

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA SUBSTITUIÇÃO DE MAGAZINES FABRICADOS EM ALUMÍNIO POR PLA UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA

Gustavo Ghizoni Gesser¹

Fábio Peruch²

Resumo: Os equipamentos que realizam a extração de talheres descartáveis em injetoras, utilizam um gabarito para o empilhamento das peças para encaminhar nas quantidades corretas para a embalagem. Esses gabaritos são chamados de magazines, que são peças feitas em alumínio que sofrem baixos esforços mecânicos no uso do equipamento. Devido a geometria complexa que essas peças possuem, a manufatura exige grandes tempos de usinagem e elevado desperdício de matéria prima. O trabalho teve por objetivo estudar a aplicação do ácido polilático (PLA), que é um termoplástico biodegradável, variando o seu preenchimento (*infill*), utilizando a manufatura aditiva para a impressão do modelo e a substituição dos magazines. Foram avaliados parâmetros relacionados a tração, flexão e abrasão, tanto do alumínio utilizado anteriormente como da matéria prima a ser inserida, além de simulações computacionais. Após a caracterização dos materiais analisou-se a viabilidade técnica e os possíveis problemas que esta substituição poderia ocasionar. Para os ensaios em laboratório, foram produzidos corpos de prova para ambos os materiais, conforme as normas vigentes. Os resultados obtidos para o estudo realizado, permitiu definir que o “*infill*” de 100 % obteve a melhor performance, porém, não sendo o escolhido pelo seu elevado tempo de impressão, optando pelo “*infill*” de 75 % que apresentou satisfatórios resultados nos ensaios realizados. O estudo reduziu os desperdícios de matéria prima e incorporou uma nova tecnologia ao equipamento, possibilitando adentrar a novos mercados e a novas possibilidades de manufaturar certas peças.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, PLA, viabilidade técnica.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e implementação em indústrias, de novas tecnologias, tais como a manufatura aditiva, vem de encontro a várias soluções dentro de um ambiente fabril, visando a solução de problemas e redução de custos de diversos processos. Nesse contexto, viabilizar tecnicamente o uso desta ferramenta se torna essencial para o bom funcionamento de um equipamento.

¹ Graduando em Bacharel em Engenharia Mecânica. E-mail: gustavoghizoni@hotmail.com

² Prof. Me. Fábio Peruch. E-mail: fabio.peruch@satc.edu.br

A indústria do plástico no ramo de talheres descartáveis baseia-se na injeção dos modelos em injetoras, posterior extração de descartáveis e embalagem dos produtos para envio e expedição.

Os equipamentos que realizam a extração dos produtos, utilizam magazines que armazenam os talheres descartáveis um sob o outro para encaminhar o processo para a embalagem, facilitando a obtenção das quantidades corretas no empilhamento dos talheres. Estes magazines são “moldes” onde os talheres são depositados, para ocorrer a transição para o processo final de embalagem, e é responsável por garantir a integridade dos mesmos sem afetar sua estrutura física.

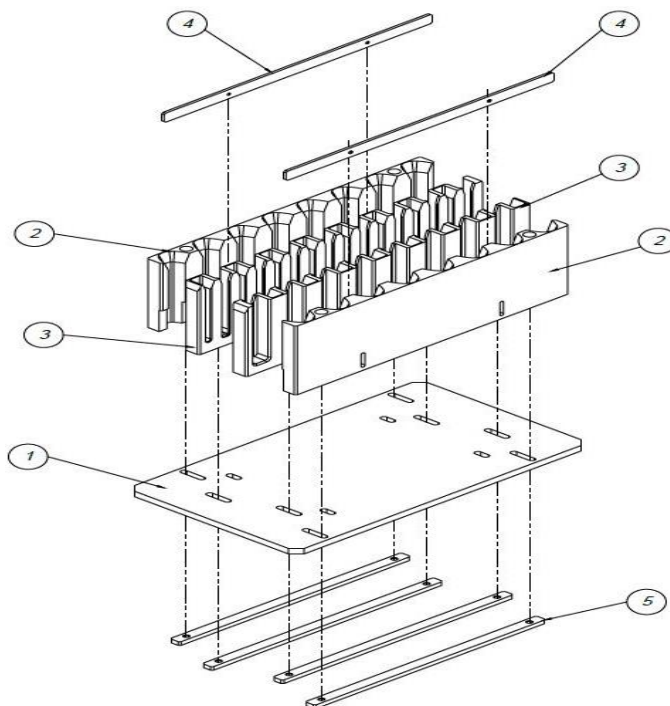
A automação industrial no ramo de descartáveis é de suma importância, visto que, as grandes velocidades de produção impostas nas injetoras com ciclos cada vez mais rápidos exigem uma grande precisão no processo de extração e empilhamento nas quantidades corretas dos talheres. A alta eficiência e qualidade nestes equipamentos são uns dos motivos que fazem grandes empresas investirem elevados capitais para possuir competitividade no mercado.

A extração dos talheres é feita utilizando magazines fabricados em alumínio que acomodam os produtos extraídos um sobre o outro sem causar danos físicos ao plástico recém injetado. A baixa exigência mecânica que estes magazines são submetidos, em decorrência do baixo peso dos talheres, fazem com que não seja necessário a utilização de materiais que tenham altas resistências mecânicas.

Buscando cada vez mais se tornar competitivo no mercado em conjunto com o aumento da demanda do equipamento visa-se, o estudo para substituição do material base utilizado para fabricação dos magazines, viabilizando através de testes nos quais esta peça está submetida no ambiente de trabalho diário.

O aumento da demanda nesses equipamentos, a busca por qualidade no produto e a grande disputa por preços competitivos no mercado, equilibrando com as grandes empresas estrangeiras, fazem com que empresas brasileiras busquem alternativas para manter uma boa relação custo/benefício em equipamentos voltados a indústria de descartáveis plásticos. O conjunto magazine é formado pelos seguintes itens relacionados na Fig. 1 e Tab. 1.

Figura 1 – Vista explodida do conjunto magazine.



Fonte: do autor (2019).

Tabela 1 – Itens do conjunto magazine.

Item	Posição	Quantidade
Base Magazine	1	1
Magazine Concha	2	2
Magazine Cabo	3	2
Barra Apoio	4	2
Barra Fixação	5	4

Fonte: do autor (2019).

Analisando a Fig.1 e Tab.1, é possível observar que possui uma diferenciação entre o magazine concha e cabo. Isso deve-se ao fato de que o talher utilizado nesse tipo de conjunto é o talher colher que possui forma construtiva diferente entre o cabo e a concha.

Devido à complexidade empregada na usinagem e a demora nos tempos empregados na produção, que geram elevados custos para sua fabricação, se faz necessário um estudo técnico-científico buscando a viabilidade no emprego de magazines fabricados via manufatura aditiva, utilizando impressoras 3D.

A validação de um material que possa ser passível de substituição trará grandes benefícios ao processo de fabricação dos magazines, visto isso, a inclusão da manufatura aditiva na indústria é de suma importância para os dias de hoje.

O estudo objetiva em analisar a viabilidade técnica, através de ensaios mecânicos, na implementação de um novo material para a fabricação de magazines utilizados para o empilhamento de talheres descartáveis em equipamentos que fazem a extração do produto nas injetoras, com intuito de implementar uma nova tecnologia ao equipamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONJUNTO MAGAZINE DE ALUMÍNIO

De acordo com Callister (2002), as ligas de alumínio não apresentam as mesmas características que o alumínio primário, isso deve-se a sua composição, microestrutura e tratamentos posteriores que são aplicados.

O alumínio utilizado na produção dos magazines atuais é ABNT 6063. De acordo com Alcoa (2010) uma das ligas mais utilizadas da série 6XXX, amplamente utilizada para aplicações que necessitam de um bom acabamento superficial. Por apresentar boa extrudabilidade a Liga 6063 T6 é muito utilizada em uma gama de aplicações oferecendo boa resistência a corrosão, facilidade de solda e ser passível de tratamento térmico, otimizando suas propriedades mecânicas.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

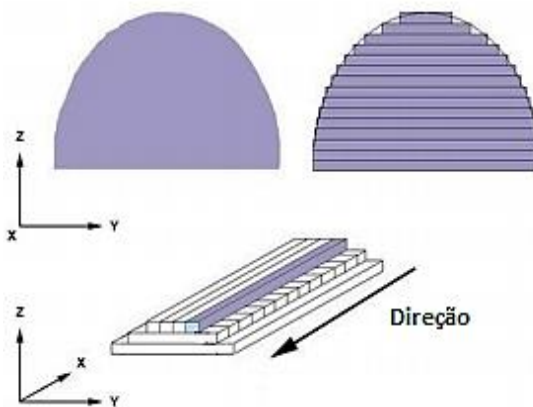
Para definir a nova tecnologia que será utilizada para a fabricação dos magazines, dá-se os aspectos relevantes que a constitui visando analisar o seu funcionamento e os parâmetros que afetam o seu funcionamento para um bom desenvolvimento de projeto.

2.2.1. Definição

Segundo Canessa, Fonda e Zennaro (2013) a manufatura aditiva teve início por volta do ano de 1980, apresentando elevado custo. O processo utilizado era muito parecido com o de deposição de termoplásticos fundidos até o final da peça, camada por camada.

A deposição de material nas camadas pode ser observada na Fig. 2, mostrando a organização e a direção intercalada feita pelo bico de extrusão.

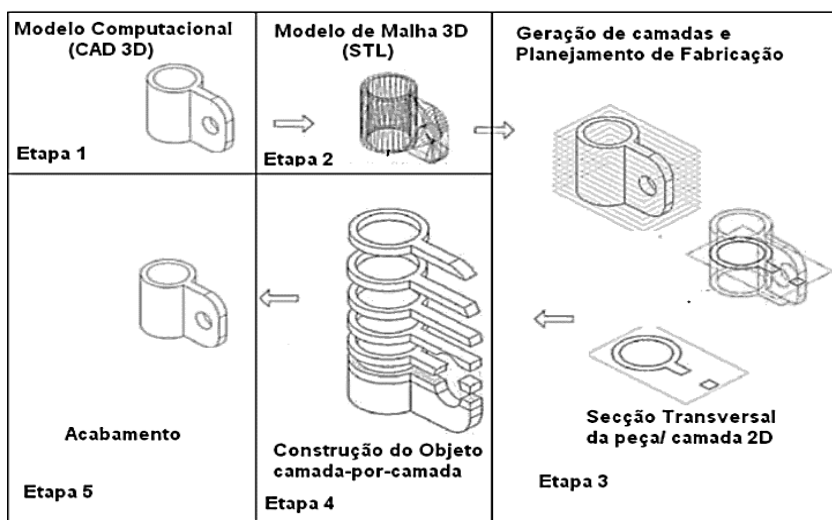
Figura 2 – Sequência de deposição dos termoplásticos.



Fonte: Adaptado de Canessa, Fonda e Zennaro (2013).

A Manufatura Aditiva é definida por Volpato (2007) como um processo de fabricação que utilizando a adição de matéria prima sucessivamente camada por camada, dá origem a geometrias obtidas em software 3D, desde de formas simples até peças com grande complexidade geométrica. A representação das etapas para confecção de uma peça impressa em 3D é mostrada na Fig. 3.

Figura 3 – Representação esquemática do processo FDM.



Fonte: Cunico (2013).

Para Gibson et al. (2009) e de acordo com a Fig. 3, o processo que inclui todas as etapas é representada por:

- **Modelagem geométrica:** Após definir a função que o produto vai exercer deve-se utilizar software CAD para a obtenção de formas geométricas tridimensionais definidas de acordo com a necessidade do usuário.
- **STL:** Após a modelagem geométrica deve-se obter um modelo que seja aceito pela tecnologia de manufatura aditiva, ele deve ser representado por uma malha de triângulos em um padrão adequado chamado de formato STL.
- **Transferência para o equipamento:** Partindo do STL, deverá ser analisado as escalas utilizadas, parâmetros de impressão, orientação da peça no ambiente demarcado e possíveis correções no STL para obter o resultado esperado.
- **Construção:** A construção da peça normalmente é automatizada, sendo função do operador apenas analisar possíveis avarias como a falta de matéria prima na alimentação da deposição e possíveis quedas de energia ou oscilações de componentes.
- **Finalização e pós-processamento:** Após a finalização da impressão, pode haver alguns procedimentos posteriores para a peça pronta, podendo ser apenas uma simples limpeza, tratamentos estéticos (pintura e superfície) ou tratamentos mecânicos (resistência e dureza).
- **Aplicação:** Nesta etapa a peça está pronta para ser inserida no contexto que foi projetada. Em casos onde as propriedades mecânicas dos materiais são importantes, deve-se analisar o comportamento em seu funcionamento, visto que, a manufatura aditiva não tem o mesmo comportamento que outro processo usual de manufatura teria em mesmas condições, pelo fato de que as peças impressas apresentam interstícios que reduzem as propriedades mecânicas.

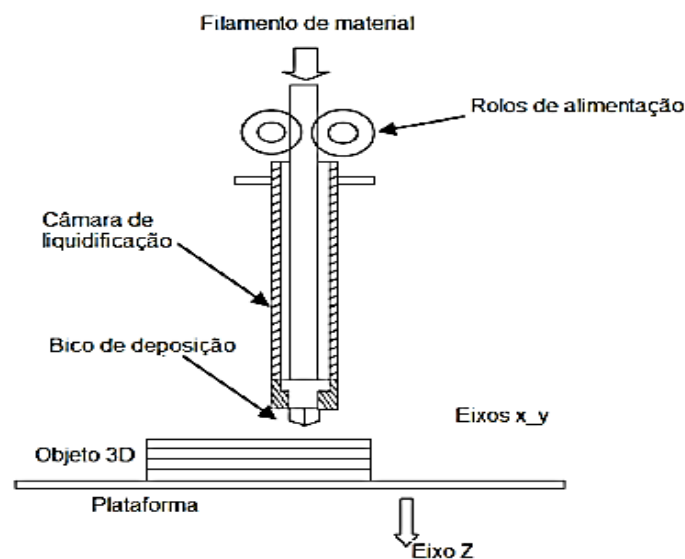
2.2.2. Processo FDM

Segundo Cunico (2013), outra classificação que pode ser utilizada para tecnologias em Manufatura Aditiva (AM) é baseada na utilização do material fundido. O Processo FDM (*Fused deposition modeling*) utiliza um filamento de material termoplástico que é movimentado para dentro de uma câmara de aquecimento,

geralmente com utilização de motores de passo, visando elevar a temperatura do material até que o mesmo atinja o ponto de transição vítrea.

A Fig. 4 demonstra o processo FDM representando desde a alimentação do filamento tracionados pelo rolo de alimentação até a câmara de aquecimento até o bico de deposição.

Figura 4 – Representação do processo FDM.



Fonte: Gibson (2005).

De acordo Volpato (2007), na construção de cada camada, o bico de alimentação como mostrado na Fig. 4, desloca-se no plano "XY" depositando o filamento do material após seu aquecimento. Quando uma camada é terminada, a máquina deslocasse no eixo "Z", numa distância pré-definida pelo programador da peça e assim o processo se dá até sua finalização.

Segundo Porto (2016), em 2016 houve um aumento de 32% na fabricação de impressoras 3D para uso pessoal devido ao crescimento no volume de vendas, ocasionando a redução de quase 20% no preço de venda.

De acordo com Pereira (2014) o processo FDM possui algumas vantagens e desvantagens. Entre as vantagens pode-se destacar a facilidade na troca das bobinas de filamento, pouco desperdício de material, facilidade de remoção do material de suporte à impressão, resistências próximas a 85% de peças injetadas. Para as desvantagens estão os tempos longos de impressão e o empenamento de alguns materiais, devido as altas temperaturas mesa/bico utilizadas para impressão dos materiais.

2.2.3. Utilização na indústria

De acordo com Almeida (2007) com o panorama do mercado atual, muitas ferramentas vêm sendo utilizadas visando a diminuição dos custos e evolução da competitividade no desenvolvimento de produtos. Dentre estas ferramentas as tecnologias de prototipagem rápida são fundamentais para tais objetivos.

Para Volpato (2007) a grande concorrência e complexidade em geometrias computacionais fez com que empresas adotem meios de produção diferentes para a confecção dos produtos, com isso, o objetivo seria de reduzir o tempo envolvido, elevando a qualidade e competitividade do produto.

Segundo Low et al. (2017) a inclusão da manufatura aditiva transformou a indústria de prototipagem e fabricação, pois a mesma, competia com os processos caros, complexos e demorados já utilizados, tornando-se uma alternativa para resolução de problemas.

2.3 SELEÇÃO DO TERMOPLÁSTICO

Para Da Silva (2018), os filamentos para impressoras do tipo FDM estão disponíveis nos mais variados materiais e cores. Os tipos mais comuns são o Ácido Láctico (PLA) e o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), porém, existem outros materiais como Policarbonato (PC), Politereftalato de Etileno (PET), Nylon ou Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG).

De acordo com Celentano (2003) o ABS é um termoplástico que pode apresentar diversas formas e cores. Por ser leve e rígido, suas características o fazem um bom material para diversas aplicações industriais. Dentre as características que se destaca estão: flexibilidade, resistência ao impacto e resistência a temperatura comparado aos demais termoplásticos. Para Wiebeck (2005) esses fatores fazem dele um ótimo polímero para trabalhar com elevados esforços mecânicos.

Para Reis (2016) o PETG a muito tempo é utilizado na indústria, sendo um termoplástico derivado do petróleo e possuindo características ecológicas. Em comparação com o ABS, possui características inferiores em relação a resistência a temperatura, sendo aplicado em peças que necessitam de bom encaixe com flexibilidade, transparência e alta resistência mecânica. O diferencial é que não possui contraindicações ao uso, sendo possível a reciclagem do produto.

Segundo Simões et al. (2009) o PLA é um termoplástico biodegradável, derivado de fontes renováveis como amido de milho e cana de açúcar, sendo um material que possui grande rigidez, resistência e alta dureza. A alta dureza envolvida faz com que o material não possua boa resistência ao impacto. O PLA é um dos materiais mais utilizados em impressoras 3D por ter baixa contração durante o processo de produção, fator que interfere muito na obtenção de peças com grandes tempos de impressão. É um material indicado para peças que não necessitem altas resistências mecânicas, atritos e alta temperatura.

As diversas características que os materiais podem ser solicitados são mostrados na Tab. 2, apresentando o desempenho comparativo para aplicações que exigem determinados desempenhos.

Tabela 2: Comparativos dos materiais mais utilizados.

Propriedade/Desempenho	Menor	Médio	Maior
Brilho	ABS	PLA	PETG
Transparência	ABS	PLA	PETG
Rigidez/Dureza	PETG	ABS	PLA
Resistência a impactos	PLA	ABS	PETG
Flexibilidade	PLA	ABS	PETG
Contração/Warp	PLA	PETG	ABS
Precisão em detalhes	ABS	PETG	PLA
Qualidade de superfície da peça	ABS	PETG	PLA
Resistência a atritos	ABS	PETG	PLA
Resistência química	ABS	PLA	PETG
Resistência a altas temperaturas	PLA	PETG	ABS
Facilidade de pós processamento	PLA	PETG	ABS
Densidade	ABS	PLA	PETG

Fonte: Adaptado de <https://3dlab.com.br/comparativo-filamentos-para-impressora-3d/> - Laerte Junior (2019).

A Tab. 2 apresenta o melhor desempenho para a utilização dos termoplásticos ABS, PLA e PETG elencando as propriedades relevantes aplicadas a manufatura aditiva e os respectivos materiais em ordem de grandeza na aplicação.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão abordados os ensaios mecânicos e tribológicos para caracterização dos materiais utilizados nos testes, alteração do projeto, simulações em software de modelagem 3D, impressão dos modelos via manufatura aditiva e aplicação do protótipo no equipamento para validação do estudo.

3.1 ENSAIOS MECÂNICOS

3.1.1. Ensaio de tração

Para o ensaio de tração, foram produzidos três corpos de prova para cada análise realizada, somando 15 corpos, conforme Tab. 3.

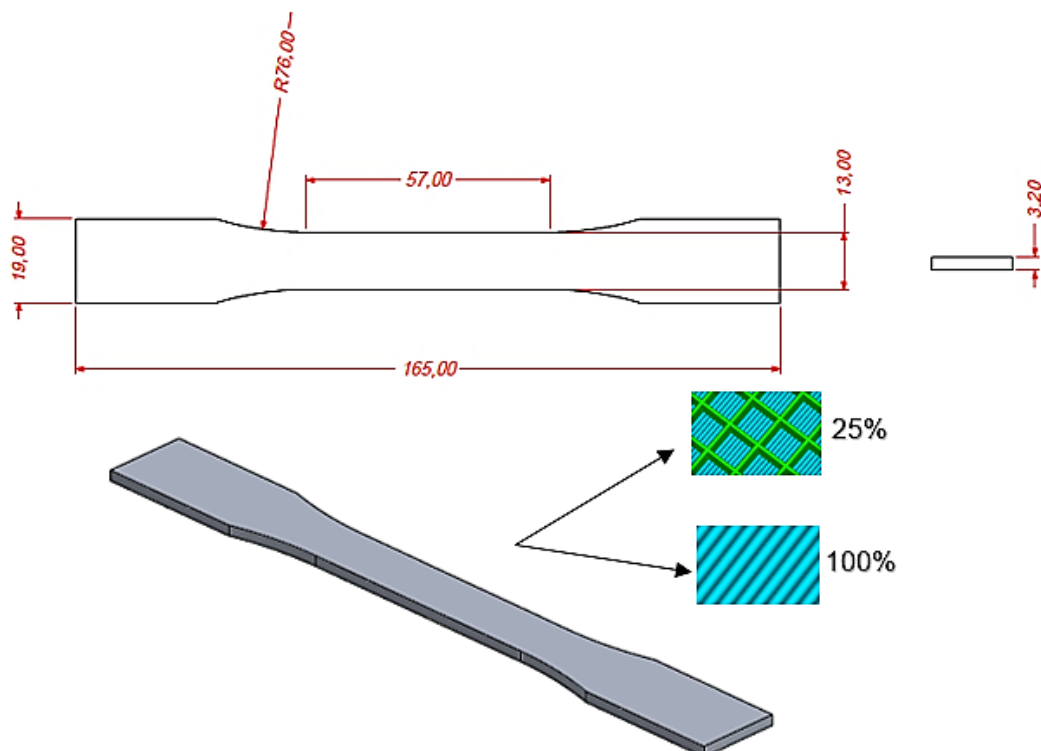
Tabela 3: Corpos de prova de tração.

Denominação	Quantidade	Material/ <i>Infill</i>
Corpo de prova 1	3	PLA - 25%
Corpo de prova 2	3	PLA - 50%
Corpo de prova 3	3	PLA - 75%
Corpo de prova 4	3	PLA - 100%
Corpo de prova 5	3	Alumínio

Fonte: do Autor (2019).

Como serão analisados dois materiais, com a Tab. 3, nota-se que o material PLA está sofrendo variação no seu “*infill*” com objetivo de analisar a influência na caracterização mecânica. As dimensões dos corpos de prova utilizados foram obtidas conforme a norma ASTM D638-1, ilustrados na Fig. 5.

Figura 5 – Dimensões do Corpo de Prova para ensaio de tração.



Fonte: do Autor (2019).

Como é aplicado uma variação no “infill” conforme Fig. 5, dos corpos impressos, os demais parâmetros utilizados para fabricação dos modelos devem manter-se constantes para a validação do estudo. Na Tab. 4, mostra-se as variáveis utilizadas para a confecção dos modelos.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para impressão dos corpos de prova.

Densidade (INFILL)	Temperatura Bico (°C)	Temperatura Mesa (°C)	Espessura de Camada (mm)	Velocidade de Impressão (mm/s)
25%	220	80	0,3	80
50%	220	80	0,3	80
75%	220	80	0,3	80
100%	220	80	0,3	80

Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Tab. 4, pode-se observar que os parâmetros de temperatura e velocidade de impressão permaneceram fixos para uma melhor análise dos ensaios realizados. Todos os corpos de prova foram preparados para impressão utilizando o software *Simplify 3D*®, onde se executa a conversão do modelo em 3D para a efetiva manufatura na impressora 3D.

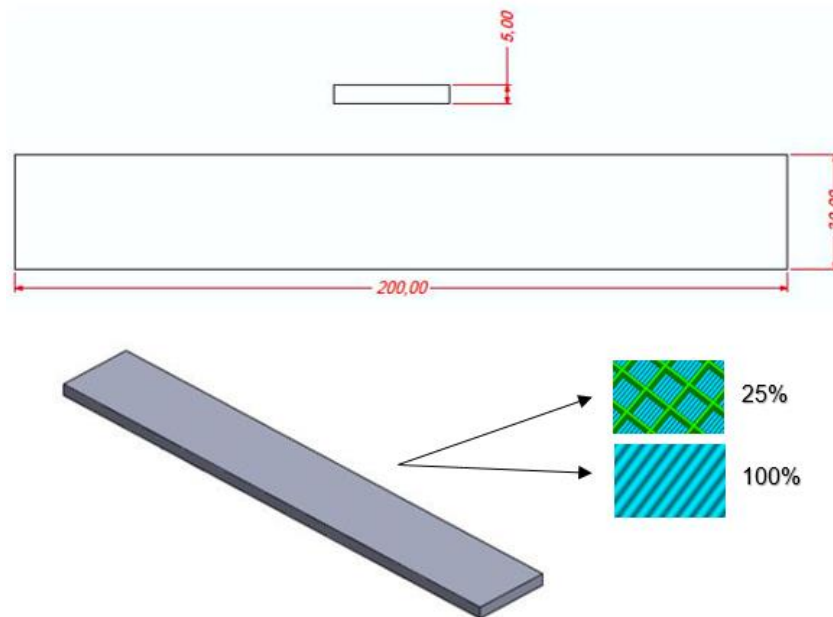
Os corpos de prova de alumínio foram manufaturados no equipamento de usinagem *Romi Discovery*® 1250, com as mesmas dimensões dos fabricados via manufatura aditiva.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Departamento de Materiais da Faculdade SATC, em uma máquina universal de ensaios mecânicos, marca *EMIC*, modelo DL10000 com capacidade de 100 KN e velocidade de ensaio de 20 mm/min.

3.1.2. Ensaio de flexão

Para o ensaio de flexão, as quantidades, os equipamentos utilizados e os parâmetros de impressão se mantiveram inalterados em relação aos utilizados nos ensaios de tração. Na Fig. 6, mostra-se as medidas do corpo de prova que foi utilizado para os testes.

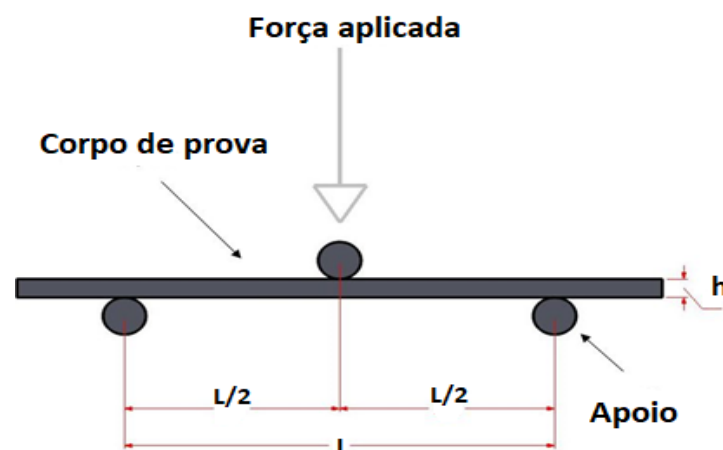
Figura 6: Dimensões do Corpo de Prova para ensaio de flexão.



Fonte: do Autor (2019).

O ensaio de flexão utilizado para a caracterização dos materiais foi o de três pontos, utilizando a norma ASTM D790 para os cálculos de posicionamento e velocidades de ensaio aplicados, utilizando uma flecha definida para obter as tensões. A Fig. 7, demonstra o ensaio com três pontos na flexão do material.

Figura 7 – Ensaio de 3 pontos.



Fonte: do Autor (2019).

Para realização do ensaio utilizou-se equações com base na norma para definir o espaçamento “L” entre os pontos de apoio, de acordo com a Eq. 1 que utiliza dados do corpo de prova e procedimentos adequados para diferentes tipos de material para determinação da medida.

$$L = \sqrt{\frac{6 \cdot h \cdot R}{Z}} \text{ [mm]} \quad (1)$$

Onde:

L – Espaçamento entre os pontos de apoio (mm)

h – Altura do corpo de prova (mm)

R – Velocidade do ensaio (mm/min)

Z – Taxa de deformação definida de acordo com o material (mm/mm/min).

Para definição da tensão de flexão para corpos de prova retangulares foi utilizado a Eq. 2 baseado na norma ASTM D790 que relaciona a carga utilizada no ensaio com a distância dos pontos de apoio e as medidas do corpo de prova.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Onde:

σ_f – Tensão de flexão (MPa)

P – Carga (N)

L – Distância entre os apoios (mm)

b – Largura do corpo de prova (mm)

d – Espessura do corpo de prova (mm).

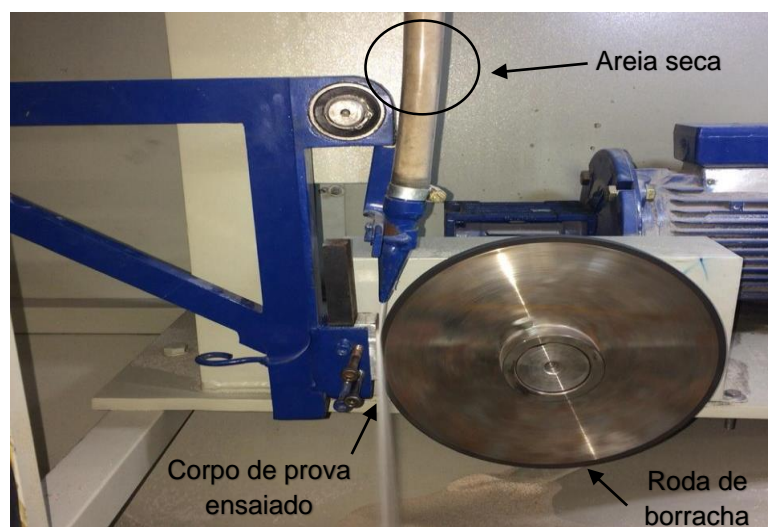
Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Departamento de Materiais da Faculdade SATC, em uma máquina universal de ensaios mecânicos, marca *EMIC*, modelo DL10000 com capacidade de 100 KN e velocidade de ensaio de 20 mm/min; utilizando um dispositivo de flexão por três pontos conforme Fig. 7.

3.1.3. Ensaio de desgaste por roda de borracha

Para caracterizar o tipo de abrasão ativa do material em estudo, utilizou-se o ensaio segundo a norma ASTM G65, utilizando areia seca visando obter a taxa de desgaste do material anteriormente utilizado e o novo a ser incluído no processo produtivo.

Este ensaio tem como princípio a deposição de areia em queda livre no corpo de prova em estudo, que fica aprisionado em um braço mecânico. O método de funcionamento baseia-se em esmerilhar o corpo de prova com a areia depositada, cuja composição e tamanho de grão são controlados. O corpo de prova fica em contato com a roda de borracha e a areia é depositada entre os dois elementos, conforme Fig. 8.

Figura 8 – Equipamento para ensaio de desgaste por roda de borracha.



Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a norma ASTM-G65 (2016), os parâmetros de funcionamento do ensaio, foram os descritos conforme Tab. 5, onde relaciona as características do ensaio tanto do equipamento, quanto da areia utilizada.

Tabela 5: Parâmetros do ensaio

Variável	Valor
Vazão do abrasivo	380 g/min
Força Aplicada	45 N
Tempo de cada ensaio	6 min
Quant. Corpos por Material	3
Granulometria do abrasivo	30 mesh
Rotação da Roda	30 rpm
Diâmetro da Roda	210 mm
Abrasão Linear	356,26 m

Fonte: Baseada ASTM-G65 (2018).

Os dados da Tab. 5 foram modificados para satisfazer o ensaio realizado. A rotação utilizada para o ensaio normalizada é de 200 rpm, porém, por estar ensaiando o termoplástico PLA que apresenta alto nível de desgaste, foi reduzido a

velocidade para 30 rpm. O tempo de ensaio também foi reduzido de 30 minutos sem interrupção, para três intervalos de 6 minutos, visando analisar o comportamento do desgaste ao longo do ensaio.

Para realização do teste, primeiramente realizou-se a limpeza dos corpos de prova com álcool etílico, em seguida, coletou-se a massa inicial do corpo utilizando uma balança de precisão. Para realização do ensaio foi deixado por seis minutos o corpo de prova no equipamento para analisar o desgaste e posterior pesagem da massa final do corpo em estudo, com o uso de uma balança de precisão com capacidade de 3 kg e resolução de 0,001 g. O procedimento foi repetido por 3 vezes para cada corpo de prova, totalizando 18 minutos para cada corpo de prova ensaiado, levando em consideração o cuidado de montar o corpo de prova em cada troca na posição correta. Para a análise de perda volumétrica foi utilizado a Eq. 3 para o cálculo da perda de volume conforme a norma ASTM G65-4.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{d} \cdot 1000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3)$$

Onde:

ΔV – Volume perdido (mm³);

Δm – Perda de massa (g);

d – Densidade (g/cm³).

O coeficiente de desgaste do material é obtido através da equação de Archard (1953), relacionando o volume perdido com a dureza do material por unidade de abrasão linear e a carga padronizada aplicada ao corpo de prova. A equação Eq.4 é utilizada para determinação da variação do volume.

$$\Delta V = \frac{K \cdot F_n \cdot S}{H} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (4)$$

Onde:

ΔV – Volume perdido (mm³)

S – Deslizamento linear (mm)

F_n – Carga nominal aplicada (N)

H – Dureza do material de menor dureza (N/mm²)

K – Coeficiente de desgaste (adimensional <1)

Trabalhando com a equação acima, pode-se obter a taxa de desgaste (k) que correlaciona as propriedades de desgaste e de dureza, conforme Eq. 5.

$$k = \frac{K}{H} \text{ [Adimensional]} \quad (5)$$

Com a união das duas equações é possível obter a taxa de desgaste do material, calculado com a Eq. 6.

$$Q = \frac{\Delta V}{N \cdot S} \text{ [mm}^3\text{/Nm]} \quad (6)$$

Onde:

V – Volume perdido (mm^3)

Q – Taxa de desgaste ($\text{mm}^3\text{/Nm}$)

N – Carga aplicada (N)

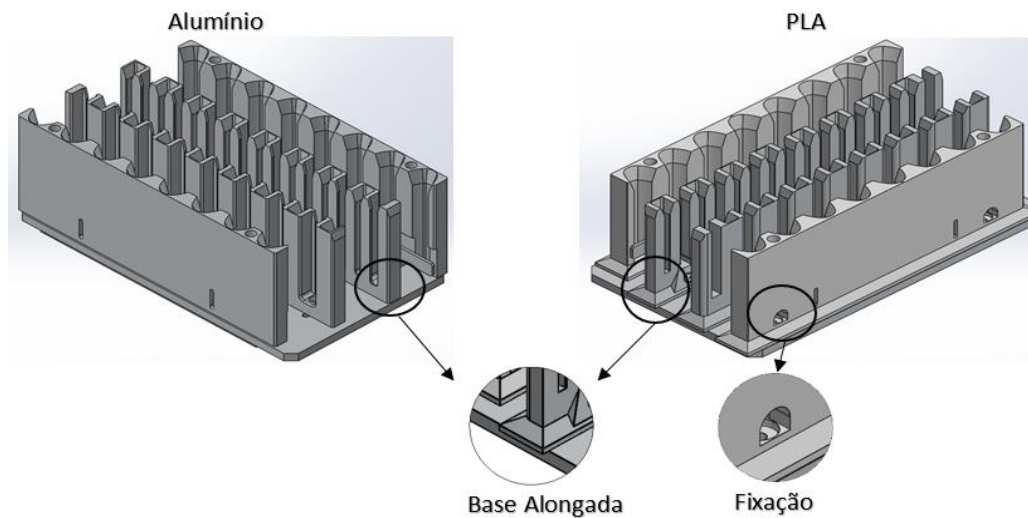
S – Deslizamento linear (mm)

3.2 READEQUAÇÃO DO PROJETO 3D

Para a implementação da manufatura aditiva, algumas modificações no projeto do magazine foram necessárias, pelo fato de ser um processo produtivo diferente do processo de usinagem de peças, que é realizado no alumínio.

Para a alteração do projeto utilizou-se o software *SOLIDWORKS*®, para realizar a conversão do modelo visando adequação para a impressão 3D. A estrutura do magazine utilizado sofreu algumas alterações conforme é observado na Fig. 9.

Figura 9 – Alterações realizadas no conjunto magazine.



Fonte: do Autor (2019).

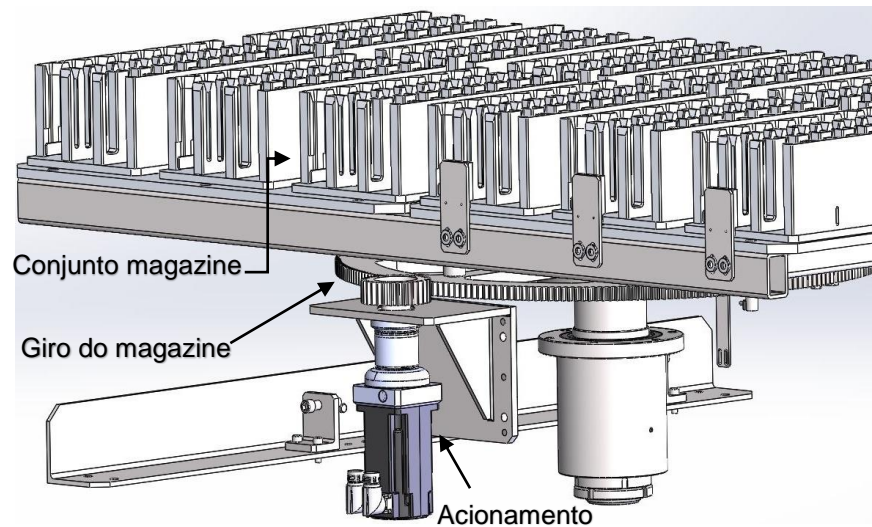
De acordo com a Fig. 9, pode-se observar algumas modificações que foram realizadas no magazine para sua conversão ao impresso, alongando a base para facilitar a impressão, além de um rasgo para auxiliar a fixação entre porca e parafuso na base de metal que fica abaixo dos magazines.

3.3 SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS ENVOLVIDOS

Para melhor avaliar a viabilidade de aplicação do magazine impresso no equipamento, buscou-se aproximar um estudo de ordem prática para um possível problema que pode ocorrer no ambiente de funcionamento. O magazine após ter sido preenchido por talheres, rotaciona, para que o outro lado seja utilizado.

Em uma possível perda de passo da engrenagem que é acionada pelo servo motor conforme Fig. 10, a colisão é inevitável, visto que, para a entrega do talher, o braço de transferência entra com suas cavidades do conjunto magazine, que deve estar na posição correta.

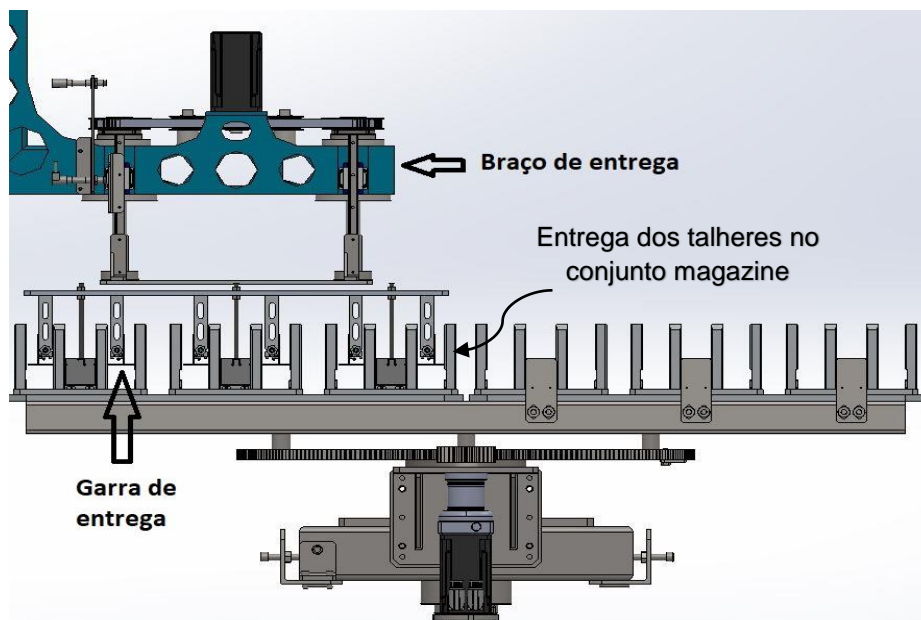
Figura 10 – Acionamento giro do magazine.



Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Fig. 10, mostra-se a engrenagem movida e motora para o giro do magazine no momento em que tenha um lado preenchido de talheres. A possível colisão é ocasionada na descida da entrega dos talheres, conforme Fig. 11.

Figura 11: Conjunto braço de transferência.



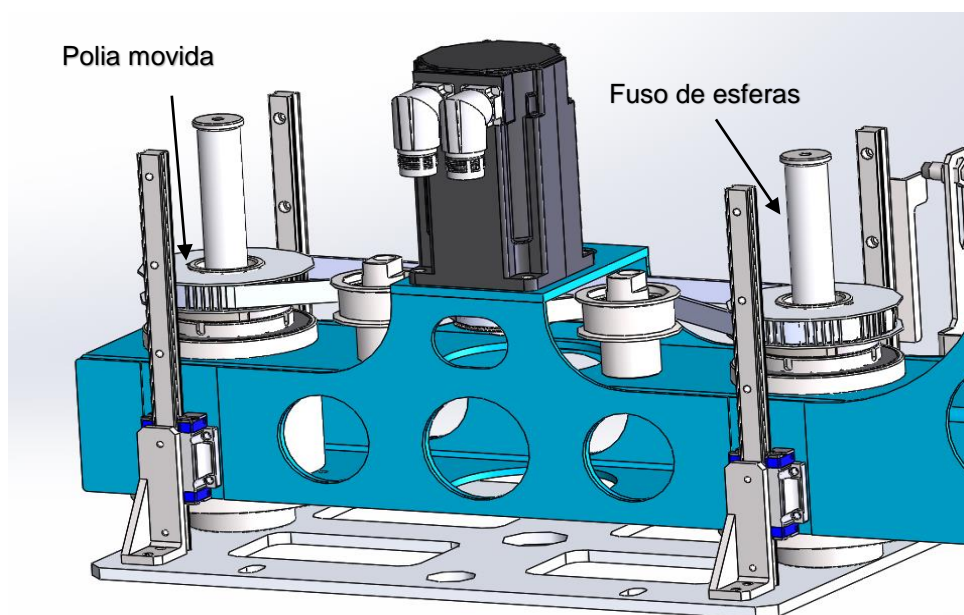
Fonte: do Autor (2019).

A Fig. 11 mostra que no momento da entrega dos talheres no magazine, o braço de entrega adentra no conjunto magazine para a acomodação do talher, caso o magazine esteja desalinhado, ocorre a colisão entre o magazine e a garra.

Para definição da simulação a ser executada, foi analisado os possíveis locais que podem ser atingidos pelo braço de entrega, ocasionado pela perda de posição da engrenagem movida. Como não é possível prever o local de contato, o estudo se baseia em aplicar uma força unitária em um ponto aleatório, que pode ser qualquer local da parte superior do magazine, visando obter as tensões máximas que podem ser exercidas analisando a resistência do conjunto nesse esforço mecânico.

Para a definição da força aplicada, foram analisados o torque e o avanço do fuso que estão em funcionamento no equipamento, para que possa determinar, através do estudo via parafusos de potência, qual a carga aproximada que seria aplicada no magazine. A Fig. 12 mostra o acionamento que é utilizado no equipamento.

Figura 12 – Acionamento da entrega dos talheres.



Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Fig. 12, o servo motor é responsável pela entrega dos talheres no conjunto magazine, desta forma, a polia motora aciona outras duas polias movidas que estão acopladas a um fuso de esferas que é o responsável por transmitir o movimento ao conjunto. Para o cálculo da força aplicada, utilizou-se o conceito de parafusos de potência. Os dados obtidos para o cálculo da força aplicada estão dispostos na Tab. 6.

Tabela 6 – Dados do acionamento.

Parâmetros	Valor
Torque Max Servo motor (N.m)	3,42
Torque Atingido (N.m)	1,12
Polia Motora (mm)	57,30
Polia Movida (mm)	95,35
Rotação do Fuso (rps)	3,00
Diâmetro do Fuso (mm)	25,00
Passo do Fuso (mm)	25,00
Avanço do Fuso (mm/s)	75,12
Força (Kgf)	29,39

Fonte: do Autor (2019).

Os dados de torque e avanço elucidados na Tab. 6 são utilizados para o cálculo da carga pela Eq. 7 que utiliza parâmetros do sistema de acionamento para analisar os esforços envolvidos no processo, possibilitando assim a simulação do modelo.

$$T = \left[\frac{P}{2} \cdot \frac{Dp(\mu \cdot \pi \cdot Dp - L \cdot \cos(\alpha))}{(\pi \cdot Dp \cdot \cos(\alpha) + \mu \cdot L)} \right] + \mu c \cdot P \cdot \frac{Dc}{2} \text{ [N.m]} \quad (7)$$

Onde:

T – Torque (N.m)

P – Carga (N)

μ – Coeficiente de atrito do fuso

μc – Coeficiente de atrito da castanha

Dp – Diâmetro médio do parafuso (m)

Dc – Diâmetro médio da castanha (m)

L – Avanço do fuso (m)

α – Ângulo do fuso de esfera.

A Eq. 7 relaciona parâmetros do fuso de acionamento e da castanha montada no conjunto, utilizando dados de perdas por atrito, avanço e tipo de rosca utilizada, buscando encontrar a carga que é resultada do movimento do conjunto.

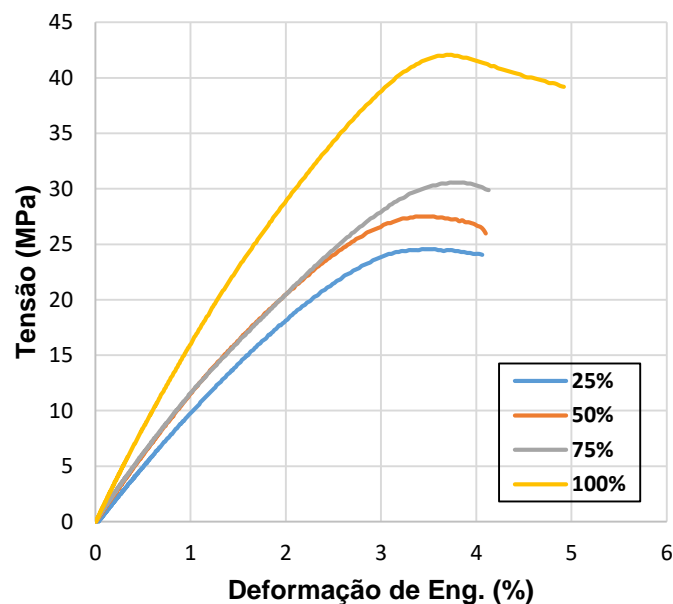
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados apresentados a seguir serão elucidados por capítulos, iniciando pelos ensaios de tração e flexão, ensaio de desgaste, simulação via software.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Após a realização do ensaio destrutivo de tração, os dados fornecidos pelo equipamento foram tabulados via *EXCEL*[®], onde, foi possível traçar o gráfico tensão x deformação do alumínio e das amostras de PLA, conforme Fig. 13.

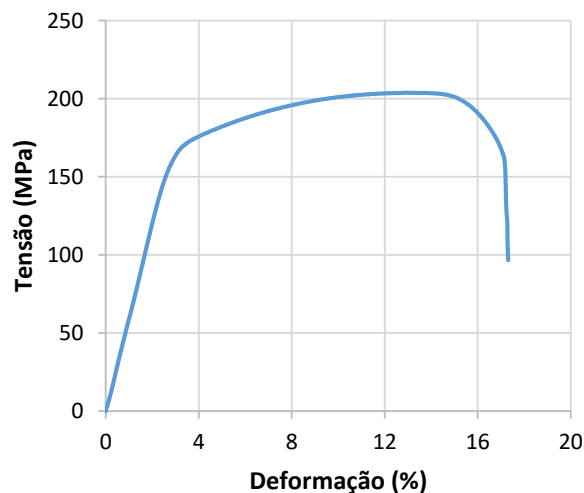
Figura 13 – Gráfico comparativo com variação de “infill” do PLA.



Fonte: do Autor (2019).

Analisando a Fig. 13, pode-se observar que o comportamento do termoplástico para as variações de preenchimento de 25 %, 50 % e 75 % apresentaram um comportamento de resistência mecânica menor que o corpo de 100 %; isso se deve as regiões que ficam com interstícios no interior da peça, reduzindo as suas propriedades mecânicas.

Figura 14 – Tensão x deformação do alumínio 6063.



Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Fig. 14, é possível observar que o alumínio possui maior resistência que o PLA, isso se deve as características dos materiais e aplicação com que os dois estão inseridos. A Tab. 7 mostra os resultados obtidos através do ensaio de tração, com as principais características dos materiais analisados, visando caracteriza-los para uma melhor seleção na produção dos protótipos via manufatura aditiva.

Tabela 7 – Resultados ensaio de tração.

Preenchimento (Infill)	σ_p (MPa)	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	U_t (N·mm/mm ³)	U_r (N·mm/mm ³)
25%	11,51	22,85	24,54	25,40	0,04	4	0,68	0,32
50%	10,49	24,97	27,51	28,45	0,04	4	0,75	0,33
75%	12,95	28,27	30,55	31,68	0,04	4	0,86	0,43
100%	17,43	36,06	42,06	43,49	0,05	5	1,39	0,48
Alumínio	142,95	160,13	203,72	230,15	0,17	17	31,16	2,29

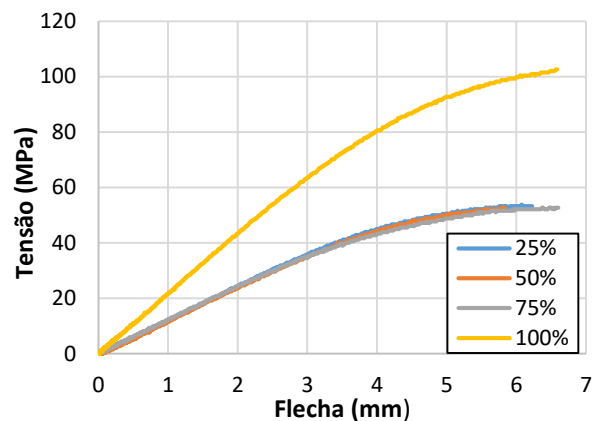
Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Tab. 7, podemos perceber que a variação da densidade do PLA, influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas. Nota-se que utilizando o preenchimento completo de 100 %, a tensão de escoamento é por volta de 58 % maior que o preenchimento de 25 %, evidenciando que a utilização de uma quantidade menor de material afeta o desempenho do mesmo. Outro ponto a ser observado é que o maior valor de tensão de escoamento obtido pelo PLA representa 22,5 % da tensão encontrada para o alumínio.

4.2 ENSAIO DE FLEXÃO

Para os ensaios de flexão realizados, se utilizou a Norma ASTM D790, no qual estabelece algumas condições para a distância entre os pontos de apoio do corpo de prova. A Eq. 1 foi utilizada para definir a distância e dar procedimento no ensaio.

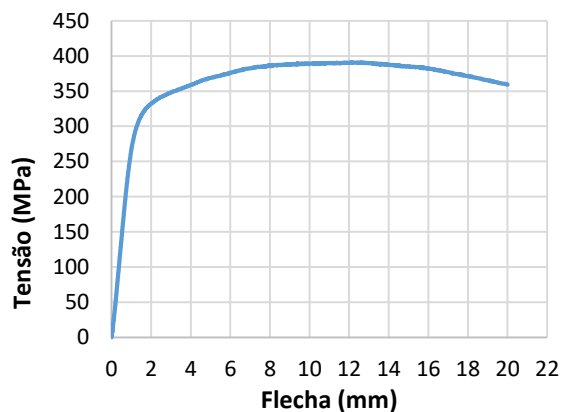
Figura 15: Tensão x flecha com variação de “infill” do PLA.



Fonte: do Autor (2019).

A Fig.15 demonstra que para os preenchimentos de 25 %, 50 % e 75 %, as propriedades em relação a flexão do material, permanecem inalteradas. O preenchimento de 100 % teve um bom desempenho comparado aos demais, obtendo valores acima da média. O mesmo teste foi feito com o alumínio, conforme Fig. 16.

Figura 16 – Tensão x flecha do alumínio 6063.



Fonte: do Autor (2019).

A Fig.16, mostra a elevada resistência a tensão de flexão do alumínio se comparado ao PLA, onde o mesmo apresenta uma pequena deformação elástica. Os

dados foram colhidos e processados com o auxílio do software *EXCEL*[®], visando obter os limites de resistência máxima a flexão, força máxima a flexão e tenacidade, conforme Tab. 8.

Tabela 8: Resultados obtidos do ensaio de flexão.

Preenchimento (<i>Infill</i>)	F _{max} (N)	σ _f _{max} (MPa)	M _t (N·mm/mm ³)	L (mm)
25%	347,04	53,22	0,12	77,46
50%	339,96	52,67	0,11	77,46
75%	343,50	53,22	0,14	77,46
100%	683,46	105,33	0,34	77,46
Alumínio	2521,40	390,61	1,85	77,46

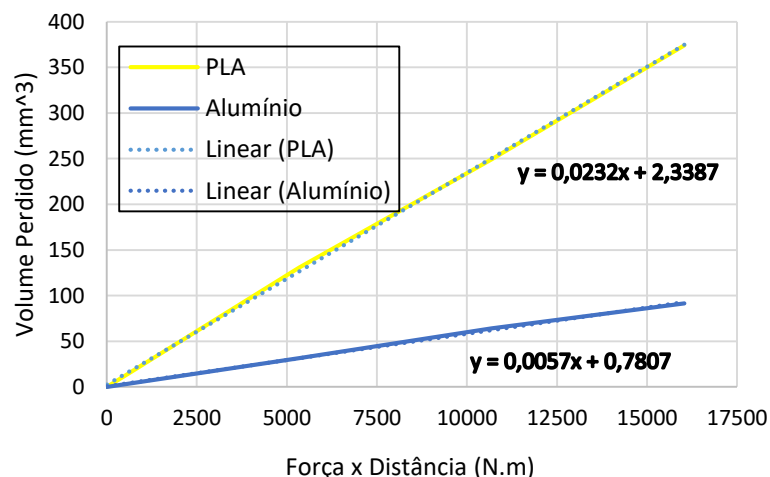
Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Tab.8, as variações de preenchimento até 75 % não surtiram efeito em relação a algum ganho em resistência máxima, mostrando que em análises de flexão do PLA, o “*infill*”, não teve influência direta no ganho de resistência à flexão da peça impressa. Para o preenchimento de 100 %, houve um aumento de resistência e um ganho significativo de tenacidade do material. Para a resistência máxima observada, o PLA de 100 %, sendo o de melhor desempenho, representou cerca de 27 % do obtido pelo alumínio.

4.3 ENSAIO DE ABRASÃO

Após a realização do ensaio, foi analisado a taxa de desgaste que ocorreu nos corpos em estudo, analisados conforme Fig. 17.

Figura 17 – Taxa de desgaste comparativo entre PLA e Alumínio.



Fonte: do Autor (2019).

A partir da Fig. 17, é possível observar que o desgaste do PLA em relação ao alumínio é elevado, apresentando uma taxa de desgaste de quatro vezes maior. A Tab.9 mostra os resultados para a taxa de desgaste dos materiais analisados.

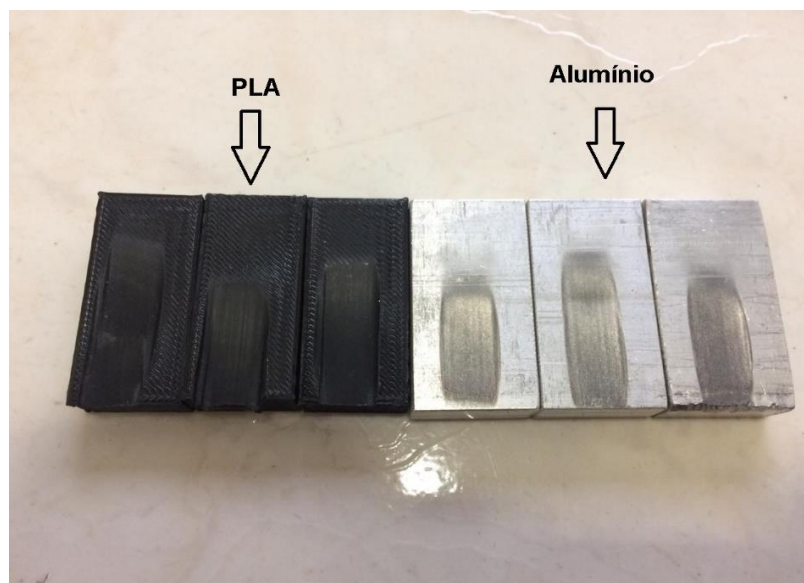
Tabela 9 – Resultados ensaio de abrasão.

Corpo de prova	Taxa de desgaste (mm³/N.m)
Alumínio	0,005704578
PLA	0,023341075

Fonte: do Autor (2019).

Analisando a Tab. 9, foi observado a grande diferença entre as taxas de desgaste obtida no ensaio conforme Fig. 17, e identificada nos corpos de prova que foram retirados do equipamento após o ensaio, visualizando a influência da abrasão nos dois materiais, de acordo com a Fig. 18.

Figura 18 – Corpos de prova após a realização do ensaio.



Fonte: do Autor (2019).

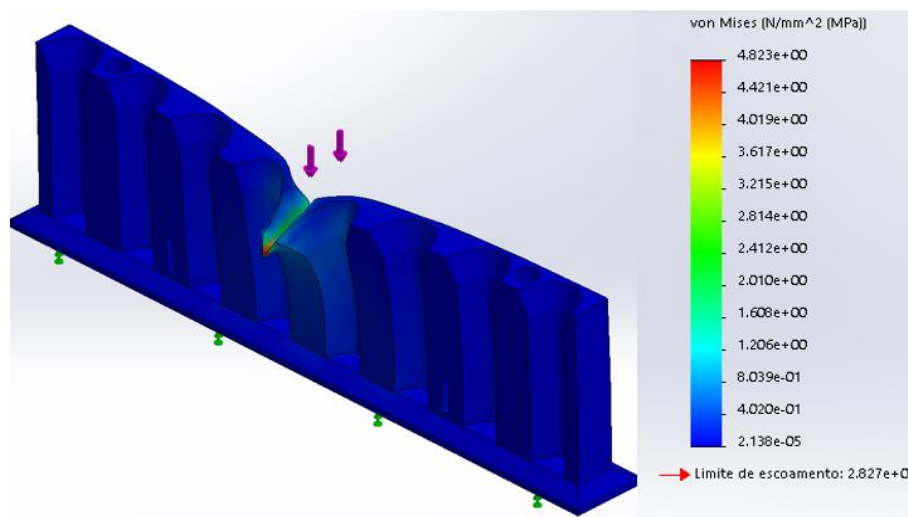
Após o ensaio realizado, conforme Fig. 18, notasse que o PLA apresentou um desgaste visivelmente maior que o alumínio, confirmando os dados obtidos e relacionados Tab. 9.

4.4 SIMULAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS

A realização da simulação se baseou em aplicar uma carga estática no ponto mais frágil da parte superior do magazine e analisar os esforços envolvidos no processo. Uma das modificações feitas no projeto após análises feitas, foi diminuir a altura do magazine cabo, com intuito de focar todos os esforços em um possível contato com o magazine concha, pois, o magazine cabo possui regiões com alta fragilidade, devido a sua geometria e não suportaria cargas mais elevadas. Para o estudo foi considerado o magazine com preenchimento de 75 %, buscando um equilíbrio entre as tensões encontradas e o tempo de impressão de cada um dos preenchimentos, conforme Fig. 19.

Para a execução da simulação foi utilizado o software *SOLIDWORKS*®, aplicando um material ao modelo 3D com as tensões encontradas através dos ensaios mecânicos de tração, flexão e desgaste que caracterizaram o PLA, visando obter resultados confiáveis e que sejam similares ao modelo real.

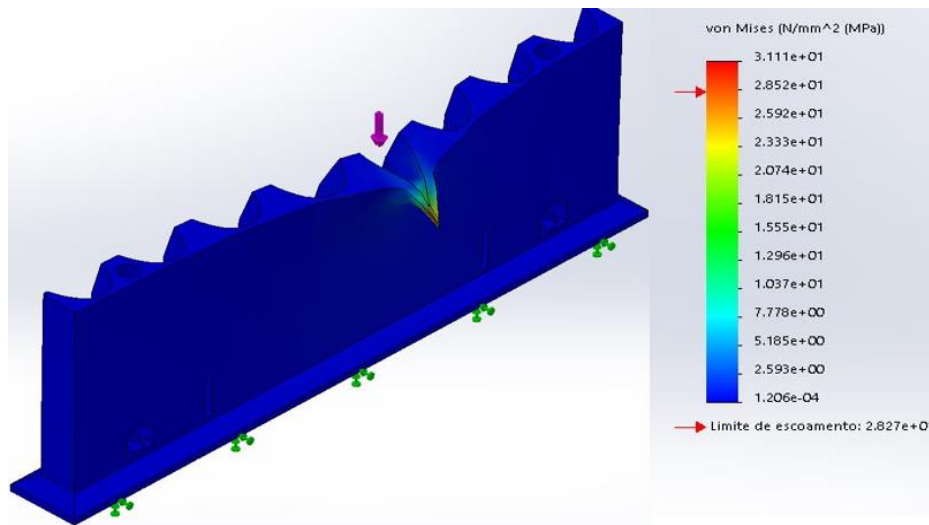
Figura 19 – Simulação no ponto de maior resistência.



Fonte: do Autor (2019).

Conforme Fig.19, no ponto de maior resistência que fica entre as cavidades do alojamento dos talheres, a tensão provocada pela força aplicada não ultrapassa a tensão de escoamento do material, porém, pela pequena espessura da chapa que entrará em contato com a peça, deve-se analisar o ângulo de entrada do talher para avaliar se o magazine manteve sua integridade.

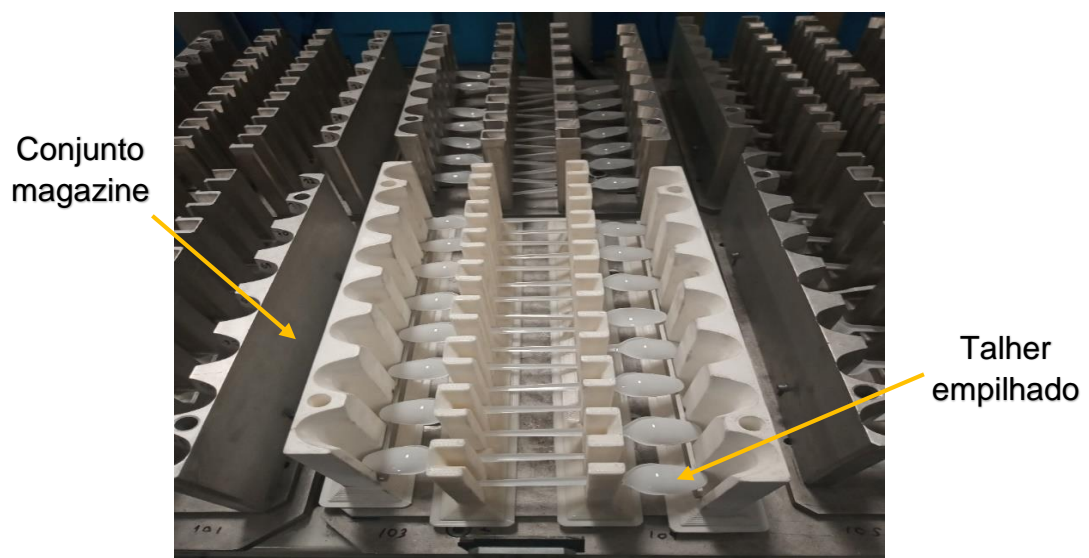
Figura 20 – Simulação no ponto crítico.



Fonte: do Autor (2019).

Pela simulação realizada é possível analisar, conforme Fig. 20, que a colisão provocada pelo equipamento irá danificar o magazine ultrapassando o limite elástico do mesmo. Para validação do estudo foi aplicado o conjunto no equipamento em funcionamento conforme Fig. 21.

Figura 21 – Mandril impresso em funcionamento.



Fonte: do Autor (2019).

De acordo com a Fig. 21, pode-se observar que após a extração, o magazine cumpriu com os requisitos do equipamento e mostrou boa funcionalidade na acomodação dos talheres.

5. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento do estudo chegou-se as seguintes conclusões:

- A seleção do PLA como matéria prima atendeu a demanda de exigência química e mecânica do processo como um todo, pois, não contamina os produtos que sejam encaminhados a embalagem.
- A variação de densidade “*infill*”, eleva a tensão de escoamento (σ_e), onde um preenchimento de 100 % possui uma tensão (σ_e) de 36,06 MPa, sendo 58 % maior que a tensão encontrada para o preenchimento de 25% que apresentou tensão (σ_e) de 22,85 MPa. Já para a tensão máxima (σ_{max}) do material, o comportamento é semelhante, onde o preenchimento de 100 % apresentou uma tensão (σ_{max}) de 42,06 MPa sendo 71 % maior que a tensão encontrada para o preenchimento de 25% que apresentou tensão (σ_{max}) de 24,54 MPa; porém, aumenta de forma linear quanto a tenacidade (U_t) e resiliência (U_r).
- Em tensões cisalhantes, que flexionem o material, qualquer densidade que seja de até 75 %, apresenta uma baixa resistência ao cisalhamento e uma baixa tenacidade comparado a um modelo que seja totalmente preenchido com “*infill*” de 100 %.
- Apesar do fato do PLA ter um elevado desgaste abrasivo, as diferentes características entre os dois materiais ainda o torna viável para aplicação ao magazine, visto que o desgaste no qual o mesmo está submetido na prática, é baixo.
- No conjunto magazine que o talher fique com pouca folga e acabe exercendo atrito elevado, deve-se aumentar a espessura de parede do magazine, pela alta taxa de desgaste que o mesmo apresentou nos ensaios abrasivos.
- Com a simulação realizada, percebe-se que com o torque do conjunto em funcionamento, em uma possível colisão, deve inutilizar o magazine se o contato ocorrer em regiões críticas, ocasionando uma substituição por uma nova peça.
- Outro ponto a ser observado foi a percepção da melhoria no projeto do magazine, direcionando os possíveis impactos para o magazine concha, diminuindo a altura do magazine cabo, por ser o modelo mais frágil em uma colisão.
- A variação do *infill* é um fator relevante para o tempo de impressão do modelo, onde o preenchimento de 25 % pode reduzir 4 vezes o tempo de impressão em comparação com um modelo completamente preenchido com *infill* de 100 %.

- Apesar de o modelo com “infill” de 100 % ser o de melhor desempenho após os ensaios realizados, o modelo selecionado para impressão foi o de 75 % que apresentou um equilíbrio entre as resistências mecânicas encontradas e o tempo de impressão dos magazines.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcoa, “Perfis extrudados de alumínio – Ligas e temperas de extrusão”, catálogo, São Paulo – SP, 2010.

Almeida, W. J. “Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos”. Tese (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Archard, J. F., 1953 “Contact and Rubbing of Flat Surface”, Journal of Applied Physics”. pp. 981–988.

ASTM D638-99, “Standard test method for tensile properties of plastics”. 1999.

ASTM D790, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials". 2007.

ASTM G65, “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.” 2001.

Callister Jr, William D. “Ciência e engenharia de materiais: uma introdução”, 2002.

Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M. (2013). “Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development”, Trieste – Itália, 2013.

Celentano CGJTD. “Caracterización mecánica de materiales termoplásticos de uso en componentes de refrigeradores”, 3º Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales, 2003, Argentina, p. 298-301.

Cunico, M., 2013, “Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formação seletiva de compósito”. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo USP, São Paulo.

Da Silva, A. F. B. M. “Impressora FDM tipo Delta: estudo de impressão de cor e comparação de propriedades”, Portugal - Porto, 2018.

Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. “Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing”, Nova York: Springer, 2009.

Low, Z.; Chua, Y. T.; Ray, B. M.; Mattia, D.; Metcalfe, I. S.; Patterson, D. A., 2017, “Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related

unconventional fabrication techniques. Journal of Membrane Science”, Journal of Membrane Science, pp. 523.

Pereira, F. D. A. S. “Desenvolvimento de um cabeçote para extrusão de Filamento Fundido Aplicado a Manufatura Aditiva”, Campinas, 2014.

PORTO, L. “Mercado De Impressoras 3d Cresce Em 2016”. ABRADISTI. Disponível em: <http://www.abradisti.org.br/blog/mercado-impressoras-3d-cresce-2016>. Acesso em: 05 de maio de 2019.

REIS T. “Conheça os diferentes tipos de materiais para impressão 3D FDM”, Cascavel: Impressão 3D Fácil. Disponível em: <http://www.impressao3dfacil.com.br/conheca-os-diferentes-tipos-demateriais-para-impressao-3d-fdm/>. Acesso em: 01 maio de 2019.

Simões CL, Viana JC, Cunha AM., 2009 “Mechanical properties of poly (lactic acid) blends. Journal of Applied Polymer Science”, Journal of Applied Polymer Science, pp.345-352.

Volpato, N. “Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações”, Ed. Blucher, São Paulo, 2007.

Wiebeck, H., 2005, “Plásticos de Engenharia”. Ed. Artliber, São Paulo, 350 p.

LISTA DE SÍMBOLOS

L	[mm]	Distância entre os pontos de apoio
σ_{fmax}	[MPa]	Tensão máxima de flexão
F_{max}	[N]	Força máxima
Mt	[N·mm/mm ³]	Módulo de tenacidade
σ_p	[MPa]	Limite de proporcionalidade
σ_e	[MPa]	Tensão de escoamento
σ_{max}	[MPa]	Tensão máxima
σ_{rup}	[MPa]	Tensão de ruptura
ε	[mm/mm]	Deformação específica
Ut	[N·mm/mm ³]	Módulo de tenacidade
Ur	[N·mm/mm ³]	Módulo de resiliência