o efeito inverso sobre a espessura, como demonstrado pela Figura 5.9.

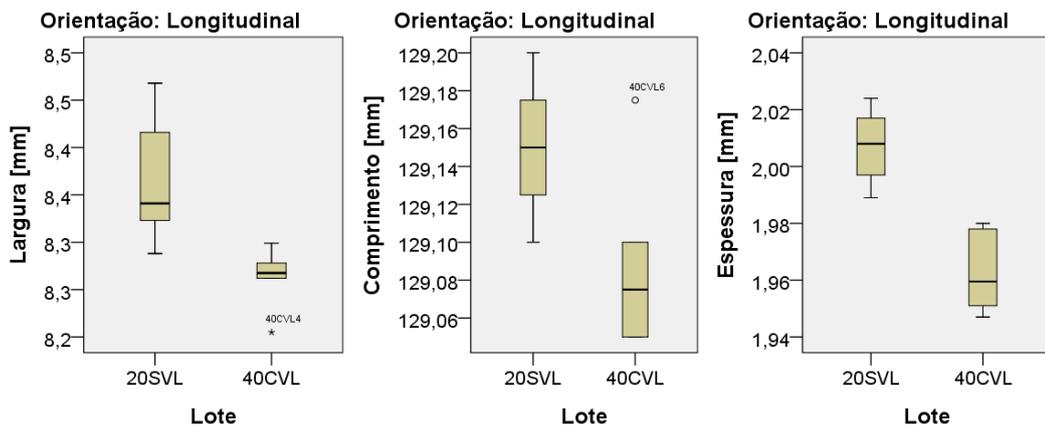


Figura 5.9 – Análise comparativa entre os grupos 20SVL e 40CVL.

6 Conclusões

A velocidade de impressão demonstrou ter pouca influência sobre as propriedades mecânicas no sentido longitudinal do material. Porém, foi concluído que a redução da velocidade de impressão promove o aumento da tensão de escoamento do material no sentido transversal (Teste T com $p = 0,002$). Além disso, foi constatado que há uma combinação de

parâmetros de impressão que não necessariamente promove a típica característica de anisotropia do material impresso 3D por FDM (Teste T com $p = 0,269$).

A ventilação apresentou influência apenas sobre o módulo de elasticidade transversal do material (Teste T com $p = 0,001$). As demais propriedades mecânicas não se mostraram estatisticamente sensíveis à ventilação.

Através dos resultados, pode-se afirmar que a velocidade de impressão e a ventilação não são capazes de afetar a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade no sentido longitudinal das linhas de deposição do material. Porém, elas afetam essas propriedades no sentido transversal, o que influencia o grau de anisotropia do material.

Em relação à análise dimensional, a velocidade de impressão mostrou influência apenas sobre os corpos de prova impressos com linhas transversais (Teste T com $p = 0,008$). Ela agiu no sentido de aproximar a largura e o comprimento das medidas do modelo, porém afastou a espessura da referência.

A ventilação não modificou as dimensões dos CPs em nenhum sentido, porém a combinação impressa com velocidade de 40 mm/s e com ventilação chegou em resultados mais próximos do modelo quando comparadas com as dimensões dos CPs impressos com velocidade de 20 mm/s e sem ventilação (Teste T com $p = 0,042$). Porém, deve-se notar que a quantidade de material depositado para promover um melhor preenchimento do material pode ter afetado negativamente a acurácia dimensional dos corpos de prova de maneira sistemática (tendência), pois ao depositar mais material, é natural que o volume ocupado seja maior.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-14**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D883-17**: Standard terminology relating to plastics. West Conshohocken, 2017.

ASKELAND, D. R. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. ISBN 978-85-221-1285-2.

AURAS, R.A.; HARTE, B.; SELKE, S.; HERNANDEZ, R. Mechanical, Physical, and Barrier Properties of Poly(lactic acid) Films. **Journal of Plastic Film and Sheeting**, East Lansing, v. 19, p. 123-135, apr. 2003.

CABREIRA, V. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico**. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 817 p. il. ISBN 978-85-216-2124-9.

CALLISTER JR., W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 8th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-470-41997-7.

FIELD, A. **Descobrimdo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009

GUO, C.; ZHANG, M.; BHANDARI, B. Model Building and Slicing in Food 3D Printing Processes: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Hoboken, Early View, May 2019.

JAHNO, V. D. **Síntese e caracterização do poli (L-ácido láctico) para uso como biomaterial**. 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LUNT, J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. **Polymer Degradation and Stability**, Wayzata, v. 59, p. 145-152, jul. 1997.

PROIKAKIS, C.S.; TARANTILI, P.A.; ANDREOPOULOS, A.G. Synthesis and Characterization of Low Molecular Weight Polylactic Acid. **Journal of Elastomers and Plastics**, Athens, v. 34, p. 49-63, jan. 2002.

SINCLAIR, E. G. The Case for Polylactic Acid as a Commodity Packaging Plastic. **Journal of Macromolecular Science**, Columbus, v. 43, p. 585-597, sep. 2006.

STEPHENS, B. et al. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. **Atmospheric Environment**, Chicago, v. 79, p. 334-339, nov. 2013.

ULTIMAKER. **Welcome to Ultimaker Cura**. Disponível em: <<https://ultimaker.com/en/resources/52887-welcome-to-ultimaker-cura>>. Acesso em: 15 Jun. 2019.

WANG, H.; SUN, X.; SEIB, P. Strengthening blends of poly(lactic acid) and starch with methylenediphenyl diisocyanate. **Journal of Applied Polymer Science**, Manhattan, v. 82, p. 1761-1767, feb. 2001.

Apêndice A – Curvas Tensão-Deformação Completas.

