

## **CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA PARA EMPREGO EM DISPOSITIVOS DE USINAGEM DE PEÇAS AERONÁUTICAS**

**Rui Júnior Fenilli Da Silva<sup>1</sup>**

**Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler<sup>2</sup>**

**Resumo:** A impressão 3D ou manufatura aditiva, também conhecida como prototipagem rápida, é uma forma de tecnologia de manufatura aditiva onde um modelo tridimensional é criado por sucessivas camadas de material. Este processo ganhou espaço no mercado mundial pela sua rapidez na fabricação de peças e quando comparado com outros processos de fabricação como usinagem e fundição tem se uma redução no consumo de matéria prima, pelo pouco ou quase nenhum desperdício na produção de peças. No processo de impressão de peças utiliza-se a linguagem CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) para realizar as impressões tridimensionais. Desde a primeira impressora 3D ter sido criada nos anos 80 esta prática vem se aperfeiçoando e ganhando espaço no mercado, podendo realizar atualmente impressões com mais de 250 materiais diferentes, entre eles: titânio, plástico, vidro entre outros. Dentre tantas possibilidades de uso, identificou-se que os *toolings*, dispositivos que auxiliam na usinagem de peças afim de reduzir o tempo de fabricação, são ferramentas possíveis de serem obtidos a partir do uso de impressão 3D. Atualmente os *toolings* são fabricados em alumínio aeronáutico. Com base neste cenário, o objetivo desta pesquisa é realizar o estudo do comportamento mecânico de dois materiais poliméricos: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Poliláctico (PLA) obtidos por impressão 3D do tipo FDM (*Fused Deposition Modeling*) e compará-los ao de alumínio da liga 7075-T651 a fim de identificar potencialidades de substituição do material original. Corpos de prova dos polímeros foram impressos e caracterizados por tração, compressão, abrasão e impacto tipo charpy. Em uma bancada fabricada especialmente para simular o envelhecimento, as amostras poliméricas de ABS e PLA, foram imersas e submetidas a um jato, utilizando-se um fluido de corte similar ao empregado na usinagem de peças aeronáuticas. O objetivo desse experimento é identificar a influência deste fluido sobre as propriedades mecânicas dos polímeros em estudo. Os resultados encontrados após os ensaios mecânicos mostram que o fluido de corte utilizado para o experimento de envelhecimento alterou as propriedades mecânicas dos polímeros. Em relação ao PLA teve um aumento na sua tensão máxima e de ruptura e manteve-se estável em relação ao escoamento e, o ABS teve uma diminuição na sua tensão máxima, aumento na tensão de ruptura e tensão de escoamento.

**Palavras-Chave:** Manufatura Aditiva, FDM, Usinagem, CAM, CAD.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: rui.fenilli@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. do Centro Universitário UniSatc. E-mail: luiz.cavaler@satc.edu.br

## 1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D ou manufatura aditiva, aumentou sua visibilidade na indústria nos últimos anos, pela facilidade na fabricação e rapidez na produção de peças. Além da diminuição nos prazos de entrega.

Este processo também tem como vantagem em sua utilização a diminuição no consumo de material. Sendo um processo que requer menos uso de mão de obra pelo fato do próprio projetista poder realizar a impressão da peça dependendo da demanda da empresa em relação a impressão de peças. Segundo Jacob Allenbaugh, o sistema de produção FDM (*Fused Deposition Modeling*) pode ser mais rápido que uma máquina CNC (*Computer Numeric Control*) e não exigir um operador presente.

Estas máquinas operam com a leitura CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) e são interligadas com softwares CAD (*Computer-Aided Design*).

Este processo se torna competitivo em relação aos métodos já conhecidos, como a, fundição em alumínio ou moldagem por injeção, porque este processo, permite realizar a fabricação de peças complexas com maior facilidade.

O estudo deste trabalho foi proposto por uma empresa Norte Americana, que utiliza no seu processo de usinagem dispositivos para fixação de peças. O material utilizado na fabricação desses dispositivos atualmente é o alumínio da liga 7075-T651 comumente utilizada na indústria aeronáutica.

Como toda empresa visa reduzir custos sem perder as características do produto, foi proposto este tema para que se possa realizar um estudo através de ensaios mecânicos em corpos de prova de dois materiais. A ideia é realizar a caracterização dos materiais poliméricos e analisar os resultados, podendo assim ter embasamento para definir qual o material utilizar no processo e reduzir os custos no processo atual, assim como tempo de fabricação deste dispositivo de fixação. Na indústria americana este dispositivo é chamado de *Tooling*, ou em sua tradução literal, ferramental, ou seja, um dispositivo de fixação utilizado em um determinado processo, neste caso utilizado para auxiliar na usinagem de peças aeronáuticas. O objetivo do trabalho é realizar o estudo de dois materiais poliméricos: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Poliláctico (PLA) e compará-los com as propriedades da liga de alumínio 7075-T651.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa será apresentado os materiais deste estudo, assim como cada ensaio que será realizado. Baseado nas normas específicas para cada ensaio.

### 2.1 ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO – ABS

O filamento de ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) é um copolímero que a proporção de seus compostos depende das características requeridas ao produto final. É um material termoplástico rígido e leve, com um pouco de flexibilidade. (HAMOD 2014; OSEJOS, 2016). A composição do ABS, têm de 15-30% de acrilonitrila, 5-15% de butadieno e 40-60% de estireno.

### 2.2 ÁCIDO POLILÁCTICO – PLA

O filamento de PLA (ácido poliláctico), é um polímero obtido a partir de recursos renováveis, através de um ácido orgânico de origem biológica. Possuem propriedades mecânicas semelhantes aos polímeros de origem fósseis, com comportamento termoplástico, módulo de elasticidade elevado, rigidez, transparência e ótima capacidade de moldagem. Pode ser altamente cristalino, semi-cristalino ou amorfo.

O PLA é um material reciclável, visto em se tratar de um polímero biodegradável. (BORAH, 2014). Sendo o PLA, composto por moléculas de ácido láctico, sendo um ácido orgânico. Sendo obtido a partir de recursos renováveis, tornando o 100% reciclável. Este composto orgânico de função mista entre ácido carboxílico e álcool. (HAMOD, 2014).

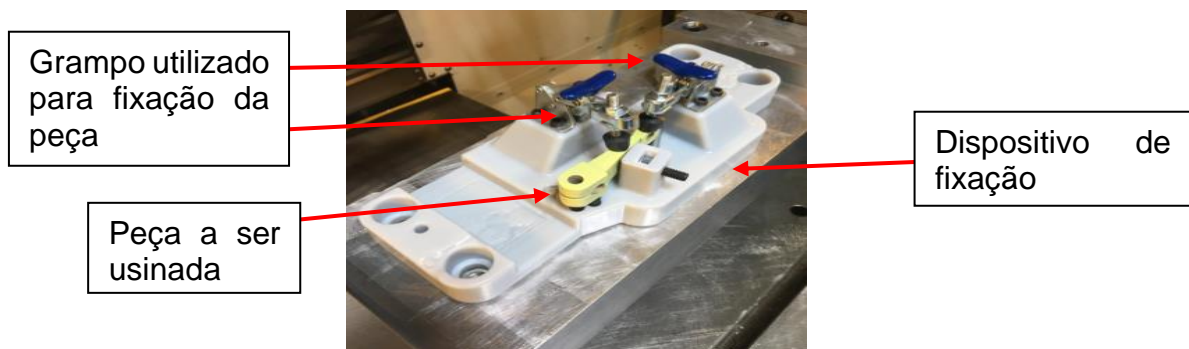
### 2.3 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

Os dispositivos de fixação ou *Tooling* como conhecido na indústria Norte Americana, utilizados em centro usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) ou convencional, na maioria dos casos são fabricados pela própria empresa que visa reduzir custos e, também melhorar a sua etapa no processo produtivo, diminuindo o tempo de produção da peça a ser usinada tendo um ganho

significativo no final do processo. A empresa atualmente fabrica este dispositivo em alumínio na liga 7075-T651 que têm boas propriedades mecânicas como usinabilidade, resistência a corrosão e uma alta dureza que está entre 150 a 180 HB. Essa liga é muito utilizada na fabricação de componentes para aviões.

Na fig. 1 mostra o *Tooling* utilizado pela empresa em seu processo de usinagem.

Figura 1: Dispositivo de fixação



Fonte: Shuttle Aerospace (2019)

Este dispositivo é utilizado para usinar uma determinada peça no processo da empresa. Para cada geometria de peça e tolerância existe um *Tooling*. A resistência mecânica para este dispositivo de fixação não é relevante, desde que a peça usinada fique dentro das tolerâncias exigidas.

Os *Toolings* são ferramentais utilizados para auxiliar o operador na usinagem das peças e também na troca rápida das mesmas, ou seja, faz com que trabalhe com a peça mais vezes na mesma posição e assim otimiza o tempo de *setup* quando for substituir as peças.

Existem dispositivos de fixação que também são vendidos e, não necessariamente produzidos pelas empresas que fabricam essas peças usinadas, nas fig. 2 e 3 tem-se dois exemplos.

Figura 2: *Toggle clamps*



Fonte: Raitool (2020)

Figura 3: *Fixture Clamps*



Fonte: Mitee Bite (2020)

Nas fig. 2 e 3, pode se observar dois tipos comerciais que são utilizados nesta indústria Norte Americana para auxiliar na usinagem de peças. Na fig. 2 mostra o *Toggle clamps*, um grampo articulado que tem como objetivo segurar a peça na superfície de trabalho, como em uma bancada. Na fig. 3 é a imagem do *Fixture clamps*, usado também como um auxiliar na fixação do *tooling* com a mesa do CNC.

Um dos diferenciais de ter um dispositivo de fixação produzido em impressora 3D é a relação custo-benefício quando analisado os valores do processo convencional e do processo com a utilização de manufatura aditiva. O processo de remoção por usinagem é mais usual, porém se compararmos a quantidade de material perdida em forma de cavaco é possível observamos que ocorre uma perda considerável de material quando comparado com a impressão 3D onde a perda de material é mínima ao longo do processo. Além desta análise podemos verificar que no processo de impressão 3D é necessário menos mão de obra envolvida no processo

levando em consideração que o projetista pode projetar e em seguida realizar a impressão do *tooling*.

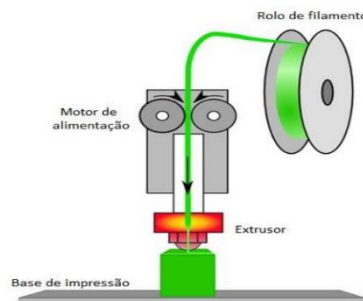
## 2.4 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

A manufatura aditiva é o termo formalizado para o que costumava ser chamado de prototipagem rápida, popularmente chamado de Impressão 3D. O termo Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*), é usado em uma variedade de indústrias para descrever um processo para criar rapidamente uma representação do sistema ou parte antes do lançamento ou comercialização final (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

A impressão pelo método FDM, modelagem de dispositivos fusionada, onde a máquina de impressão recebe a programação gerada em softwares específicos, que usam o desenho 3D e o sistema CAM para gerar o código G, usado para deslocamento dos eixos CNCs da impressora. O processo consiste na fusão do filamento e deposição do material camada por camada pré-definida na programação sobre a mesa de impressão. Este processo tem menor custo se comparado com outros tipos de impressão, como nas impressoras que utilizam a Sinterização a Laser e Estereolitografia.

Na fig. 4, pode-se observar o método de impressão utilizado para fabricação dos corpos de prova.

Figura 4: Desenho esquemático impressão por FDM



Fonte: Adaptado Regadas (2017)

A impressão por deposição de material fundido é comumente utilizada por ter pouco desperdício de material ao longo do processo. Quando comparado com outros tipos de impressão como a

Estereolitografia e Sinterização a laser a impressão FDM se demonstra mais viável economicamente.

## 2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração têm como objetivo a determinação da resistência mecânica dos materiais em estudo de acordo com a norma ASTM D638-14. Para tal, recorre-se à tração de um corpo de prova, o qual pode apresentar variadas configurações, até à sua fratura, através de uma velocidade de ensaio constante e num intervalo de tempo relativamente curto (SMITH, 1998).

Este ensaio fornece dados que poderão ser analisados os comportamentos dos materiais desde o início do ensaio até sua ruptura, obtendo os valores de tensão máxima, tensão escoamento e tensão máxima de ruptura.

Para cálculos de tensão máxima utilizado a Eq. 1:

$$\sigma_{\text{máx.}} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_{\text{máx.}}$  = Tensão Máxima [MPa]

F = Força Aplicada [N]

$A_0$  = Área da seção [mm<sup>2</sup>]

Na tab. 1 apresenta-se os parâmetros da máquina utilizados para os ensaios de tração e compressão.

Tabela 1: Parâmetros máquina ensaio de Tração

Parâmetros	Valores
Velocidade ensaio	5 mm/min
Limite de Força	90 kN

Fonte: Adaptado ASTM G638 (2014)

## 2.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO

No ensaio de compressão pode se analisar através dos resultados qual é a força a uma velocidade constante é necessária para comprimir ou romper um corpo de prova. Os corpos de prova para este ensaio são baseados na norma ASTM D695-15.

Como se trata de um *tooling* sendo este um dispositivo de fixação e, observando-se o processo de usinagem com os respectivos esforços que a peça sofrerá, foi decidido realizar este ensaio para verificar o quanto cada material irá resistir e, qual deles irá se comportar mais próximo do material utilizado atualmente.

## 2.7 ENSAIO DE ABRASÃO

O desgaste por abrasão ocorre quando duas superfícies são colocadas em contato, onde os pontos de aspereza se tocam. Assim, quando aplicado cargas sobre estes pontos, as pressões locais das regiões de contato tornam-se suficientemente elevadas, a ponto de excederem o limite de escoamento de uma ou ambas as superfícies, resultando na danificação ou deformação de ambos os componentes. Essas deformações apresentam taxas de perda de material que podem ser controladas ou não (COLLINS 2006, NORTON, 2004).

Neste ensaio de abrasômetro de roda de borracha serão observados quais materiais terão o menor desgaste perante a abrasão da areia.

As análises dos resultados serão baseadas nas perdas de massa e perda volumétricas dos materiais analisados conforme ASTM G65-16.

Utiliza-se a Eq. 2 da norma para encontrar a perda de matéria desgastada.

$$V = \frac{M}{\rho} \times 1000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

V = Perda de volume [mm<sup>3</sup>]

M = Perda de massa [g]

$\rho$  = Densidade [g/cm<sup>3</sup>]



Na tab. 2 está apresentado os parâmetros utilizados na máquina de ensaio de abrasão com roda de borracha e areia.

Tabela 2: Parâmetros da máquina para ensaio abrasão

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Vazão da Areia	325 g/min	Granulometria da Areia	300 mesh
Carga Aplicada	45 N	Rotação da Roda	200 rpm
Tempo de cada ensaio	30 min.	Diâmetro da Roda	228,6 mm
Corpos de Prova por Material	3	Abrasão Linear	4309 m

Fonte: Adaptado ASTM G65 (2016)

## 2.8 EXPERIMENTO DE ENVELHECIMENTO

Este experimento tem por objetivo verificar se haverá diferença significativa nas propriedades físicas e químicas dos polímeros em estudo. Será analisado o aspecto visual, e realizados ensaios mecânicos antes e depois da imersão dos corpos de prova no fluido. Foi utilizado fluido de corte ecológico e sem a adição de óleo mineral, idêntico ao utilizado pela empresa Shuttle aerospace na usinagem das peças em alumínio.

Segundo CANEVAROLLO (2006) as modificações podem ser permanentes ou temporárias e ocorrem na aparência, ou nas propriedades físicas, químicas ou mecânicas. Efeitos na aparência consistem na perda de cor, aparecimento de manchas, ocorrência de trincas etc. Os efeitos nas propriedades são gerados pela diminuição das massas molares, o que produz, comumente, uma redução nas propriedades mecânicas e um aumento da fragilização do polímero.

## 2.9 ENSAIO DE IMPACTO

O objetivo do ensaio é analisar a quantidade de energia que o corpo de prova pode absorver em um curto espaço de tempo. Este ensaio se baseou na norma ISO 179-1/1e-A para interpretação dos dados obtidos e confecção do corpo de prova do tipo charpy. Foi realizado este ensaio em temperatura ambiente de 23°C.

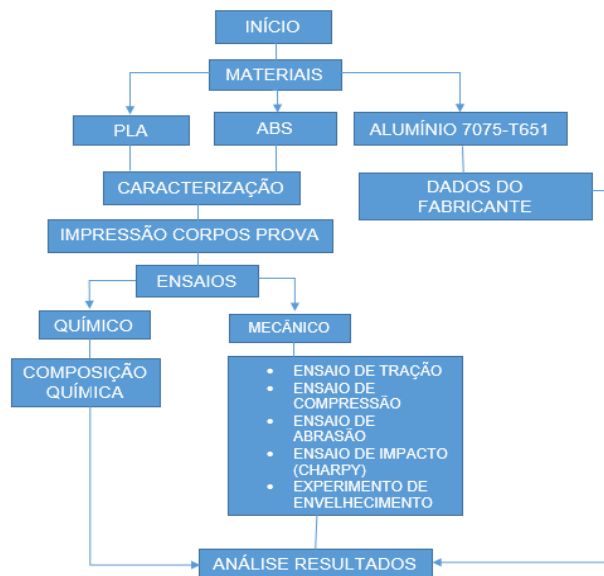
Segundo Canevarollo (2006), A energia necessária para romper o corpo de prova é a soma das energias para iniciar e propagar a trinca. Em alguns casos, a

resistência ao impacto depende mais da energia para a criação da trinca do que da energia para propagá-la.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção apresenta-se o detalhamento de cada processo, parâmetros utilizados e máquinas e equipamentos para cada ensaio e as suas respectivas normas. Para melhor visualização dos processos que sucederam o estudo na fig. 5 tem-se o fluxograma para melhor visualizar o sequenciamento do processo.

Figura 5: Fluxograma das etapas realizadas no procedimento experimental



Fonte: Autor (2020)

Para impressão dos corpos de prova para cada ensaio, utilizado impressora GTmax Core A3 que possui uma mesa de 320 x 320 mm e faz impressão utilizando deposição de material fundido (FDM) sendo que, cada material têm um parâmetro para impressão. O PLA é impresso a 180°C com mesa aquecida em 70°C e o ABS a 210°C com mesa aquecida em 100°C. Os corpos de prova foram impressos com 100% de preenchimento.

Após a escolha dos polímeros para o estudo foi feita a caracterização e ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos dos mesmos.

Os ensaios de tração e compressão foram realizados conforme normas ASTM D638-14 e D695-15, respectivamente, utilizando máquina EMIC DL 10000N.

Estes ensaios foram realizados com velocidade constante de 5 mm/min com carga máxima de 90.000 N ou máxima deformação de 200 mm.

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições: PLA (sem ensaio de envelhecimento), PLA (com ensaio de envelhecimento); ABS (sem ensaio de envelhecimento) e ABS (com ensaio de envelhecimento).

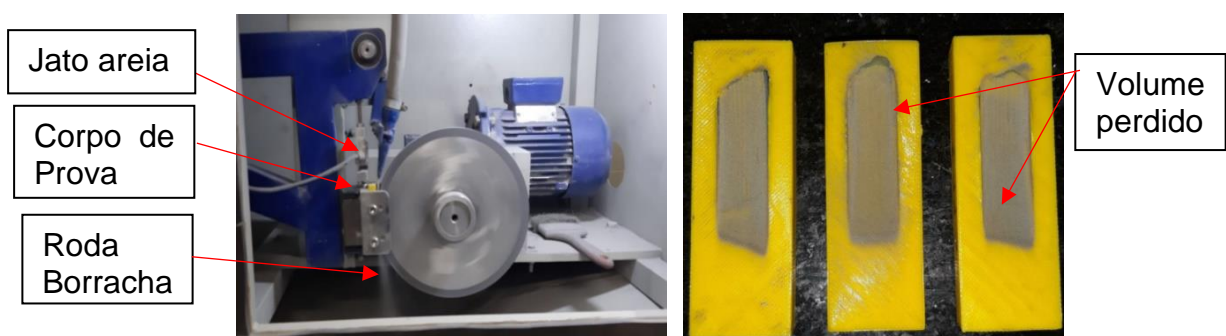
Para o ensaio de tração com o material PLA (sem ensaio de envelhecimento) e (com ensaio de envelhecimento) trabalhou-se com três amostras.

Para o ensaio de tração com o material ABS (sem ensaio de envelhecimento) e (com ensaio de envelhecimento) foi realizado o ensaio com três amostras.

Para o ensaio de compressão com o material PLA (sem ensaio de envelhecimento) e (com ensaio de envelhecimento) foram realizados três ensaios. As mesmas quantidades foram feitas para o ABS (sem ensaio de envelhecimento) e ABS (sem ensaio de envelhecimento).

Para realizar ensaio de abrasão utilizou-se três corpos de prova para cada polímero (PLA e ABS). Foi empregado o tribômetro do tipo roda de borracha (areia seca), de acordo com a norma ASTM G65-16 e adotado o parâmetro do tipo D utilizando força de 45 N e 6.000 revoluções, estimando que os materiais utilizados não tenham muita resistência a abrasão. Todos os corpos de prova foram pesados em balança de precisão com capacidade de 500g e resolução de 0,001g. Na fig. 6, encontra-se a máquina ensaio de abrasão (Fig. 6a) e os corpos de prova após o ensaio (Fig. 6b).

Figura 6: a) Máquina ensaio abrasão b) Corpos prova após ensaio abrasão

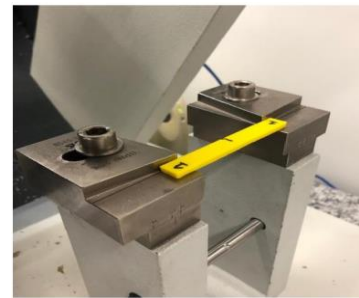


Fonte: Autor (2020)

O ensaio de impacto foi realizado conforme norma ISO 179-1:2010. Foram testados 10 corpos de prova ISO 179-1/1e A, entalhe tipo A. Foi utilizado uma

velocidade do impacto de 2,9 m/s e a energia do martelo foi de 1 J. O equipamento de resistência ao impacto é da marca CEAST, modelo 6967.000 Antes do início do ensaio foram entalhados os corpos de prova e, foram pré-condicionados por 96 horas a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $50\pm 5\%$  de umidade. Na fig. 7, Corpos de prova entalhados (Fig. 7a) e Corpo de prova na máquina (Fig. 7b).

Figura 7: (a) Corpos de prova entalhados (b) Corpo de prova na máquina



Fonte: Autor (2020)

Para realizar o experimento de envelhecimento elaborou-se uma bancada utilizando um recipiente para o fluido, feito em acrílico, dois discos em alumínio, eixo em aço inoxidável com motor de 24 V acoplado no eixo, mancais e rolamentos. Tendo como objetivo analisar como os polímeros iriam se comportar quando tivessem em constante contato com o fluido de corte e também com o oxigênio. Levando em consideração que os polímeros são para fabricação de *toolings* que serão utilizados para usinar peças em alumínio, empregou-se o fluido de corte INTER DX ST, sendo este um fluido ecológico e sem a adição de óleo mineral com as características sendo similares ao utilizado na empresa Shuttle aerospace atualmente. Também empregouse uma bomba d'água de drenagem 220 V com vazão de 14 l/min para gerar vazão e pressão no fluido de corte e, direcionando com auxílio de tubulação nos corpos de prova, durante oito horas ininterruptas.

Utilizado este experimento para que os corpos de prova tivessem contato com o fluido de corte e com o oxigênio como se estivesse no processo de usinagem e depois realizamos os ensaios mecânicos para verificar a influência do fluido nas propriedades mecânicas dos polímeros.

Para o alumínio da liga 7075-T651, analisou-se os dados do fabricante como limite escoamento, limite de resistência a tração, dureza e alongamento. Estes dados foram utilizados para comparar com os polímeros em estudo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será descrito os resultados obtidos através dos ensaios destrutivos e não destrutivos. Abaixo seguem os dados obtidos com os ensaios de tração, compressão, abrasão nas seguintes condições:

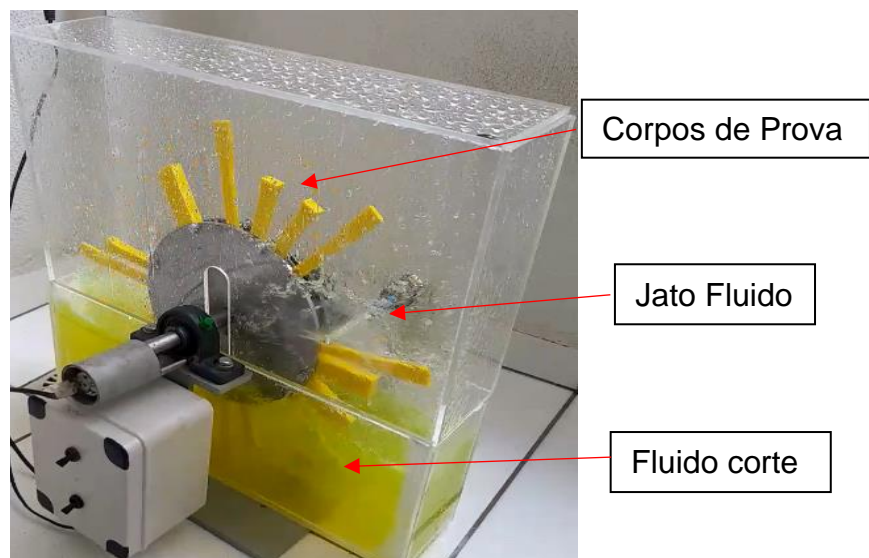
- PLA (sem ensaio de envelhecimento)
- PLA (com ensaio de envelhecimento)
- ABS (sem ensaio de envelhecimento)
- ABS (com ensaio de envelhecimento)

Os corpos de prova ficaram 8 horas passando pelo fluido no experimento de envelhecimento em um fluido ecológico e sem a adição de óleo mineral.

Visualmente não houve nenhuma alteração nos corpos de prova em PLA e ABS como uma possível degradação ou desgaste pelo contato entre o jato do fluido no experimento de envelhecimento.

Foi realizado o ensaio de impacto charpy e medição de dureza shore no PLA e ABS (sem ensaio de envelhecimento) e também PLA e ABS (com ensaio de envelhecimento). Na fig. 8 pode-se observar o experimento de envelhecimento em funcionamento.

Figura 8: Experimento de envelhecimento



Fonte: Autor (2020).

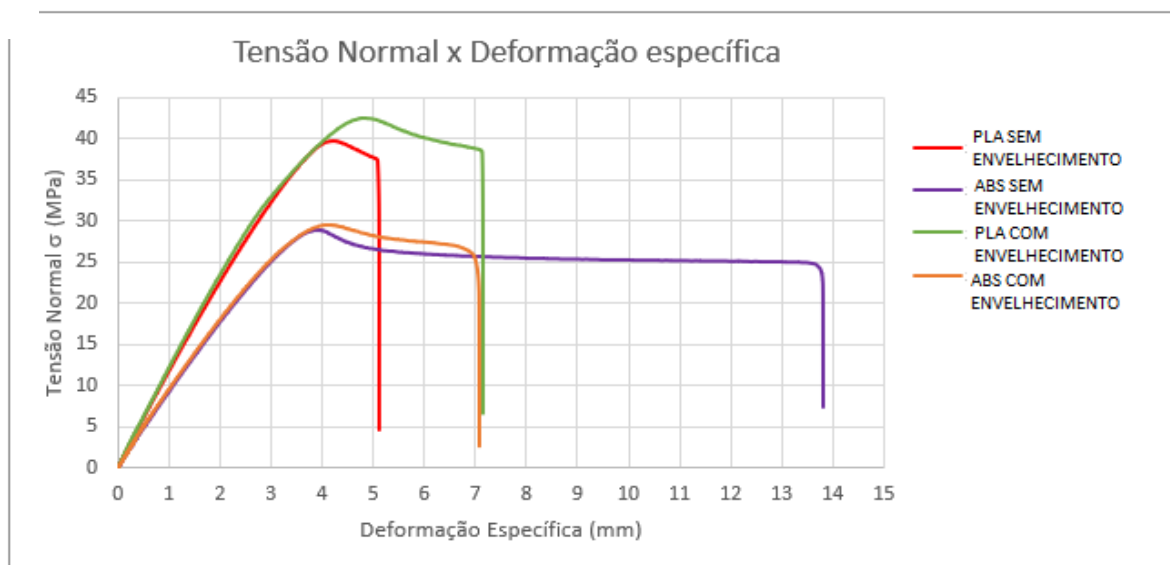
#### 4.1 Ensaio de Tração

Nesta sessão estarão expostos os resultados dos ensaios de tração com o experimento de envelhecimento e sem o experimento de envelhecimento.

Nas fig. 9 e 10 estão apresentados os gráficos dos ensaios de tração que foram elaborados a partir das médias de cada resultado obtido no PLA (com e sem ensaio de envelhecimento) e ABS (com e sem ensaio de envelhecimento). Esse tipo de ensaio tem como finalidade verificar o comportamento de cada material analisando suas tensões e deformações.

Na fig. 9 estão os resultados do ensaio de tração expressos pela tensão normal  $\sigma$  e, sua respectiva deformação específica  $\epsilon$ .

Figura 9: Tensão Normal  $\sigma$  x Deformação específica  $\epsilon$ .



Fonte: Autor (2020)

Analisando a fig. 9 pode se observar que o PLA (sem ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, máxima e de ruptura respectivamente de: 31,5, 38,1 e 37,3 MPa. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 2,07 mm/mm. Com relação ao PLA (com ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, máxima e de ruptura respectivamente de: 31,2, 42,5 e 38,3 MPa. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 2,79 mm/mm.

Analisando o material ABS (sem ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, máxima e de ruptura respectivamente de: 20,2, 27,7 e 24,67

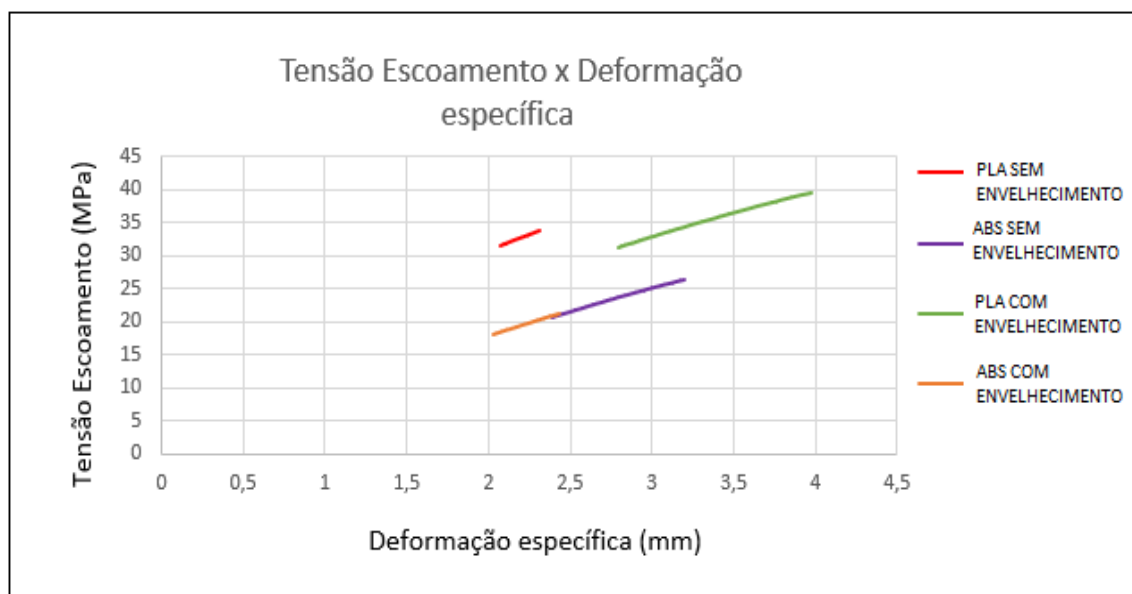
MPa. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 2,38 mm/mm. Com relação ao ABS (com ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, máxima e de ruptura respectivamente de: 18,00, 29,4 e 21,42 MPa. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 2,02 mm/mm.

Considerando o material nas condições de uso no *tooling*, deseja-se uma maior tensão de escoamento para uma determinada deformação específica e a utilização de fluido de corte. Nessa condição a melhor escolha seria o PLA (com ensaio de envelhecimento). Ressalta-se aqui que os ensaios nos materiais PLA e ABS (sem ensaio de envelhecimento) são importantes para efeito de comparação, com as propriedades dos 2 materiais que sofreram ensaio de envelhecimento.

De acordo com o estudo de Pelegrino *et. al* (2019) que realizou as impressões dos corpos de prova na posição horizontal com 100% de preenchimento e sem experimento de envelhecimento, obteve uma média de tensão normal de 33,4 MPa para PLA e 31,4 MPa para ABS sendo que esse estudo obteve uma tensão normal de 39,18 MPa para PLA e 28,95 MPa para ABS. Essas diferenças podem ser associadas por não ser o mesmo fornecedor dos filamentos e pela forma de armazenamento dos materiais.

Na fig. 10 encontrasse a análise do escoamento dos materiais analisando onde ocorre a deformação plástica do material ou deformação permanente.

Figura 10: Tensão Escoamento x Deformação específica  $\epsilon$

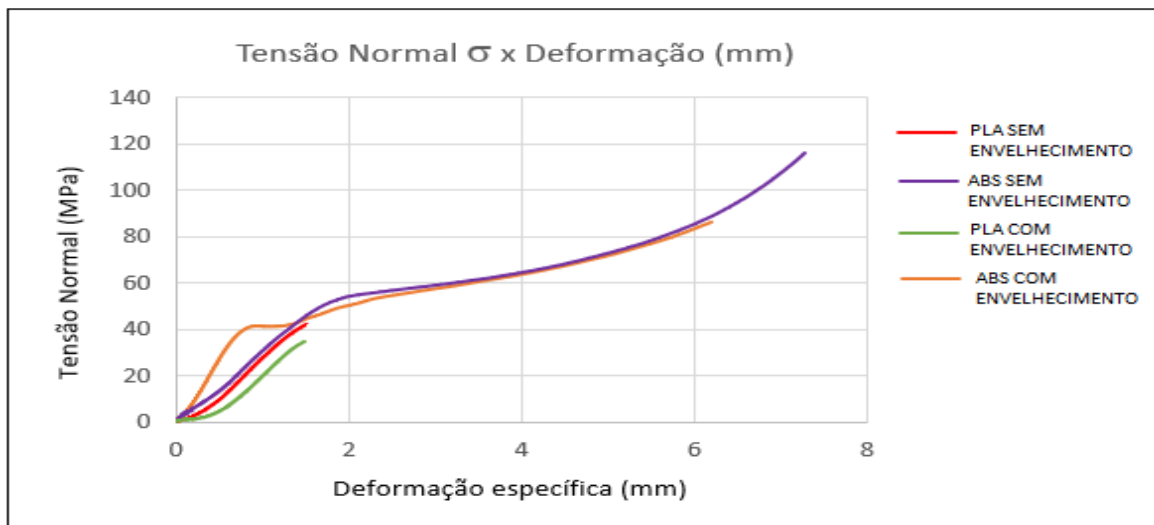


## 4.2 Ensaio de Compressão

Nesta seção estarão expostos os resultados dos ensaios de compressão com o experimento de envelhecimento e sem o experimento de envelhecimento.

Na fig. 11 está representado o gráfico do ensaio de compressão.

Figura 11: Tensão Normal  $\sigma$  x Deformação específica  $\epsilon$ .



Fonte:Autor (2020)

Analisando a fig. 11 pode se observar que o PLA (sem ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, tensão máxima e força máxima respectivamente de: 4,69 MPa, 42,47 MPa e 9789 N. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 0,30 mm/mm. Com relação ao PLA (com ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, tensão máxima e força máxima respectivamente de: 0,18 MPa, 35,14 MPa e 7646,8 N. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 1 mm/mm.

Analisando o material ABS (sem ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, tensão normal e força máxima respectivamente de: 51,48 MPa e 116,51 MPa e 20805 N. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 1,77 mm/mm. Com relação ao ABS (com ensaio de envelhecimento) atinge tensões normais de: escoamento, tensão máxima e força máxima respectivamente de: 41,28 MPa, 86,32 MPa e 17384 N. A tensão de escoamento foi atingida com uma deformação específica de 1 mm/mm.



Considerando o material nas condições de uso no *tooling*, deseja-se uma maior tensão de escoamento para uma determinada deformação específica e a utilização de fluido de corte. Nessa condição a melhor escolha seria o ABS (com ensaio de envelhecimento). Ressalta-se aqui que os ensaios nos materiais PLA e ABS (sem ensaio de envelhecimento) são importantes para efeito de comparação, com as propriedades dos 2 materiais que sofreram ensaio de envelhecimento.

Comparando a estudo de Gobbo e Alves (2020) que obtiveram uma força de 45008,25 N para PLA e 45005,14 N para ABS e nosso estudo que obteve 8390,3 N para o PLA e 7866,2 N para o ABS, esta diferença se encontra muito fora da realidade de nosso estudo. Essas diferenças podem ser associadas por não ser o mesmo fornecedor dos filamentos e pela forma de armazenamento dos materiais.

#### 4.3 ENSAIO DE ABRASÃO

O ensaio de abrasão realizado em condições normais e após os corpos de provas passarem pelo experimento de envelhecimento. Realizado três amostras para cada situação e material.

Na tab. 3 mostra os resultados do ensaio de abrasão levando em consideração a perda de volume para cada material e a porcentagem total de volume perdido.

Tabela 3: Resultados ensaio de abrasão com material PLA e ABS

Material	Peso antes ensaio [g]	Peso depois ensaio [g]	Diferença de massa [g]	Densidade material [g/cm <sup>3</sup> ]	Perda volume [mm <sup>3</sup> ]	Volume Inicial [mm <sup>3</sup> ]	% Volume perdido total
PLA sem envelhecimento	30,545	29,688	0,857	1,24	691,13	24633,07	2,81
PLA com envelhecimento	30,683	29,862	0,821	1,24	662,1	24744,36	2,68
ABS sem envelhecimento	19,422	18,343	1,079	1,04	1037,5	18675	5,56
ABS com envelhecimento	23,802	21,508	2,294	1,04	2205,77	22886,54	9,64

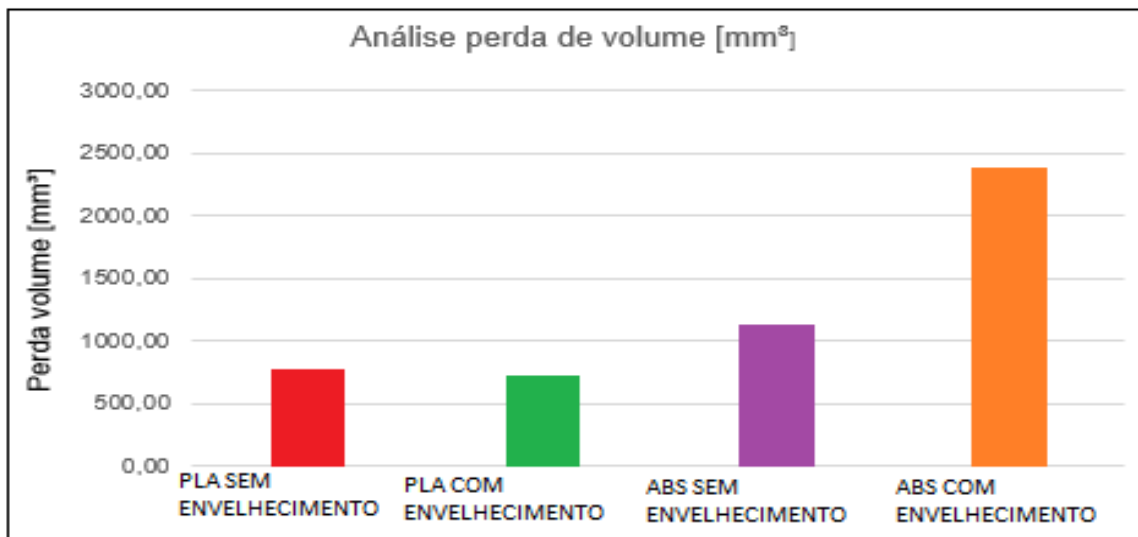
Fonte: Autor (2020)

Ao analisar os resultados da tabela 4, pode se observar que o material PLA obteve resultados mais satisfatórios após passar pelo experimento de envelhecimento

e o material ABS teve uma perda de volume maior após o experimento de envelhecimento.

Na fig. 12 pode se observar o resultado da análise da perda de volume encontrada na tabela 3

Figura 12: Análise perda de volume [mm<sup>3</sup>]



Fonte: Autor (2020)

Analisando os resultados da tabela 3 e o gráfico a fig. 12 pode se dizer que em relação ao ensaio de abrasão o material PLA se comportou melhor que o material ABS. Com uma perda menor no volume do material assim como uma porcentagem menor de volume perdido em relação ao volume inicial. Comparando o resultado do material ABS com Dallefe *et. al* (2020) pode observar que a perda de volume encontrada neste estudo foi de 1.037,50 mm<sup>3</sup> enquanto a do artigo citado foi 209,12 mm<sup>3</sup>, e o material PLA com Ghizoni e Peruch (2019) tiveram uma perda de volume de 691 mm<sup>3</sup> enquanto o artigo citado 375 mm<sup>3</sup>, essas diferenças podem ser associadas por não ser o mesmo fornecedor dos filamentos e pela forma de armazenamento dos materiais, ou por outro fator não analisado neste estudo.

#### 4.4 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Os ensaios de impacto *charpy* foram realizados sem o experimento de envelhecimento e os resultados obtidos neste ensaio encontram se na tab. 4.

Tabela 4: Resistência ao impacto Charpy

Resistência ao Impacto Charpy			
Material	Resistência média	Desvio padrão	Resultado
	[kJ/m <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
PLA	2,48	0,1	2,48 C
ABS	10,81	0,88	10,81 C

Fonte: Autor (2020)

Pode se observar que o material ABS teve um melhor resultado comparado com o PLA, e tornando mais resistente à impacto. Comparando com Tanveer *et. al* (2019) que obteve 4,7 kJ/m<sup>2</sup> e esse estudo que obteve 2,48 kJ/m<sup>2</sup>, esta diferença pode se dar pela diferença de fornecedor e também pelo armazenamento do material.

#### 4.5 DADOS ALUMÍNIO

Os dados do alumínio da liga 7075-T651 foram retirados do catálogo do fabricante da empresa *Kaiser Aluminum*, e foram utilizados para comparar com os resultados dos ensaios mecânicos dos polímeros PLA e ABS. Na tab. 5 pode ser observar as propriedades mecânicas.

Tabela 5: Dados Alumínio da Liga 7075-T651.

Material	Tensão			
	Máxima	Escoamento	Ruptura	Alongamento
	MPa	MPa	MPa	%
Alumínio 7075-T651	572	503	-	11

FONTE: Kaiser Aluminum (2020)

#### 4.6 Comparativo propriedades mecânicas entre Alumínio 7075-T651, PLA e ABS

Nesta seção estão apresentados os resultados encontrados neste estudo, assim como os valores retirado do fornecedor de alumínio para que fizemos assim as devidas análises e comparações entre os materiais.

Na tab. 6 encontrasse os valores finais de cada ensaio para os polímeros PLA e ABS para comparação com os dados do Alumínio 7075-T651.

Tabela 6: Propriedades mecânicas dos materiais em estudo

Material	Tensão				Impacto Charpy kJ/m <sup>2</sup>
	Máxima MPa	Escoamento MPa	Ruptura MPa	Alongamento %	
Alumínio 7075-T651	572	503	455	11	5,04
PLA sem ensaio de envelhecimento	39,18	30,4	37,3	3,57	2,48
ABS sem ensaio de envelhecimento	28,95	17,04	24,67	8,05	10,81
PLA com ensaio de envelhecimento	41,02	30,04	41,4	7,13	-
ABS com ensaio de envelhecimento	28,2	17,67	28,42	6,68	-

Fonte: Autor (2020)

O alumínio quando comparado com os polímeros em estudo é visto uma diferença muito grande. Mas analisando os dois polímeros pode se observar que eles têm comportamentos diferentes após passar pelo experimento de envelhecimento e que a utilização do fluido de corte no estudo se demonstrou de uma maneira interessante. As propriedades mecânicas dos materiais alteraram após os mesmos ficarem por oito horas em contato com fluido e pode se comentar a tensão máxima dos polímeros que para o PLA aumentou enquanto a tensão máxima do ABS diminuiu.

## 5 CONCLUSÕES

No ensaio de tração o material PLA se comportou melhor, alcançando uma tensão máxima e uma maior tensão de escoamento superior em relação ao ABS.

No ensaio de compressão foi possível observar que o material ABS além de suportar uma maior carga quando comprimido também alcançou uma força normal maior em relação ao ABS.

No ensaio de abrasão o material que teve a menor perda de massa durante o ensaio foi o PLA, perdendo apenas 2,81 % do seu volume inicial quando comparado com o ABS que perdeu 9,64 % do seu volume inicial.

No ensaio de impacto *charpy* o ABS se mostrou mais eficiente suportando uma carga de 10,81 kJ/m<sup>2</sup> e o PLA uma carga de 2,48 kJ/m<sup>2</sup>.

Observou-se que o fluido de corte utilizado no experimento alterou as propriedades mecânicas dos materiais PLA e ABS e, com relação ao PLA melhorou suas propriedades mecânicas.

Após realizar a caracterização dos polímeros e comparar com as propriedades mecânicas do Alumínio 7075-T651 é notório a diferença entre os polímeros e o alumínio. Mas, analisando os polímeros é possível observar que o PLA possui características mecânicas superior ao do ABS, sendo a melhor escolha para fabricação do *tooling* e posteriormente aplicação em usinagem.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Impressões com outros parâmetros preenchimento (75% e 50%);
- Repetição dos ensaios de abrasão;
- Melhorar vedação na caixa de fluido no experimento de envelhecimento;
- Realizar medição de dureza *Shore D*;
- Realizar a impressão dos corpos de prova com outros tipos de materiais.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, S. A. C. Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2015.
- ASTM D2240-15e1, Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D695-15, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM D6110-04, Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- ASTM G65-16, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- BORAH, Sharmila. 3D printer filament length monitor. *International Journal of Science, Technology and Society*, v. 2, n. 5, p. 129-132, 2014.
- CAKMAKCI, Mehmet. Process improvement: performance analysis of the setup time reduction-SMED in the automobile industry. *International journal of advanced manufacturing technology*, v. 41, n. 1-2, 2008.

CHUA, C.K.; LEONG, K.F.; LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing. Singapura: World Scientific, 2010.

CANEVAROLLO S.V.Jr. In: Ciência dos Polímeros “Um texto básico para tecnólogos e engenheiros”, Artliber Editora LTDA. p. 21–51, 91-106, São Carlos, 2006.

DALLEFE, A. COLOMBO, V. CASTELAN, J. FRITZEN, D. GONÇALVES, E. MILANEZ, A. PERUCH, F. Avaliação da impressão 3D com matéria prima polycast SP802C para modelos de fundição (2020)

GHIZONI, G. PERUCH, F. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA SUBSTITUIÇÃO DE MAGAZINES FABRICADOS EM ALUMÍNIO POR PLA UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA. (2019)

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. Additive Manufacturing Technologies. Second Edition. (2015).

GOBBO, G. C. ALVES, V. ANÁLISE DE MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DO CESTO DO BALÃO METEOROLÓGICO HAB-IMT.

HAMOD, Haruna. Suitability of Recycled HDPE for 3D printing filament. 2014. Degree Thesis – Degree Program: Plastics Technology, Arcada University of Applied Science, Finlandia, 2014.

HARTIKAINEN, J.; HINE, P.; SZABÓ, J. S.; LINDNER, M.; HARMIA, T.; DUCKETT, R. A. & FRIEDRICH, K. - Composites Sci. and Tech., 65, p.257 (2005).

KAISER ALUMINUM. Disponível em: <<https://www.kaiseraluminum.com/customer-portal/product-information/#collapse-1>>. Acesso em: 06 de nov. de 2020.

OSEJOS, Jaime Vinicio Molina. Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes. 2016. Dissertação de Mestrado. Quito, 2016.

PELEGRINO, A. MONTEIRO, C. MIKOLAYCZYK, K. SANTOS, A. Comparação de direção de impressão 3D em ABS e PLA (2019).

SMITH, W. F. (1998). Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (3ª Ed.). Alfragide, Portugal: McGraw-Hill, Inc.

SOARES, H.C.G. “Estudo de sequência de soldagem para redução e eliminação de distorções” 2006. Dissertação: Pós-Graduação Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte 2006.

THIO, Y. S.; ARGON, A. S.; COHEN, R. E. & Weinberg, M. - Polymer, 43, p.3661 (2002).

### **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao amigo e coordenador Luiz Carlos de Cesaro Cavaler pela paciência e parceria ao longo deste trabalho.

Ao Sr. Clóvis Ribas por abrir as portas de sua empresa para realizarmos este estudo.

Ao Ítalo Castanhetti e ao Professor Anderson Dallefe pela contribuição neste trabalho.

A equipe de Manutenção da Empresa Colorminas e Feltrin Usinagem por me auxiliar na fabricação da bancada.

Ao Sr. Luiz Henrique da empresa Interquim por fornecer o fluido de corte utilizado em nosso trabalho.

Ao meu pai por nunca desistir de mim e por acreditar neste sonho, apesar de não estar de corpo presente continua a me guiar e acompanhar mesmo de longe, Obrigado Pai.

A minha família que acompanhou toda minha trajetória, esta vitória é nossa!! Em especial minha mulher Amanda, minha filha Luíza, minha sogra Lúcia, minha mãe Fátima e minha irmã Suelen.

E a todos amigos que fiz dentro da sala de aula, sozinho a trajetória seria mais difícil.