



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

WAGNER RODOLFO FERREIRA LOPES

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA FABRICAÇÃO DE ESPONJAS ROTULADORAS
ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA**

Recife

2023

WAGNER RODOLFO FERREIRA LOPES

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA FABRICAÇÃO DE ESPONJAS ROTULADORAS
ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA**

Projeto de Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado como exigência de
conclusão da disciplina ME-451.

Prof. Responsável: Marcus Costa de
Araujo

Orientador (a): Prof^a. Dra. Carolina Lipparelli Morelli

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lopes, Wagner Rodolfo Ferreira.

Estudo de viabilidade da fabricação de esponjas rotuladoras através da
manufatura aditiva / Wagner Rodolfo Ferreira Lopes. - Recife, 2023.
47p. : il., tab.

Orientador(a): Carolina Lipparelli Morelli

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2023.

1. Impressão 3D. 2. Poliuretano. 3. Manufatura aditiva. 4. Rotuladora. I.
Morelli, Carolina Lipparelli . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

WAGNER RODOLFO FERREIRA LOPES

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA FABRICAÇÃO DE ESPONJAS ROTULADORAS
ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em: 22/09/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Carolina Lipparelli Morelli (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Justo Emílio Alvarez Jacobo
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dra Janaina Moreira de Meneses
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Tamires por sempre me apoiar, incentivar e me fazer acreditar ainda mais no meu trabalho.

Agradeço a minha orientadora Carolina Morelli por todo o incentivo e ensinamentos que me foram dados.

Agradeço ao professor Justo Emílio por ter intermediado meu primeiro contato com a impressão 3D e que trouxe muitos frutos na minha carreira profissional.

Agradeço a minha gestora e amiga Fabiana Souto por ter investido no meu desenvolvimento profissional e por ser um referencial de resiliência para mim.

RESUMO

Em meados da década de 80, o desenvolvimento da manufatura aditiva permitiu a fabricação de peças de uma forma jamais vista. Desde então, essa nova forma de fabricar, que ficou popularmente conhecida como impressão 3D, tem se tornado ainda mais inovadora e cada vez mais acessível. Hoje já é possível fabricar uma infinidade de peças com os mais diferentes materiais e até mesmo objetos de grande porte, como casas e barcos. A grande flexibilidade da manufatura aditiva tem chamado a atenção dos mais variados setores da indústria, para utilização dessa tecnologia na fabricação interna das peças de reposição do seu processo produtivo. O presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da fabricação interna de esponjas rotuladoras em uma indústria de bebidas através da manufatura aditiva do tipo FDM. A utilização de materiais flexíveis compostos por poliuretano e o desenvolvimento de uma nova geometria para esponja possibilitou a substituição da esponja original uma fabricada pela impressora 3D. A análise de custos de fabricação e de durabilidade também mostraram que a substituição é viável e que a utilização dessas esponjas tem grande potencial na redução de custos de manutenção e aumento de disponibilidade das máquinas rotuladoras.

Palavras-chave: Impressão 3D; poliuretano; manufatura aditiva; rotuladora.

ABSTRACT

In the mid-1980s, the development of additive manufacturing allowed parts to be manufactured in a way never seen before. Since then, this new way of manufacturing, popularly known as 3D printing, has become even more innovative and increasingly accessible. Today it is already possible to manufacture an infinity of pieces with the most different materials and even large objects, such as houses and boats. The great flexibility of additive manufacturing has drawn the attention of the most varied sectors of industry to use this technology in the in-house manufacture of spare parts for their production process. The present work aims to analyze the viability of the internal manufacture of labeling sponges in a beverage industry through additive manufacturing of the FDM type. The use of flexible materials composed of polyurethane and the development of a new sponge geometry made it possible to replace the original sponge one manufactured by the 3D printer. The analysis of manufacturing costs and durability also showed that replacement is feasible and that the use of these sponges has great potential in reducing maintenance costs and increasing the availability of labeling machines.

Keywords: 3D printing; polyurethane; additive manufacturing; labeler.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Manufatura Subtrativa	16
Figura 2 –	Manufatura Conformativa	16
Figura 3 –	Manufatura Conformativa - Estampagem	17
Figura 4 –	Manufatura aditiva (FDM)	17
Figura 5 –	Processo de Fabricação (FDM)	18
Figura 6 –	Extrusora	19
Figura 7 –	<i>Hotend</i> e Trajeto de aquecimento do filamento	19
Figura 8 –	Diferentes alturas de camada – 0,8mm à 0,1mm	20
Figura 9 –	Resolução de impressão.	21
Figura 10 –	Diferentes ângulos de <i>raster</i>	21
Figura 11 –	Corpos de prova com diferentes ângulos de <i>raster</i>	22
Figura 12 –	Relação entre temperatura de bico e limite de escoamento para o PEI	24
Figura 13 –	Vista em seção da camada de impressão	25
Figura 14 –	Diferentes porcentagens de preenchimento	25
Figura 15 –	Reação de síntese do poliuretano	27
Figura 16 –	Rotuladora <i>Krones</i>	28
Figura 17 –	Rótulos de <i>front</i> e <i>neck</i>	29
Figura 18 –	Cilindro de pinças	29
Figura 19 –	Recebimento de rótulos	30
Figura 20 –	Entrega de rótulos	30
Figura 21 –	Esponja desgastada	31
Figura 22 –	Fluxo de Atividades	32
Figura 23 –	Filamento para impressão 3D	35
Figura 24 –	Esponja de <i>front</i> original	35
Figura 25 –	Desenho técnico esponja <i>front</i>	36
Figura 26 –	Conversão para formato .STL	37
Figura 27 –	Representação da camada	38
Figura 28 –	Impressora <i>Ender 3</i>	39
Figura 29 –	Cilindro de pinças com esponjas instaladas	39
Figura 30 –	Geometria 3D da esponja	41

Figura 31 –	Esponja <i>neck</i> impressa	42
Figura 32 –	Inspeção da esponja de <i>neck</i>	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos de temperatura de impressão	23
Tabela 2 – Matriz de criticidade	33
Tabela 3 – Parâmetros de Impressão	38
Tabela 4 – Quadro comparativo esponja original <i>versus</i> 3D	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ASA	Acrilonitrilo Estireno Acrilato
C°	Celsius
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelagem por deposição fundida)
FFF	Fabricação por filamento fundido
MPa	Mega pascal
mm	Milímetros
PEEK	Polieteretercetona
PEI	Polieterimida
PETG	Tereftalato de polietileno glicol
PLA	Poliácido láctico
PU	Poliuretano
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização seletiva a laser
TPU	Poliuretano termoplástico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	Manufatura aditiva	15
3.1.1	Processos de Manufatura	15
3.1.2	Conceitos Básicos da manufatura aditiva	17
3.2	Parâmetros de impressão	20
3.2.1	<i>Layer height</i>	20
3.2.2	<i>Raster angle</i>	21
3.2.3	<i>Nozzle temperature</i>	23
3.2.4	<i>Infill porcentagem</i>	24
3.3	Poliuretano	26
3.4	Rotuladora	28
4	METODOLOGIA	32
4.1	Revisão bibliográfica	32
4.2	Seleção de esponjas	33
4.3	Seleção da matéria-prima	34
4.4	Desenvolvimento da geometria	35
4.5	Fabricação	36
4.6	Testes	39
4.7	Estudo de viabilidade	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1	Geometria final	41
5.2	Custos e tempo de fabricação	42
5.3	Inspeções	42
5.4	Comparativo	43
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Até meados da década de 1980, a confecção de peças e componentes estava restrita a dois tipos básicos de processos de fabricação, a manufatura subtrativa e a conformativa (Herzberger,2019). Dentre os diferentes métodos desses tipos de manufaturas, pode-se citar como os principais a usinagem, injeção plástica, fundição, extrusão. Apesar de serem métodos bem estabelecidos, eles apresentam, até hoje, limitações no que diz respeito a geometria da peça fabricada, tempo de fabricação de protótipos e desperdício de matéria prima. O surgimento e desenvolvimento da manufatura aditiva nos dias atuais vem se apresentando como solução para essas problemáticas e expandindo a forma como a fabricação de peças é vista.

Dentre as principais técnicas de fabricação que definem a manufatura aditiva, o método FDM (*Fused Deposition Modeling*) destacou-se nos últimos anos por ser o mais acessível financeiramente e pela sua simplicidade operacional. Apesar da sua fácil utilização, a técnica FDM ainda vem buscando seu espaço no meio fabril com a fabricação de protótipos para validação de geometrias e de peças com baixo grau de solicitações mecânicas (Elmrabet,2020).

Dentre os materiais disponíveis para fabricação via técnica FDM, o TPU, poliuretano termoplástico, tem ganhado notoriedade como na fabricação de rodas não pneumáticas (Wang,2020), órgãos para simulação de cirurgias, mangotes sanfonados, entre outros produtos. Além disso, dentro do ambiente fabril existe uma variedade de máquinas com seus mais variados componentes, muitas vezes entregues por um único fornecedor a um elevado custo, que poderiam ser substituídos por peças fabricadas via manufatura aditiva.

O presente estudo avalia a viabilidade da fabricação de esponjas rotuladoras, aplicadas em uma linha de produção de uma indústria cervejeira de grade porte. A baixa solicitação mecânica e requisitos de flexibilidade corroboram para que esponjas produzidas por impressão 3D a partir de poliuretano termoplástico sejam uma solução.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral substituir esponjas de máquinas rotuladoras por peças fabricadas em TPU obtidas através da manufatura aditiva, assim como avaliar seu desempenho operacional e viabilidade financeira.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver e selecionar uma geometria 3D que respeite as limitações geométricas da rotuladora e que possibilite a sua fabricação através da manufatura aditiva;
- Selecionar o tipo de TPU, dentre os disponíveis no mercado nacional, que melhor atende as condições operacionais das esponjas;
- Definir e ajustar os parâmetros de impressão com base no material selecionado, condições operacionais e limitações de trabalho da impressora 3D;
- Fabricar via manufatura aditiva, pelo método FDM, peças em TPU que desempenhem as mesmas funções das esponjas transferidoras de rótulos originais;
- Mensurar custos envolvidos no processo de fabricação;
- Testar o desempenho e durabilidade dos componentes fabricados;
- Apresentar a viabilidade final do projeto.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o objetivo de garantir um melhor entendimento sobre as diferentes áreas que envolvem este trabalho, a presente seção foi dividida em 3 subseções, que abordarão conceitos básicos sobre cada uma das áreas.

A primeira subseção abordará conhecimentos sobre os principais tipos de manufatura disponíveis hoje no mercado, se aprofundando mais especificamente nos conhecimentos da manufatura aditiva e apresentando no detalhe a técnica FDM.

A segunda subseção apresentará conceitos básicos sobre polímeros, se aprofundando nos principais tipos de poliuretanos e suas características.

A terceira subseção discorrerá sobre o funcionamento de uma máquina rotuladora de garrafas e direcionará seu foco para a transferência de rótulos. O objetivo dessa seção será descrever as funções e especificações básicas de uma esponja de transferência.

3.1 Manufatura aditiva

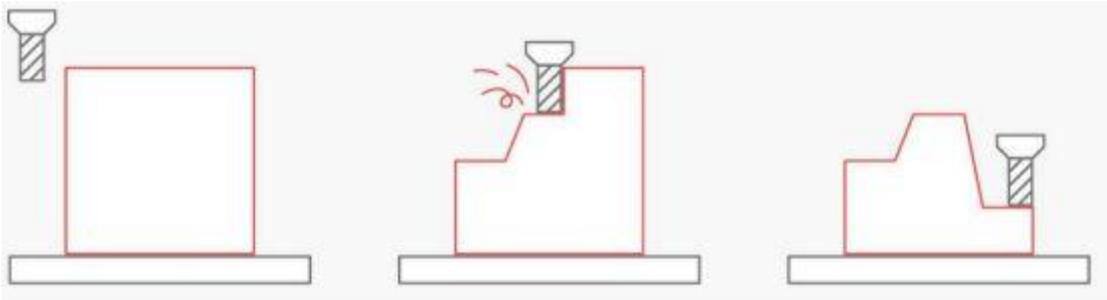
3.1.1 Processos de Manufatura

Os processos de fabricação que se tem conhecimento hoje podem ser categorizados basicamente em 3 grandes grupos:

- Manufatura Subtrativa;
- Manufatura Conformativa;
- Manufatura Aditiva.

A manufatura subtrativa é o processo que tem início na matéria-prima bruta, ou pré-trabalhada, e através da remoção controlada de material atinge a forma final desejada, garantindo dimensão, forma e acabamento (Redwood,2017). Torneamento fresamento, furação e aplainamento são alguns exemplos desse tipo de manufatura.

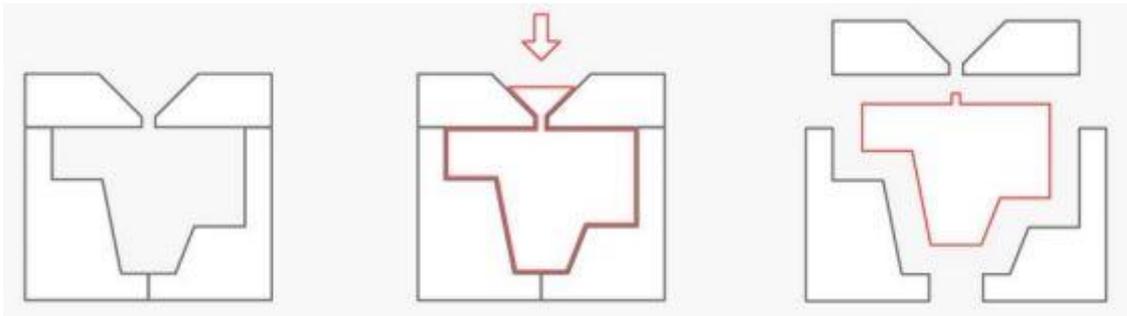
Figura 1– Manufatura Subtrativa



Fonte - (Redwood,2017)

A manufatura conformativa, como o próprio nome já sugere, é o processo em que matéria-prima é conformada até a forma desejada através de aquecimento e pressão (Redwood,2017). A matéria-prima pode ser fundida e injetada em um molde, como ocorre na injeção plástica, ou pode ser amolecida e pressionada contra matrizes, no caso do forjamento.

Figura 2 – Manufatura Conformativa



Fonte - (Redwood,2017)

Na manufatura conformativa, a matéria-prima também pode ser moldada sem a necessidade de um aquecimento prévio, apenas com o uso de pressão, como ocorre na estampagem de chapas. A figura 3 mostra o processo de obtenção de um paralamas a partir de uma chapa metálica.

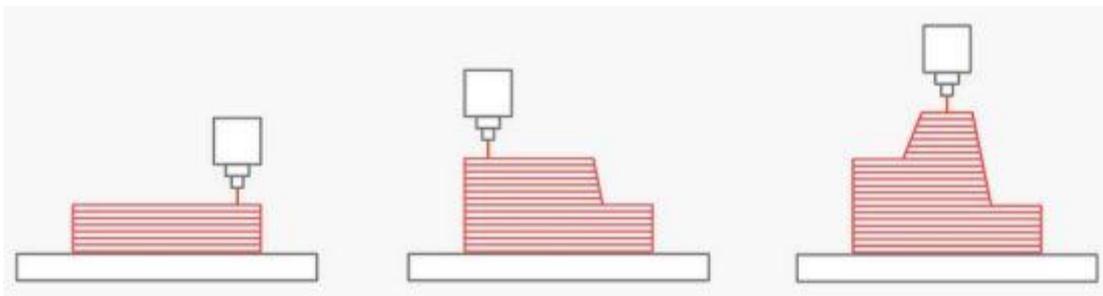
Figura 3 – Manufatura Conformativa - Estampagem



Fonte – (CUNHA,2016)

Por último, a manufatura aditiva resulta na adição controlada de material, camada por camada, até que a forma final seja obtida. Dentre a gama de técnicas da manufatura aditiva existentes pode-se citar a Estereolitografia (SLA), Sinterização seletiva a laser (SLS) e Modelagem por Deposição Fundida (FDM).

Figura 4 - Manufatura aditiva (FDM)



Fonte - (Redwood,2017)

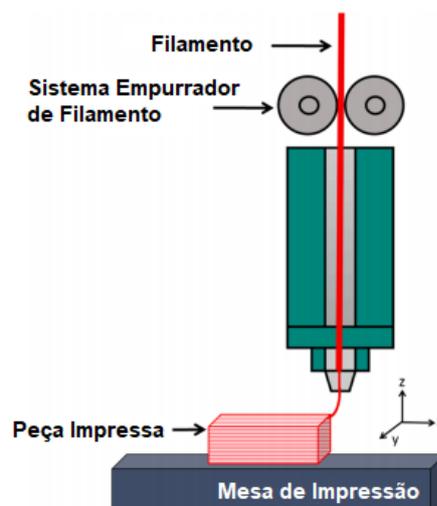
3.1.2 Conceitos Básicos da manufatura aditiva

A manufatura aditiva ou impressão 3D, como é popularmente conhecida, é um processo de fabricação que teve seu desenvolvimento iniciado em meados da década de 80, por Charles Hull (Lin,2020). Esse modo de fabricação, diferentemente da manufatura subtrativa, tem a capacidade de produzir geometrias complexas com baixo custo e pouco desperdício de material (Brenken,2018).

A fabricação através da manufatura aditiva ocorre basicamente pela adição de camadas de material, umas sobre as outras, até que gradativamente o componente fabricado tome forma. Atualmente, existem inúmeros métodos de fabricação dentro da manufatura aditiva (Shanmugam,2021), entretanto apenas o método FDM, também conhecido como FFF (Fabricação por filamento fundido), será abordado nesse referencial teórico, visto que este foi o método de fabricação utilizado.

O método FDM consiste na deposição orientada do material fundido, que na maioria dos casos é um termoplástico, sob uma superfície de impressão. A Figura 5 mostra uma representação básica dos componentes e do funcionamento.

Figura 5 – Processo de Fabricação (FDM)

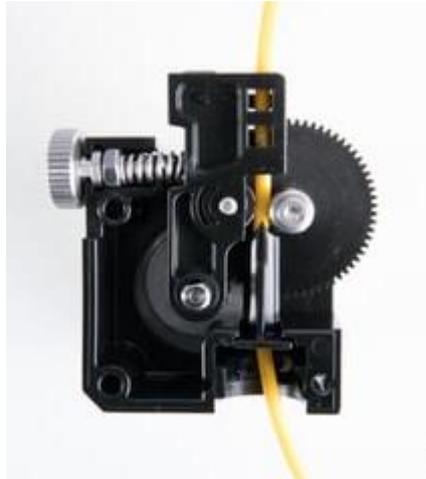


Fonte – Shanmugam (2021)

Uma cabeça de impressão é movimentada nos eixos x, y e z através da rotação precisa de três motores de passo. Esses motores são comandados por um microcontrolador, que sincroniza o movimento dos três eixos, e faz com que a cabeça de impressão percorra trajetórias bem específicas.

Ao mesmo tempo que os motores dos eixos movimentam a cabeça de impressão, um quarto motor fica responsável por alimentar o *hotend* continuamente com filamento, através de um sistema com duas polias, também conhecido como extrusora, representado na Figura 6.

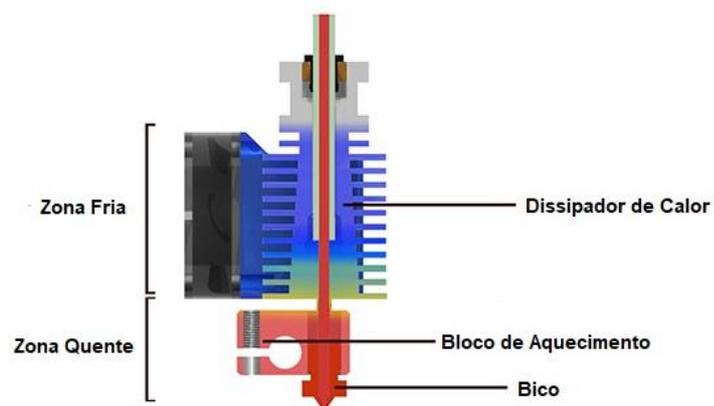
Figura 6 – Extrusora.



Fonte – ALL3DP (2021).

O *hotend*, figura 7, consiste em bloco de alumínio e uma resistência elétrica em forma de cartucho, que aquece o filamento presente no interior do duto até sua temperatura de fusão. Com a inserção de mais filamento pela extrusora, o material já amolecido é empurrado contra um orifício de pequeno diâmetro, normalmente entre 0,4 e 0,6 milímetros, até sair pelo *nozzle*, ou bico de impressão. Como resultado desse processo, um fino fio de filamento é expelido pelo bico e finalmente depositado sob a mesa de impressão.

Figura 7 – Hotend e Trajeto de aquecimento do filamento



Fonte – (FILAMENT2PRINT, 2020).

3.2 Parâmetros de impressão

O método *FDM*, assim como todos os demais métodos de impressão 3D, apresenta parâmetros de impressão que impactam diretamente nas propriedades dos componentes impressos, como por exemplo: tempo de fabricação, custo de produção, nível de acabamento e propriedades mecânicas.

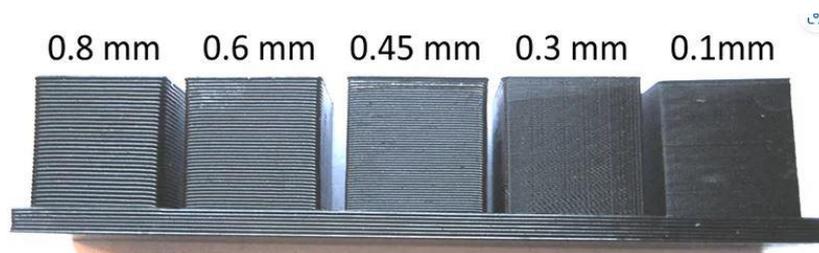
Essa seção abordará alguns parâmetros de impressão que apresentam influência significativa sobre as propriedades mecânicas das peças produzidas. Dessa forma, cada parâmetro de impressão será definido para facilitar o entendimento da sua relação com as propriedades mecânicas.

3.2.1 *Layer height*

Layer height ou altura de camada, representa a dimensão vertical em milímetros de cada camada de polímero depositada.

A figura 8 apresenta uma mesma peça que foi impressa com diferentes alturas de camada, partindo de 0,8mm até 0,1mm.

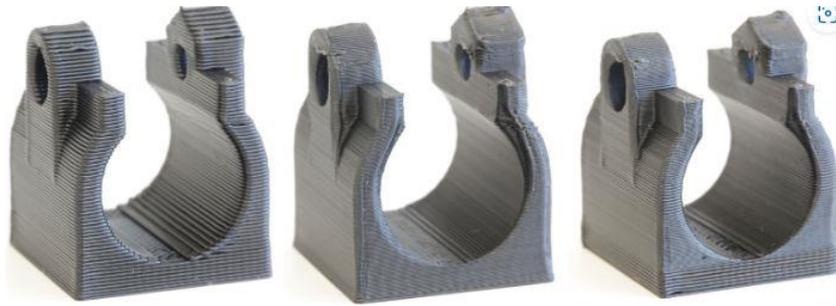
Figura 8 – Diferentes alturas de camada – 0,8mm à 0,1mm.



Fonte – (TWOTREES, 2020).

A altura de camada é o primeiro parâmetro a ser avaliado antes de uma impressão, pois apresenta uma relação direta com o diâmetro do bico de impressão e com o nível de detalhes da peça impressa. Bicos com maiores diâmetros permitem maiores alturas de camadas e conseqüentemente peças com uma menor resolução. De forma análoga, bicos com menores diâmetros permitem menores alturas de camadas, mas em compensação as peças apresentam uma maior resolução. A figura 9 exemplifica o aumento de resolução seguido da redução da altura de camada.

Figura 9 – Resolução de impressão.



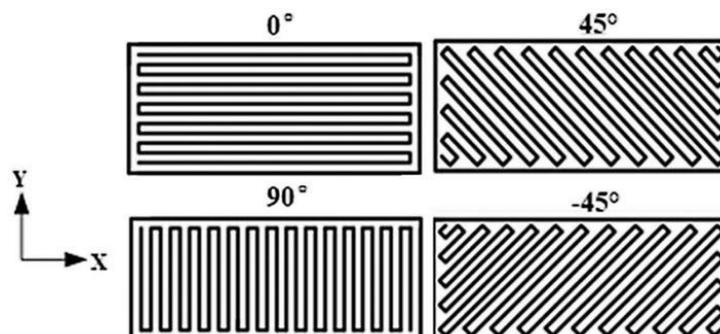
Fonte – (SLIC3R, 2019).

De acordo com Algarni (2021), a redução de altura de camada resulta no aumento da resistência a tração, compressão e flexão dos corpos de provas impressos em poliácido láctico (PLA). Segundo seu estudo, esse comportamento ocorre, pois camadas menos espessas permitem uma maior difusão entre as moléculas, causada pelo reaquecimento da camada já depositada durante a deposição da camada subsequente, o que proporciona um maior emaranhamento intermolecular entre camadas (Algarni, 2021).

3.2.2 Raster angle

Raster angle pode ser definido como o ângulo entre o percurso do bico de impressão e o eixo X. A figura 10 exemplifica diferentes valores para o ângulo de *raster*. Para o ângulo de 0° , o polímero é depositado apenas na direção X, fazendo um caminho de vai e volta. Para o ângulo de 90° , o percurso do bico ocorre apenas na direção do eixo Y.

Figura 10 – Diferentes ângulos de raster



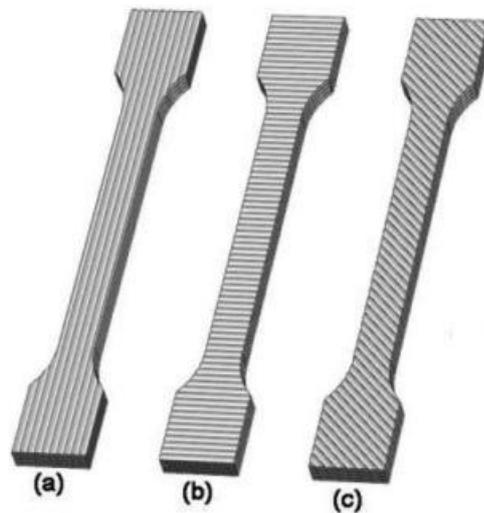
Fonte – (LIU, 2019)

Dentre os parâmetros de impressão, o ângulo de raster é essencial na definição das propriedades mecânicas, pois ele influencia diretamente a anisotropia das peças finais (Algarni,2021).

Ainda em testes realizados por Algarni (2021), observou-se que o limite de escoamento era maior em corpos de prova em que o carregamento estava alinhado com a direção das linhas de impressão. O resultado com menor resistência de escoamento foi observado quando o carregamento estava perpendicular às linhas de impressão. Esse comportamento foi observado para os materiais poliacido láctico (PLA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), polietereetercetona (PEEK) e tereftalato de polietileno glicol (PETG).

O mesmo comportamento foi identificado por Jiang (2018) em testes realizados em corpos de provas de polieterimida (PEI). A figura 11, mostra de forma tridimensional a disposição de camadas com diferentes ângulos de *raster*.

Figura 11 – Corpos de prova com diferentes ângulos de raster.



Fonte – (LIAO, 2018).

A relação entre limite de escoamento e o ângulo de *raster* é justificada pela diferença entre a força necessária para partir um fio de polímero e a força para separar dois fios adjacentes. No primeiro caso, a força aplicada precisa superar as ligações covalentes primárias, que são cerca de 20 vezes mais fortes do que as ligações intermoleculares, que é o que ocorre no segundo caso (Canevarolo,2006). Para se ter uma dimensão dessa diferença, a tensão de escoamento do corpo de prova (a) da

figura 11 foi de 74,4 MPa, enquanto para o corpo de prova (b) foi de 55,9 MPa (Algarni,2021).

3.2.3 Nozzle temperature

Nozzle temperature, ou temperatura de bico, é a temperatura a qual o filamento é elevado até que obtenha fluidez suficiente para ser depositado sobre a mesa de impressão.

Devido às suas características moleculares, cada polímero apresenta um intervalo de temperatura ideal para sua impressão. A tabela 1 apresenta os intervalos de temperatura de impressão dos principais polímeros utilizados na técnica FDM.

Tabela 1 – Intervalos de temperatura de impressão

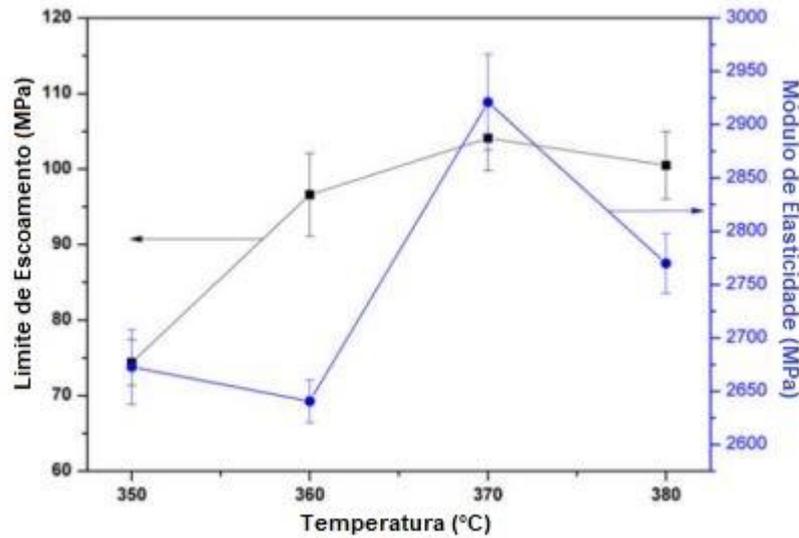
Polímero	Temperatura de bico
PLA	180 C° - 210 C°
ABS	225 C° - 245 C°
TPU	210 C° - 230 C°
PETG	230 C° - 250 C°

Fonte – produzida pelo autor

A temperatura de bico tem uma relação direta com a qualidade de adesão entre camadas e impacta diretamente sobre as propriedades mecânicas da peça final. Em ensaios de tração utilizando PEI (Polieterimida) foi observado que o aumento de temperatura de bico ocasionou um aumento do limite de escoamento. Essa característica é justificada pelo aumento de mobilidade e energia térmica, que permitem uma adesão entre camadas mais forte (JIANG, 2018).

A figura 12 apresenta os resultados obtidos por JIANG (2018). Em preto estão os resultados para o limite de escoamento e em azul os resultados para o módulo de elasticidade.

Figura 12 – Relação entre temperatura de bico e limite de escoamento para o PEI



Fonte – (JIANG, 2018)

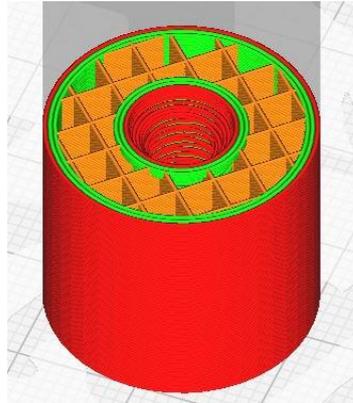
3.2.4 Infill porcentagem

Infill percentage pode ser traduzido como porcentagem de preenchimento e é o parâmetro responsável por definir a quantidade de material que será depositada no interior da peça impressa.

Pode-se definir preenchimento como a estrutura interna da peça, ou seja, são camadas internas não visíveis que servem de estrutura para as paredes externas.

A figura 13 representa uma vista em seção da camada de impressão. Em vermelho e verde são representados, respectivamente, os contornos externos e internos. Em laranja está representado o preenchimento, que nesse exemplo é do tipo grade.

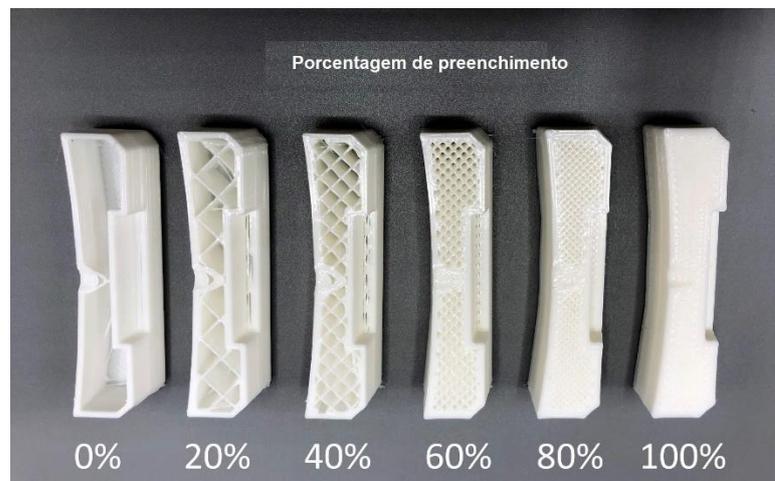
Figura 13 – Vista em seção da camada de impressão



Fonte – produzida pelo autor

A porcentagem de preenchimento se resume basicamente a quanto do volume interno da peça é preenchido por material. A figura 14 apresenta diferentes porcentagens de preenchimento para um mesmo tipo de *infill*.

Figura 14 – Diferentes porcentagens de preenchimento



Fonte – (3DPROS, 2021)

Quando se fala em propriedades mecânicas, a porcentagem de preenchimento tem grande influência sobre o limite de escoamento e módulo de elasticidade. Pesquisas realizadas por (Algarni,2021), apontam um aumento de 34% para o limite de escoamento e 15% para o módulo de elasticidade quando a porcentagem de preenchimento foi alterada de 25% para 75% em corpos de provas fabricados em PLA. O mesmo comportamento foi identificado para corpos de provas fabricados em ABS. O aumento da porcentagem de preenchimento de 25% para 50% ocasionou um

aumento de 24% para a tensão de escoamento e de 45% para o módulo de elasticidade (Algarni,2021).

O comportamento apresentado no parágrafo anterior pode ser justificado pelo aumento da área de contato entre camadas, o que ocasiona em menores tensões para um mesmo carregamento e reduz a presença de vazios estruturais que podem atuar como concentradores de tensão. Dessa forma pode-se chegar à conclusão de que a porcentagem de preenchimento ideal seria de 100%. Entretanto, o aumento da porcentagem de preenchimento acarreta no aumento do peso da peça e do tempo de impressão, que, por sua vez, levam ao aumento no custo de fabricação.

3.3 Poliuretano

A palavra polímero tem origem do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidades de repetição) (Canevarolo,2006). Os polímeros são macromoléculas compostas por inúmeras unidades de repetição chamadas de meros, que estão conectadas entre si por ligações covalentes. Considerando as propriedades mecânicas e aplicações, os polímeros podem ser divididos em quatro classes: Termoplásticos, termofixos, elastômeros e fibras.

Quando se fala em polímeros aplicados para impressão 3D pela técnica FDM, a classe referenciada é a dos termoplásticos. A principal característica desse grupo está na capacidade de amolecer e fluir quando submetidos a um aumento de temperatura e posteriormente de solidificar quando resfriados. Por essas características, os termoplásticos podem ser reprocessados sob aquecimento, o que o faz serem recicláveis de um modo geral.

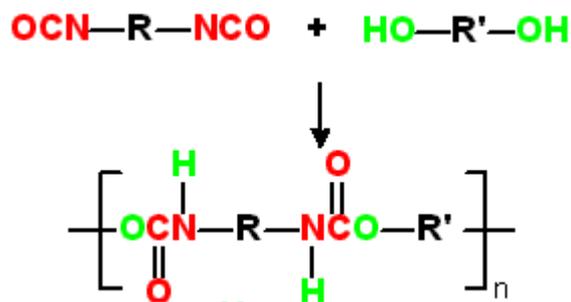
Dentre os polímeros termoplásticos mais utilizados na impressão 3D do tipo FDM estão: ABS (*Acrilonitrila Butadieno Estireno*), PLA (*Poliácido Láctico*), PETG (*Tereftalato de Polietileno Glicol*), TPU (*Poliuretano Termoplástico*), ASA (*Acrilonitrilo Estireno Acrilato*).

No presente trabalho, considerando as propriedades requeridas para aplicação como esponja da máquina rotuladora, foi selecionado o poliuretano termoplástico como material de estudo. O termo poliuretano refere-se a uma classe de polímeros que é originada a partir da reação de isocianatos com polióis. Esse grupo de polímeros

é considerado um dos mais versáteis da atualidade devido as suas diversas aplicações e propriedades. Os poliuretanos podem ser encontrados na forma de espumas flexíveis para estofados automotivos, espumas rígidas para isolamento térmico e acústico, além da sua forma termoplástica que pode ser utilizada em calçados, correias transportadoras e amortecedores.

A figura 15 representa a reação de formação do poliuretano, onde uma ligação uretânica é formada a partir de um isocianato e um álcool.

Figura 15 – Reação de síntese do poliuretano



Fonte – (WIKIPEDIA, 2022).

Como pode ser observado no mero da figura 15, a molécula do poliuretano apresenta heteroátomos, oxigênio e nitrogênio. Essa característica contribui para as forças coesivas intermoleculares.

Uma outra característica dos poliuretanos é a presença de estruturas segmentadas, constituída de estruturas rígidas provenientes dos isocianatos e estruturas flexíveis provenientes dos polióis. A rigidez e resistência mecânica dos poliuretanos é proveniente dos seus segmentos rígidos, enquanto que a sua flexibilidade vem da mobilidade das cadeias flexíveis (Vilar,2004).

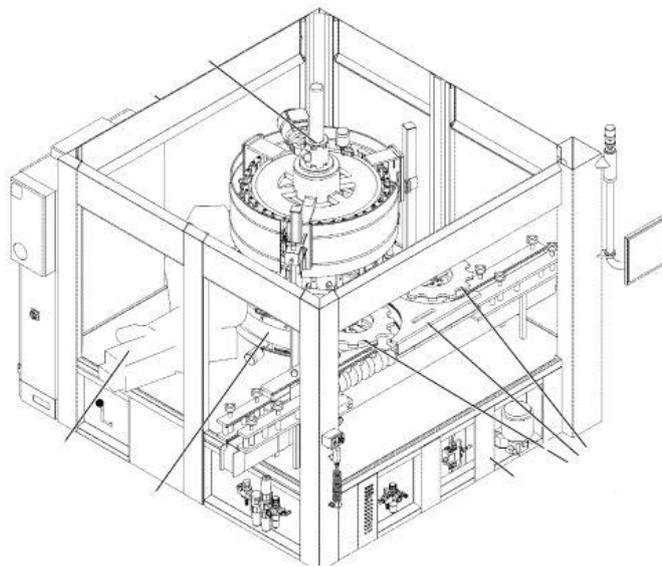
Poliuretanos termoplásticos (TPU) são elastômeros à base de PU que combinam o comportamento mecânico de um elastômero com a processabilidade de um termoplástico, podendo ser processados pelas usuais técnicas de processamento de termoplásticos, como injeção, extrusão ou sopro (Vilar,2004).

Essa característica se deve a presença de segmentos lineares flexíveis enovelados e segmentos rígidos empacotados, que são capazes de fundir, sem a degradação das ligações uretânicas.

3.4 Rotuladora

Dentre os diversos equipamento presentes em uma linha de envase de garrafas pode-se incluir a presença de uma rotuladora. É nesse equipamento que a garrafa recebe o rótulo e ganha sua identidade. Informações como ingredientes, informações nutricionais, validade e lote também são adicionadas no rótulo para atender as necessidades do cliente e do fabricante.

Figura 16 – Rotuladora Krones



Fonte – (KRONES, 2010).

A depender do produto que está sendo envasado, a rotuladora consegue entregar uma rotulagem de até 90 mil garrafas por hora. Além disso, podem ser adicionados à uma mesma garrafa até 3 rótulos diferentes. Os rótulos recebem o nome a depender da posição onde são colocados. O rótulo de pescoço é chamado de *neck*, o frontal de *front* e o traseiro de *back*. A figura 17 mostra um exemplo dos rótulos de *neck* e *front*.

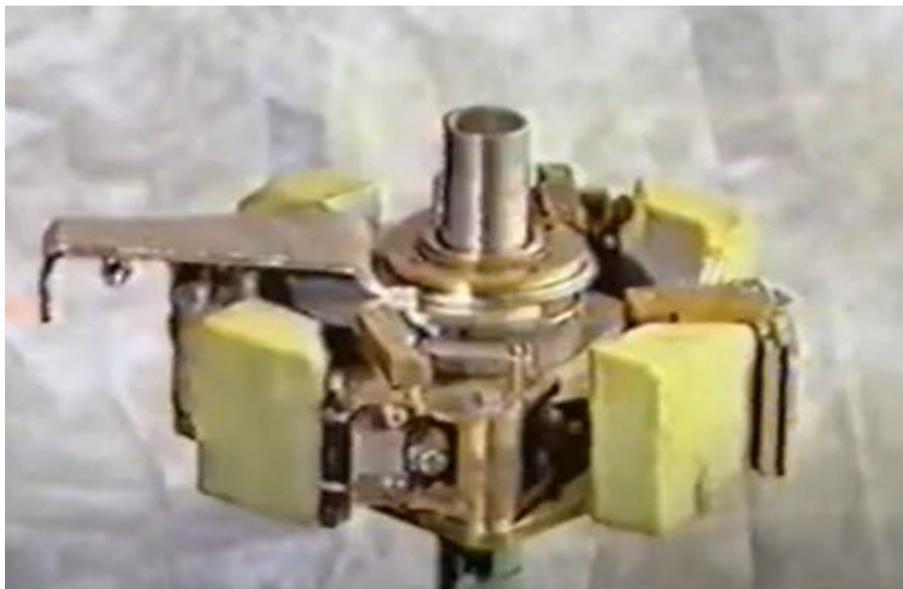
Figura 17 – Rótulos de front e neck



Fonte – (DREAMSTIME, 2020).

Dentre os diversos subconjuntos que compõem uma máquina rotuladora, a presente seção será focada apenas no cilindro pinças, que é a região onde as esponjas estão dispostas. A figura 18 mostra um exemplo de cilindro de pinças.

Figura 18 – Cilindro de pinças

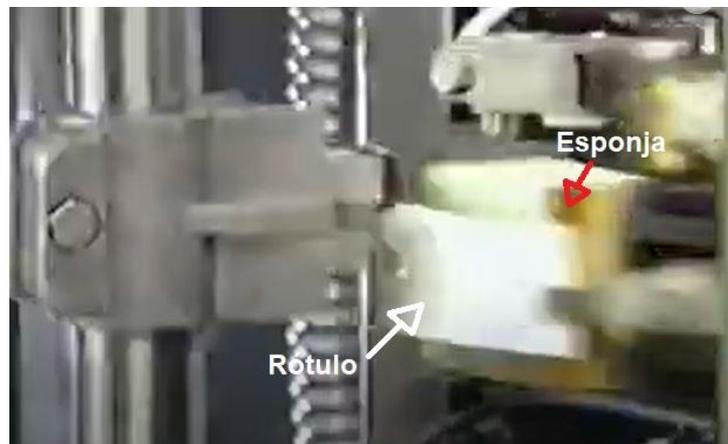


Fonte – (SIDIVALDO, 2021)

De forma simplificada, o cilindro de pinças é um componente que transfere os rótulos impregnados de cola para as garrafas de forma sincronizada e suave. Para atingir essas características, o cilindro de pinças conta com um mecanismo came-seguidor que controla o momento exato de abertura e fechamento das pinças. Além disso, um conjunto de esponjas realizam a transferência do rótulo de forma suave para a garrafa.

As duas figuras a seguir apresentam, respectivamente, o momento de recebimento do rótulo pelas pinças e transferência de rótulo para garrafa pela esponja.

Figura 19 – Recebimento de rótulos



Fonte – (SIDIVALDO, 2021)

Figura 20 – Entrega de rótulos



Fonte – (SIDIVALDO, 2021)

O material de fabricação das esponjas não é informado pelo fabricante do equipamento, mas se assemelha muito com uma esponja convencional de lavar

louças. Um dos grandes problemas identificados na produção é quando as esponjas começam gradativamente a acumular cola durante o recebimento dos rótulos e depois de um tempo começam a se tornar rígidas, não entregando o rótulo de forma adequada. Além disso, durante a sua limpeza, a cola enrijecida acaba levando algumas partes da esponja, deixando-a com uma forma irregular. A figura 21 mostra um exemplo de esponja com alto nível de desgaste.

Figura 21 – Esponja desgastada



Fonte – produzida pelo autor

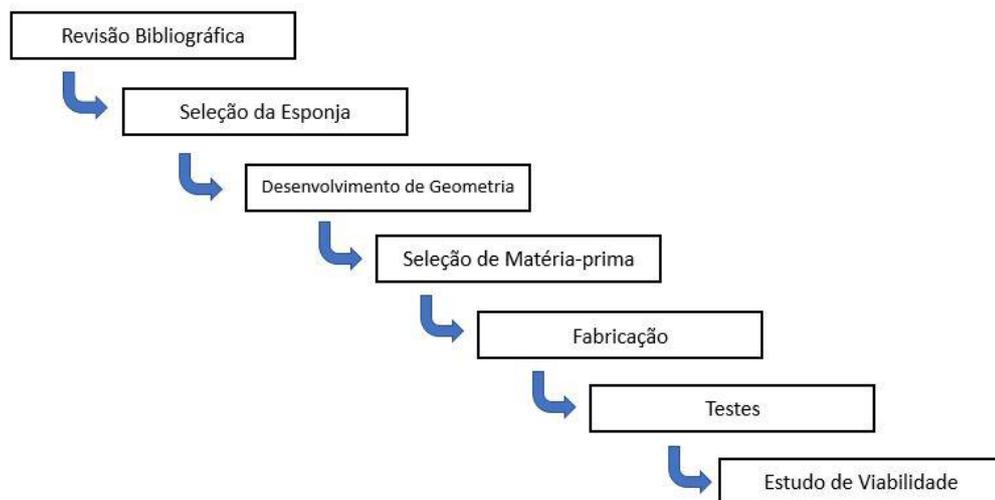
Atualmente, o desgaste prematuro das esponjas tem causado um grande impacto na qualidade da transferência dos rótulos, assim como nos custos de produção, visto que as esponjas são fornecidas apenas pelo fornecedor original da máquina e na grande maioria das vezes são importadas da Alemanha a um alto custo. Para se ter uma ideia dos custos, cada rotuladora utiliza em média 12 esponjas, que duram aproximadamente três meses e custam em média R\$ 250,00 cada uma. Alguns modelos específicos de esponjas podem chegar até R\$800,00 a unidade.

O referente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da fabricação de esponjas, através da manufatura aditiva (FDM), utilizadas em uma máquina rotuladora de uma indústria de bebidas.

4 METODOLOGIA

Uma sequência de etapas foi estruturada com a intenção de guiar as atividades para a obtenção de esponjas funcionais e com um custo mais acessível. A figura 22 apresenta um fluxograma com todas as etapas do trabalho realizado.

Figura 22 – Fluxo de Atividades



Fonte – produzida pelo autor

4.1 Revisão bibliográfica

A etapa de revisão bibliográfica consistiu na seleção de artigos científicos que abordassem a relação entre as propriedades mecânicas de componentes fabricados por impressão 3D do tipo FDM e alguns parâmetros de impressão.

A partir das informações obtidas nos artigos científicos selecionados, foram escolhidos os parâmetros de impressão que apresentavam a maior probabilidade de impactar nas características necessárias para um ideal funcionamento das esponjas. Esses parâmetros serviram como guia para o fatiamento dos protótipos e já foram abordados na seção 3.2 do referencial teórico.

4.2 Seleção de esponjas

A seleção das esponjas rotuladoras foi realizada inicialmente por uma grande demanda interna da cervejaria relacionada ao alto custo desses componentes, ao alto tempo de entrega (*lead time*) do fornecedor e ao desperdício excessivo de rótulos.

Para selecionar o tipo de esponja que traria um melhor resultado geral para a fábrica, foi desenvolvida uma matriz de criticidade. Os critérios utilizados foram: custo unitário, consumo histórico e *lead time* do fornecedor.

As esponjas foram pontuadas de 0 a 10 de acordo com o seu impacto em cada um dos critérios e uma nota final foi obtida pelo produto das notas recebidas.

A tabela 2 apresenta a matriz de criticidade com 6 esponjas diferentes.

Tabela 2 – Matriz de criticidade

	Custo Unitário	Consumo Histórico	Lead Time	Nota
Esponja 1	9	6	7	378
Esponja 2	9	7	7	441
Esponja 3	7	8	8	448
Esponja 4	5	5	9	225
Esponja 5	7	7	5	245
Esponja 6	8	9	9	648

Fonte – produzida pelo autor

Por questões de sigilo empresarial, os modelos das esponjas não serão especificados, mas o que pode ser dito é que foram selecionadas as esponjas 6 e 3 por terem obtidos as maiores pontuações, 648 e 448 pontos, respectivamente. As duas esponjas selecionadas compõem o *setup* de uma linha de envase retornável específica, sendo a esponja 6 do tipo *front* e a esponja 3 do tipo *neck*.

4.3 Seleção da matéria-prima

Partindo do conhecimento prévio de funcionamento das esponjas e do material de fabricação original, chegou-se à conclusão de que o material que melhor se adequaria seria o TPU, também conhecido comercialmente como filamento flexível.

Foi realizada uma busca de fornecedores que trabalhassem com esse tipo de material, mas devido a uma questão contratual interna da empresa a escolha ficou limitada a apenas um fornecedor.

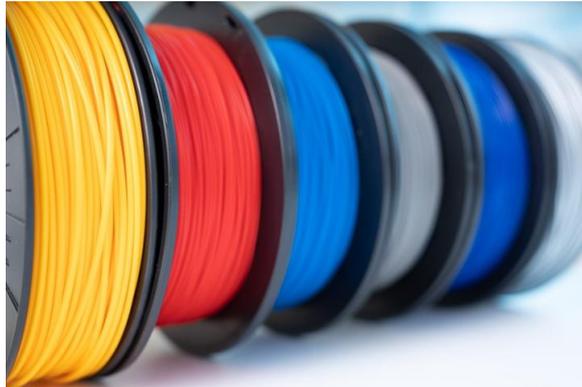
O fornecedor selecionado tinha disponível em seu catálogo dois tipos de TPU, um com dureza *shore* 40D e outro com dureza *shore* 98A.

Para a seleção do filamento mais adequado, foram analisadas inicialmente as fichas técnicas disponibilizados pelo fabricante, entretanto não se encontravam presentes informações sobre suas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade, limite de escoamento ou resistência a tração em nenhum dos dois produtos.

Para contornar a problemática da ausência de dados técnicos do material, optou-se por adquirir os dois materiais e trabalhar na geometria da esponja de modo a deixar a sua superfície de contato com o rótulo fina o suficiente para se tornar flexível.

Após alguns testes iniciais, optou-se pela utilização do TPU com dureza *shore* 98A para fabricação dos primeiros protótipos, visto que apresentou maior facilidade de impressão, maior flexibilidade nas peças impressas e menor custo por bobina quando comparado ao TPU *shore* 40D.

Figura 23 – Filamento para impressão 3D



Fonte – (SEEFELDT, 2019).

4.4 Desenvolvimento da geometria

Uma das fases que antecede a fabricação via manufatura aditiva é o desenvolvimento da geometria em algum software CAD (*Computer aided design*). Todo o desenvolvimento dessa etapa foi realizado no software *Inventor* da *Autodesk*.

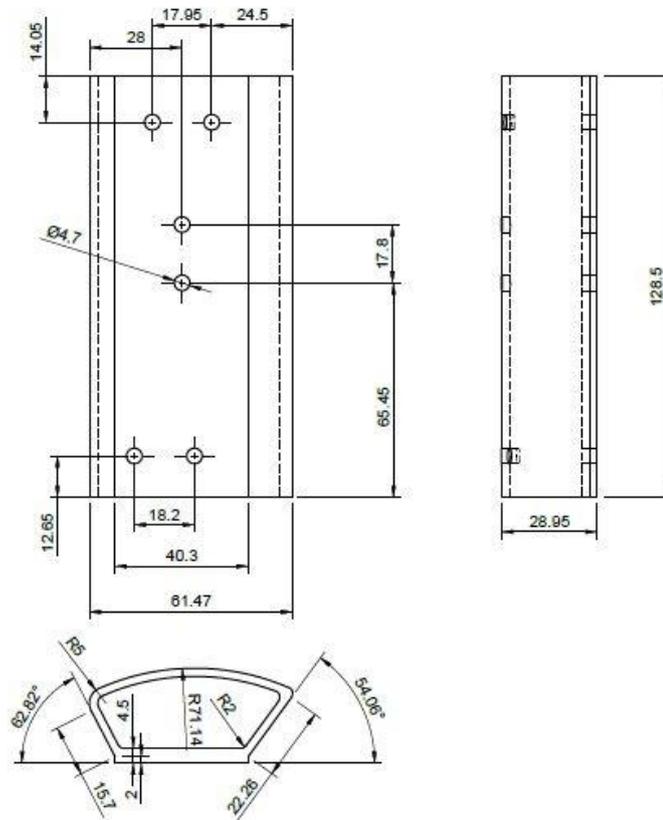
Uma esponja original e nova de cada modelo foi disponibilizada pela área da manutenção para coleta das medidas. As figuras 24 e 25, apresentam respectivamente, uma esponja original fornecida pela área da manutenção e o seu desenho técnico, que serviu de ponto de partida para o desenvolvimento do primeiro protótipo.

Figura 24 – Esponja de front original



Fonte – produzida pelo autor

Figura 25 – Desenho técnico esponja front



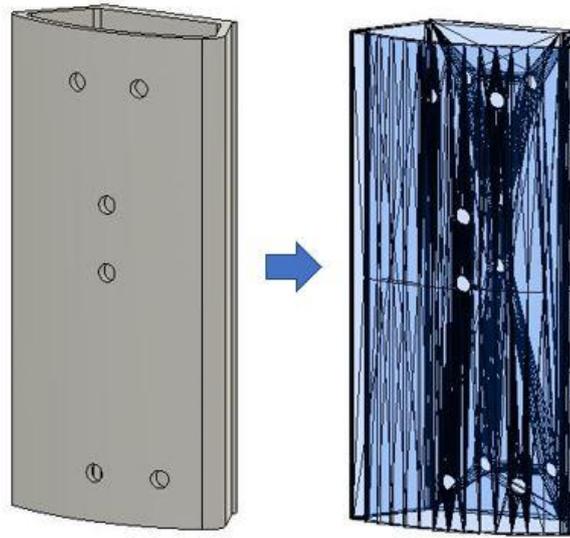
Fonte – produzida pelo autor

4.5 Fabricação

Antes de iniciar a etapa de fabricação, a geometria desenvolvida no software *Inventor* precisou ser convertida para o formato do seu formato nativo para o formato .SLT, para que ele pudesse ser interpretado pelo software de fatiamento.

A conversão foi realizada dentro do próprio *Inventor* e o resultado é apresentado na figura 26.

Figura 26 – Conversão para formato .STL



Fonte – produzida pelo autor

O arquivo .STL foi importado para o software de fatiamento *Ultimaker Cura*, onde foram definidos valores para os parâmetros de impressão.

A temperatura de bico selecionada foi de 220 °C, respeitando o intervalo de temperaturas especificadas pelo fabricante, entre 190°C e 220°C. O mesmo se aplica para a temperatura da mesa, que foi selecionada como 60°C.

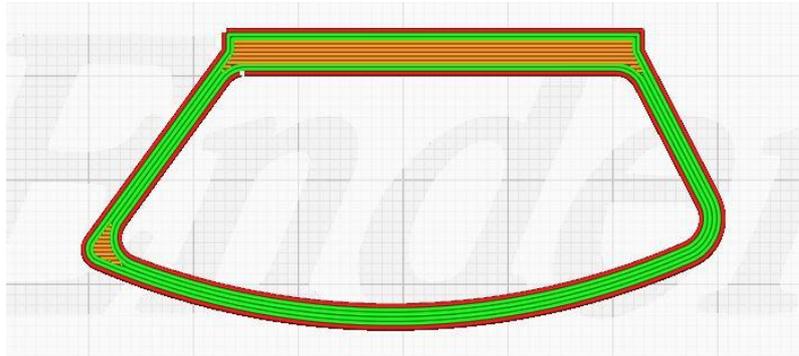
A altura de camada foi definida dentro do intervalo permitido pelo bico de 0,4mm. O intervalo possível era de 0,1mm à 0,3mm, sendo escolhido o valor intermediário de 0,2mm.

Para a porcentagem de preenchimento foi escolhido o valor máximo de 100%, visto que as paredes finas da geometria permitem essa escolha sem um aumento excessivo no tempo de impressão.

O ângulo de *raster* foi definido como alternando camadas com 0° e 90° e por fim, foram utilizadas 3 camadas de contorno para preencher todas as paredes da esponja.

A figura 27 apresenta a representação de uma camada ajustada com os parâmetros citados acima.

Figura 27 – Representação da camada



Fonte – Produzida pelo autor

A tabela 3 apresenta o resumo dos parâmetros de impressão utilizados e seus respectivos valores.

Tabela 3 – Parâmetros de Impressão

Parâmetro	Valor
Temperatura de Bico	220°C
Temperatura de Mesa	60°C
Altura de Camada	0.2mm
<i>Infill Percentage</i>	100%
Raster Angle	0°/90°
Contornos de parede	3

Fonte – Produzida pelo autor.

Por fim, um arquivo no formato .GCODE foi produzido pelo fatiador com todos os parâmetros de impressão e percursos da cabeça de impressão. O arquivo foi levado até a impressora 3D por meio de um cartão de memória.

A máquina utilizada para impressão foi uma impressora 3D cartesiana da marca *Creality*, modelo *Ender 3*, figura 28.

Figura 28 – Impressora Ender 3.



Fonte – Creality (2021).

4.6 Testes

Após a fabricação, as dimensões das esponjas foram inspecionadas com o auxílio de um paquímetro e foram posteriormente instaladas em uma rotuladora específica da linha de produção. Foram substituídas todas as esponjas do cilindro de pinças para evitar a flutuações da qualidade de rotulagem devido a presença de esponjas originais e impressas. A figura 29, apresenta um cilindro de pinças com as esponjas de *neck* instaladas.

Figura 29 – Cilindro de pinças com esponjas instaladas



Fonte – Produzida pelo autor

Após a instalação, as esponjas foram acompanhadas todos os dias durante o período de uma semana, com objetivo de identificar desgaste ou mau funcionamento prematuro. Após essa primeira fase de avaliação, as esponjas começaram a ser inspecionadas uma vez por semana durante um período de três meses para validação final de durabilidade.

Um registro qualitativo foi elaborado em cada inspeção para gerar um histórico da integridade física das esponjas em testes. Nesses momentos, foi avaliado se existia alguma delaminação entre as camadas de impressão, deformação plástica ou degradação ocasionada pela cola do rótulo.

4.7 Estudo de viabilidade

Após o período de testes foi realizado o estudo de viabilidade, que teve como critérios de avaliação, o desempenho das esponjas na entrega de rótulos, tempo de fabricação e custos de fabricação.

A qualidade de entrega dos rótulos foi determinada junto com o operador da máquina, que avaliou se com o passar do tempo os rótulos começavam a ficar mal posicionados.

O tempo de fabricação foi determinado inicialmente a partir do software de fatiamento e posteriormente comparado com o cronômetro da máquina. As diferenças entre as medições foram desprezíveis.

A computação de custos foi realizada a partir de uma planilha interna que leva em consideração parâmetros como: consumo de energia elétrica, consumo de material e depreciação da máquina.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

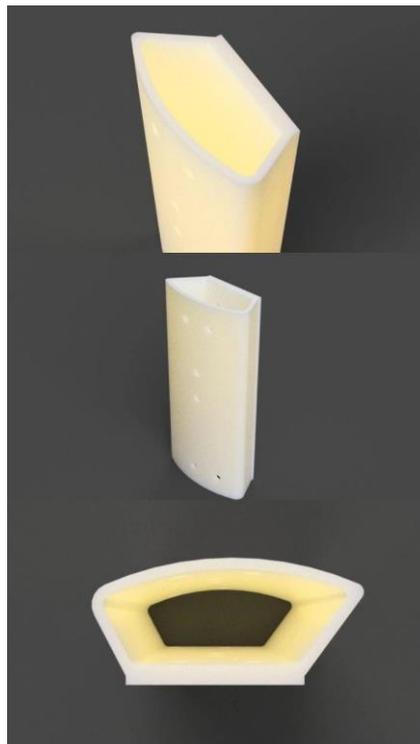
5.1 Geometria final

As esponjas foram modeladas respeitando as medidas originais, mas sofreram algumas alterações devido a diferença de elasticidade entre o TPU selecionado e o material da esponja original.

Optou-se por uma geometria oca para garantir uma maior flexibilidade das esponjas impressas. Uma outra alteração realizada foi a adição de furos para facilitar a passagem dos parafusos durante a instalação.

A figura 30 apresenta três vistas renderizadas da geometria oca desenvolvida.

Figura 30 – Geometria 3D da esponja



Fonte – produzida pelo autor

5.2 Custos e tempo de fabricação

Após a obtenção do arquivo .STL, foi possível mensurar os custos de fabricação e tempo total de impressão das esponjas através das estimativas geradas pelo *software* de fatiamento.

Com relação ao tempo de fabricação, os resultados foram os seguintes: 7 horas e 35 minutos para uma unidade da esponja de *front* e 3 horas e 57 minutos para uma unidade da esponja de *neck*. Já com relação aos custos de fabricação os valores obtidos foram de, 24 reais para uma unidade da esponja de *front* e 15 reais para uma unidade da esponja de *neck*.

A figura 31 representa o resultado final de uma esponja de *neck* durante a etapa de fabricação dos protótipos.

Figura 31 – Esponja neck impressa



Fonte – produzida pelo autor

5.3 Inspeções

Após a instalação das esponjas, inspeções diárias e semanais foram realizadas apenas do ponto de vista funcional no equipamento. As esponjas não foram retiradas ou a máquina parada para sua inspeção, levando em consideração apenas a qualidade da rotulagem na saída da máquina.

Após o período de três meses de testes, os cilindros de pinças com as esponjas impressas foram removidos durante uma parada para manutenção e uma inspeção

mais profunda foi realizada. A figura 32 apresenta o momento dessa inspeção em cilindro de esponjas de *neck*.

Figura 32 – Inspeção da esponja de neck



Fonte – Produzida pelo autor

Ao final da inspeção, observou-se que tanto as esponjas de *neck*, quanto as esponjas de *front*, mantiveram suas formas originais e não apresentaram níveis expressivos de desgaste. Outro ponto observado, foi que resquícios de cola encontrados sob as esponjas saíram com facilidade e não prejudicaram a superfície da mesma, o que não ocorria nas esponjas originais.

5.4 Comparativo

Com base em todas as informações levantadas foi desenvolvida uma tabela comparativa entre as características das esponjas originais e das fabricadas internamente. A tabela 4 apresenta um resumo dessa comparação.

Tabela 4 – Quadro comparativo esponja original versus 3D

Esponja Front			
	Original	3D	Redução
Custo	R\$ 325,00	R\$ 24,00	93%
Lead time	1 mês	8 horas	99%
Durabilidade	3 meses	> 3 meses	-

Esponja Neck			
	Original	3D	Redução
Custo	R\$ 245,00	R\$ 15,00	94%
Lead time	1 mês	4 horas	99%
Durabilidade	3 meses	> 3 meses	-

Fonte – Produzida pelo autor

Como pode ser observado na tabela acima, as esponjas impressas apresentaram uma redução significativa tanto na questão de custos quanto na questão de *leadtime*.

Com relação aos custos, a esponja de *front* apresentou uma redução de 93%, saindo de R\$ 325,00 para R\$ 24,00. Já a esponja de *neck* apresentou uma redução de 94% saindo de R\$ 245,00 para R\$ 15,00.

Já no quesito *leadtime* do fornecedor ambas as esponjas apresentaram uma redução expressiva, reduzindo o tempo de entrega de aproximadamente um mês para algumas horas.

Por fim, a durabilidade se mostrou equiparada até o último dia de inspeção. É importante salientar, que a durabilidade final das esponjas impressas não foi determinada devido ao longo período de acompanhamento. O que foi observado é que mesmo após três meses, as esponjas se apresentavam íntegras e com potencial para continuarem funcionando por um período ainda maior.

Após todas as análises realizadas, chegou-se ao resultado final de que as esponjas impressas obtiveram sucesso em todos os requisitos e que podem substituir as esponjas originais.

6 CONCLUSÃO

A utilização da manufatura aditiva do tipo FDM para a fabricação de esponjas rotuladoras apresentou resultados positivos dos pontos de vista funcional e financeiro.

As esponjas impressas permitiram uma redução expressiva nos custos e otimizaram a sua disponibilidade em estoque devido ao menor tempo de fornecimento. Além disso, o aumento na vida útil do componente permitiu a redução na frequência de troca quando comparada a das esponjas originais, trazendo também benefícios para a equipe de manutenção.

O estudo realizado nesse trabalho, confirmou a viabilidade da implementação da manufatura aditiva no meio industrial, através da redução de custos, aumento da vida útil dos componentes e menores prazos de entrega, podendo ser replicado para outros componentes e ocasionar ganhos financeiros e produtivos em diversos setores.

REFERÊNCIAS

3DPROS. **Choosing Infill Percentage for 3D Printed Parts**. 2021. <<https://www.3d-pros.com/choosing-infill-for-3d-printed-parts>>. Acessado em: 08/02/2021.

ALGARNI, S. G. M. **Comparative study of the sensitivity of pla, abs, peek, and petg's mechanical properties to fdm printing process parameters**. Crystals, Agosto 2021.

BRENKEN, B.; BAROCIO, E. **Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review** *Additive Manufacturing*, v. 21, p. 1–16, may 2018.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ta. ed. Brasil: Artliber Editora, 2006.

CUNHA, M. **Mecânica – Processo de Estampagem**. 2016. <<https://www.marciocunha.eti.br/mecanica-processo-de-estampagem/>>. Acessado em: 06/02/2021.

DREAMSTIME. **Beer label template with neck label**. 2020. <<https://www.dreamstime.com/beerbottlelabel-beer-label-template-neck-amber-ale-vector-illustration-image180175091>>. Acessado em: 10/02/2021. Citado na página 19.

ELMRABET, N.; SIEGKAS, P. **Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts**. *Polymer Testing*, v. 90, p. 106656, October 2020.

FILAMENT2PRINT. **Direct extrusion and Bowden systems**. 2020. <https://filament2print.com/gb/blog/94_bowden-direct-extrusion.html>. Acessado em: 15/08/2021.

HERZBERGER, A.; SIRRINE, J. M. **Polymer design for 3D printing elastomers: Recent advances in structure, properties, and printing**. *Progress in Polymer Science*, v. 97, p. 101144, October 2019.

JIANG GUANGXIN LIAO, D. X. S. **Mechanical properties analysis of polyetherimide parts fabricated by fused deposition modeling**. *High Performance Polymers*, v. 31, p. 97–106, Janeiro 2018.

KRONES. **Manual de peças de reposição**. Brasil: [s.n.], 2010.

LIN, X.; COATES, P. **Experimental analysis of the tensile property of FFF-printed elastomers**. *Polymer Testing*, v. 90, p. 106687, October 2020.

LIU QIAN LEI, S. X. Z. **Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based pla composites fabricated by fdm**. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, p. 3741–3751, Junho 2019.

REDWOOD, B. **The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications**. Amsterdã: 3D HUBS, 2017.

SEEFELDT, J. **3D Printing Materials — Beyond PLA and ABS**. 2019. <<https://www.thermofisher.com/blog/materials/3d-printing-materials-beyond-pla-and-abs/>>. Acessado em: 18/08/2021.

SHANMUGAM, V.; DAS, O. **Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials**. *International journal of fatigue*, v. 143, p. 106007, February 2021.

SIDIVALDO, J. **Treinamento Rotuladoras Vidro KRONES-parte 2**. 2021. <<https://www.youtube.com/watch?v=RNYWPKCnwmg&t=410s>>. Acessado em: 10/02/2021.

SLIC3R. **Variable Layer Height**. 2019. <<https://manual.slic3r.org/expert-mode/variable-layer-height>>. Acessado em: 06/01/2023.

TWOTREES. **11 Tips To Increase 3D Printing Speed Save More Time. 2020**. <<https://twotrees3d.com/11-tips-to-increase-3d-printing-speed/>>. Acessado em: 06/01/2023.

VILAR, W. **Química e Tecnologia de Poliuretanos**. 3ta. ed. Brasil: Vilar consultoria, 2004.

WANG, J. **Research of tpu materials for 3d printing aiming at non-pneumatic tires by fdm method**. *Polymers*, v. 12, 2020.

WIKIPEDIA. **Poliuretano**. 2022. <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Poliuretano>>. Acessado em: 09/02/2021.