



PATRICK GUSTAVO MACHADO DE SOUZA

**ESTUDO DE CASO EM TERMOPLÁSTICOS PARA PROJETOS MECÂNICOS
DE IMPELIDORES**

**LAVRAS - MG
2023**

PATRICK GUSTAVO MACHADO DE SOUZA

**ESTUDO DE CASO EM TERMOPLÁSTICOS PARA PROJETOS MECÂNICOS
DE IMPELIDORES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof.º Dr. Luciano Jacob Corrêa
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

PATRICK GUSTAVO MACHADO DE SOUZA

**ESTUDO DE CASO EM TERMOPLÁSTICOS PARA PROJETOS MECÂNICOS
DE IMPELIDORES
A CASE STUDY ON THERMOPLASTICS FOR MECHANICAL PROJECTS
OF IMPELLERS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 27 de fevereiro de 2023.

Prof °. Dr. Luciano Jacob Corrêa – UFLA

Profa. Dr. Gilson Campani Júnior – UFLA

Profa. Dra. Joelma Rezende Durão Pereira – UFLA

Prof °. Dr. Luciano Jacob Corrêa
Orientador

LAVRAS – MG

2023

Dedico esse trabalho à minha família, amigos e professores, por todos os ensinamentos e também pelos bons exemplos que foram dados no decorrer de toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida e por sempre me guiar por bons caminhos;

Aos meus pais, João Márcio e Mara, por todo amor, carinho, paciência, ensinamentos e incentivo. Obrigado por depositarem a confiança de vocês em mim e por não medirem esforços para que eu pudesse ter a oportunidade de estudar.

Ao meu irmão, Pablo Henrique Machado de Souza por todo apoio e companheirismo.

Aos familiares que me apoiaram e acreditaram na minha dedicação.

A minha amiga e irmã de coração Débora Lima Guedes, que sempre esteve comigo, dando os melhores conselhos.

Agradeço aos meus amigos de curso que foram fundamentais para minha graduação. Em especial, à Diego Garrôcho e Túlio Sérgio. Foi um prazer dividir momentos de estudos, risadas e alegria ao lado de vocês.

Ao meu orientador Luciano Jacob Corrêa, pela constante ajuda e orientação neste trabalho e contribuição fundamental na minha formação.

A Ana Paula Gomes Silva pelo suporte na elaboração desse trabalho.

Aos professores e técnicos do EENG/UFLA que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação profissional.

A Universidade Federal de Lavras que me proporcionou viver momentos inesquecíveis e conhecer pessoas excepcionais que levarei por toda a vida.

A UNILAVRAS pelo apoio e disponibilidade dos equipamentos da instituição, em especial, aos técnicos Breno Vinicius Miranda e Rodolpho Felipp Costa, por todo suporte ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”. (Roger Von Oech)

RESUMO

Muitos podem ser os usos de impressoras 3D na indústria química, desde a substituição de peças específicas até a redução de custos de processos. Esse trabalho tem por objetivo a prototipagem de impelidores de formato Rushton em impressora 3D. Foi realizada a modelagem das peças, seguindo as dimensões do impelidor convencional, padrão do biorreator Biofoco® modelo Rubia 7,5L, com intuito de realizar um estudo de caso acerca da utilização de termoplásticos para substituição do aço inoxidável em impelidores. Foram impressos impelidores utilizando quatro filamentos termoplásticos: PLA, PETG, ABS e TRITAN. Foi realizado testes de tração e compressão nos termoplásticos para caracterização dos materiais. Obteve-se o Tempo de Mistura pelo método de temperatura para cada impelidor. O impelidor no termoplástico PLA apresentou melhores resultados, se mostrando mais adequado para a função do protótipo, uma vez que suportou maior tensão de tração e compressão quando comparado com os demais impelidores, apresentando, também, uma redução do Tempo de Mistura. Os resultados preliminares obtidos afirmaram a funcionalidade e aplicação destes materiais em substituição aos impelidores convencionais de aço inoxidável.

Palavras-Chave: Impressora 3D. Filamentos. Agitação. Biorreator. Tempo de mistura.

ABSTRACT

There are many uses for 3D printers in the chemical industry, from replacing specific parts to reducing process costs. This work aims at prototyping Rushton impellers in a 3D printer. The parts were modeled, following the dimensions of the conventional impeller, standard of the Biofoco® bioreactor model Rubia 7.5L, in order to carry out a case study on the use of thermoplastics to replace stainless steel in impellers. Impellers were printed using four thermoplastic filaments: PLA, PETG, ABS and TRITAN. Tension and compression tests were carried out on thermoplastics to characterize the materials. The Mixing Time was obtained by the temperature method for each impeller. The PLA thermoplastic impeller showed better results, proving to be more suitable for the function of the prototype, since it withstood greater tensile and compressive stress when compared to the other impellers, also presenting a reduction in the Mixing Time. The preliminary results obtained affirmed the functionality and application of these materials in substitution to conventional stainless steel impellers.

Keywords: 3D Printer. Filaments. Agitation. Bioreactor. Mixing time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Rearranjo molecular dos termoplásticos submetidos ao calor.....	17
Figura 2 - Comportamento dos filamento PLA, PETG e ABS em ensaio de tração.....	19
Figura 3 - Modelo representativo de um ensaio de tração.....	20
Figura 4 - Curva Tensão-Deformação.....	22
Figura 5 - Comparação das curvas de Tensão-Deformação para materiais frágeis e dúcteis.....	23
Figura 6 - Tipos de fluxos gerados por impelidores.....	23
Figura 7 - Impelidor convencional de aço inoxidável.....	24
Figura 8 - Comparação do processo de agitação com e sem chicanas.....	25
Figura 9 - Reograma de fluídos.....	26
Figura 10 - Filamentos utilizados no presente trabalho.....	28
Figura 11- Impressora 3D utilizadas no projetos, modelos a) GTMax3D b) Creality Ender 3 3D FDM.....	29
Figura 12 - Processo de impressão dos corpos de provas.....	30
Figura 13 - Máquina universal em ensaio de ensaios do UEPAN (DCF/UFLA).....	31
Figura 14 - Interface do software Wdw f020.....	32
Figura 15 - Dimensões dos corpos de prova submetidos à tração.....	32
Figura 16 - Ensaio de tração na Máquina Universal de Ensaio.....	33
Figura 17 - Dimensões dos corpos de prova submetidos a compressão.....	33
Figura 18 - Ensaio de compressão utilizando uma Máquina Universal de Ensaio.....	34
Figura 19 - Impelidor Rushton convencional a) vista superior b) vista inferior.....	34
Figura 20 - Dimensionamento do impelidor Rushton.....	35
Figura 21 - Detalhes da modelagem do impelidor Rushton utilizando o software SolidWorks.	35
Figura 22 - Interface gráfica do software CURA Ultimaker 3D.....	36
Figura 23 - Imagem representativa do processo de impressão 3D dos impelidores.....	36
Figura 24 - Comparação do a) impelidor convencional e b) impelidor impresso em termoplástico.....	37
Figura 25 - Biorreator de bancada do Laboratório de Engenharia Bioquímica - UFLA.....	37
Figura 26 - Impelidor acoplado ao eixo central do reator e o sensor de temperatura.....	38
Figura 27 - Metodologia adotada na identificação dos corpos de prova para ensaios de a) compressão b) tração.....	39
Figura 28 - Corpos de prova do ensaio de tração.....	40
Figura 29 - Dimensões de referência para os corpos de prova do ensaio de tração.....	40
Figura 30 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico PLA.....	41
Figura 31 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico PETG.	42
Figura 32 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico ABS.....	42
Figura 33 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico TRITAN.....	43
Figura 34 - Curvas de Tensão-Deformação para comparação entre os termoplástico em ensaio de tração.....	45
Figura 35 - Corpos de prova do ensaio de compressão, sendo cada grupo de cinco referentes ao material: a) PLA b) PETG c) ABS d)TRITAN.....	46
Figura 36 - Dimensões de referência para os corpos de prova do ensaio de compressão.....	46
Figura 37 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico PLA.....	47
Figura 38 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico PETG.....	48
Figura 39 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico	

ABS.....	48
Figura 40 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico TRITAN.....	49
Figura 41 - Curvas de Tensão-Deformação para comparação entre os termoplástico em ensaio de compressão	51
Figura 42 - Tempo de mistura para cada material estudado.....	52
Figura 43 - Fator de tempo de mistura para os termoplásticos estudados.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na impressão dos corpos de prova	29
Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova analisado, segundo a norma ASTM D638.....	40
Tabela 3 - Dados referente as dimênsoes médias dos corpos de prova do ensaio de compressão.	41
Tabela 4 - Dados referente aos corpos de prova do ensaio de tração.....	43
Tabela 5- Medidas de Limite de Resistência à Tração em cinco corpos de prova para cada termoplástico estudado.....	44
Tabela 6 - Dados referente as dimensões média dos corpos de prova do ensaio de compressão.	47
Tabela 7 - Dados referentes aos corpos de prova do ensaio de compressão.	49
Tabela 8 - Medidas de Limite de Resistência à Compressão em cinco corpos de prova de cada termoplásticos estudado.	50
Tabela 9 - Dados de tempo de mistura médio para cada rotação.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Propriedades dos termoplásticos.....	18
--	----

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS	15
2.1.	Objetivo geral.....	15
2.2.	Objetivos específicos.....	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1.	Impressora 3D	16
3.2.	Termoplásticos	16
3.3.	Filamentos	17
3.4.	Maquina universal de ensaios.	19
3.4.1.	Teste de tração.....	20
3.4.2.	Teste de compressão.....	21
3.4.3.	Curva Tensão-Deformação.....	21
3.5.	Agitação e mistura.....	23
3.5.1.	Impelidores.....	23
3.5.2.	Chicanas	24
3.5.3.	Reologia	25
3.6.	Tempo de Mistura	26
3.6.1.	Método da temperatura.....	26
3.6.2.	Método colorimétrico	26
3.6.3.	Método de condutividade	27
3.7.	Fator de Tempo de Mistura	27
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.2.	Modelagem e Impressão dos corpos de prova	28
4.3.	Ensaio Mecânicos	31
4.3.1.	Ensaio de tração	32
4.3.2.	Ensaio de compressão	33
4.4.	Modelagem e impressão dos impelidores.	34
4.4.1.	Impelidor Rushton.....	34
4.5.	Biorreator	37
4.6.	Tempo de mistura.....	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1.	Impressão e Identificação dos corpos de prova.....	39
5.2.	Ensaio de tração	39
5.3.	Ensaio de compressão	46
5.4.	Tempo de mistura.....	51
5.5.	Fator de tempo de mistura.....	53
6.	CONCLUSÃO.	54

1. INTRODUÇÃO

Entre as operações unitárias mais comuns em indústrias, se encontra a agitação e mistura. Segundo Ghotli et al., (2023), essa operação é bastante eficiente, rápida e controlada, sendo utilizada para aplicações em indústrias químicas, farmacêutica, petrolífera e alimentos. Esse processo possui diversos propósitos, como, realizar a mistura de componentes miscíveis, aumentar velocidade de uma determinada reação e, até mesmo, potencializar a transferência de calor e massa em um meio, sendo amplamente utilizado em biorreatores.

De acordo com Almeida, Cagnini (2021), os biorreatores são tanques onde ocorrem, por meio de uma série de reações de fermentação, a transformação de um substrato em um determinado produto. Esse equipamento conta com o auxílio de impelidores para promover uma circulação do fluido no interior do tanque.

Existem diversos modelos de impelidores, sendo cada um responsável por uma aplicação, uma vez que a geometria do impelidor influencia diretamente na hidrodinâmica do biorreator, fazendo com que a escolha correta do impelidor seja um critério fundamental para o sucesso do processo. A depender da geometria do impelidor, o padrão do escoamento do fluido no tanque agitado irá variar, podendo apresentar característica de fluxo radial, axial ou tangencial. Segundo Cremasco (2012), no radial, o fluido segue em sentido a parede do reator, se distribuindo em seguida para cima e para baixo. O fluxo axial, apresenta uma direção do líquido paralela ao eixo de acionamento. Já o fluxo tangencial, proporciona um movimento circular em volta do eixo de acionamento.

Os impelidores, em sua maioria, são produzidos a partir do aço inox, devido a sua alta resistência à corrosão, variação de temperatura e durabilidade. No entanto, impelidores desse material possuem um alto custo de aquisição, devido ao aumento do preço do aço e o alto grau de complexidade em moldar o material para produção de impelidores, o que se faz necessário a busca por novas opções de materiais que possam apresentar as mesmas características do aço inoxidável, porém, com um custo mais acessível.

Dessa maneira, surgem os termoplásticos moldados em impressora 3D como opção, uma vez que apresentam qualidades similares com a aplicação. Esse trabalho propõe o uso de termoplástico como substituto do metal para produção de impelidores, tendo como critério de validação o cálculo do tempo de mistura para cada material em fluido newtoniano em relação ao impelidor padrão feito de aço inox.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O propósito do presente trabalho é avaliar viabilidade técnica da substituição de impelidores convencionais por impelidores prototipado em uma impressora 3D em termoplásticos.

2.2. Objetivos específicos

O projeto tem como objetivos específicos:

- a. analisar as resistências mecânicas dos termoplásticos;
- b. verificar a trabalhabilidade dos filamentos utilizados;
- c. testar a funcionalidade dos impelidores impressos;
- d. calcular e comparar o tempo de mistura, fator de tempo de mistura e o custo de produção dos impelidores de termoplástico com a do impelidor convencional de aço inoxidável.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Impressora 3D

A impressora 3D vem demonstrando ser um novo meio com um grande potencial para o desenvolvimento de utensílios, desde a prototipação de próteses na área da saúde até peças específicas do setor automotivo, aeroespacial, sendo, também, utilizado para uso domésticos. Com base na análise feita por (PINHEIRO et al, 2017), atualmente, as impressoras 3D estão disponíveis no mercado interno e externo com preços acessíveis, pois, nos últimos anos, diversas empresas tem investido na produção de suas próprias máquinas, como, também, no desenvolvimento de software de código aberto.

De acordo com Cunico (2015), as tecnologias de impressão 3D apresentam como o princípio básico de funcionamento, a obtenção de objetos tridimensionais (3D), onde camada por camada dão forma ao objeto desejado, permitindo, assim, a elaboração de geometrias mais complexas que processos convencionais, o que dá a sua importância em áreas diversas, como saúde, engenharia e produção.

Para criar um protótipo em impressora 3D, são necessário cinco etapas que, segundo Cunico (2013), são:

- a. modelagem computacional do objeto utilizando um CAD;
- b. modelo de malha 3D, sendo esse, obrigatoriamente em formato STL (*STereoLithography*);
- c. geração de camadas e planejamento de fabricação;
- d. confecção do objeto camada por camada;
- e. pós-processamento (acabamento).

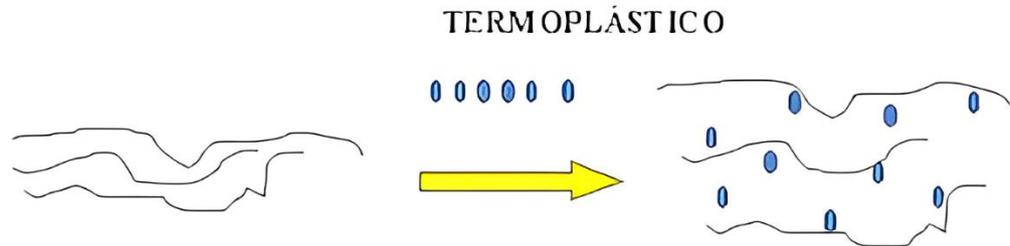
Como são muitas variáveis envolvidas em um processo de desenvolvimento de protótipo e, considerando que o comportamento delas nem sempre será linear, se torna difícil definir configurações que atendam a todos os projetos, por isso, segundo Cunico (2015), cada protótipo 3D precisa de uma estratégia de fabricação e uma configuração própria.

3.2. Termoplásticos

Os termoplásticos são polímeros artificiais, que se encontram no estado sólido em temperatura ambiente, mas, entram no estado líquido quando são submetidos a uma elevação da temperatura. São materiais que podem ser remodelados varias vezes, sem que isso prejudique

sua nova estrutura. A Figura 1 apresenta o rearranjo molecular dos termoplástico quando submetidos a calor.

Figura 1- Rearranjo molecular dos termoplásticos submetidos ao calor



Fonte: Mundo Educação (2022)

Isso ocorre devido esse material ser formado por cadeias poliméricas que são unidas por forças de atração intermolecular secundárias, ou seja, forças relativamente baixa, o que faz que sejam facilmente rompidas com o aumento da temperatura (CANEVAROLO, 2006). O Quadro 1 apresenta algumas propriedades dos termoplásticos.

Quadro 1- Propriedades dos termoplásticos

PROPRIEDADES DOS TERMOPLÁSTICOS	
Estrutura mecânicas	Flexível, elástico e resistente ao impacto.
Estrutura molecular	Linear com ligações fracas entre as cadeias.
Reciclabilidade	Reciclável por meio do uso de calor.
Temperatura de trabalho	Entre 20°C e 295°C.

Fonte: Do autor (2023)

Por possuir um fácil processo de fabricação, são muito utilizado como substitutos de materias como vidros e metais, sendo amplamente utilizados em peças do dia a dia, como, também, como filamentos em impressão 3D.

3.3.Filamentos

Os filamentos são polímeros termoplásticos produzidos e comercializados em formato de fios, enrolados em um cartel próprio para serem usados como insumo em impressoras 3D. Se em uma impressora convencional se utiliza cartuxos com tintas, em uma impressora 3D utilizam carreteis com filamentos. Pode-se encontrar filamentos de diferentes tipos e cores, sendo que

cada um apresentam propriedades e finalidades diferentes. Dentre os filamentos mais comercializados, destacam-se o PLA, PETG, ABS Premium e o Tritan.

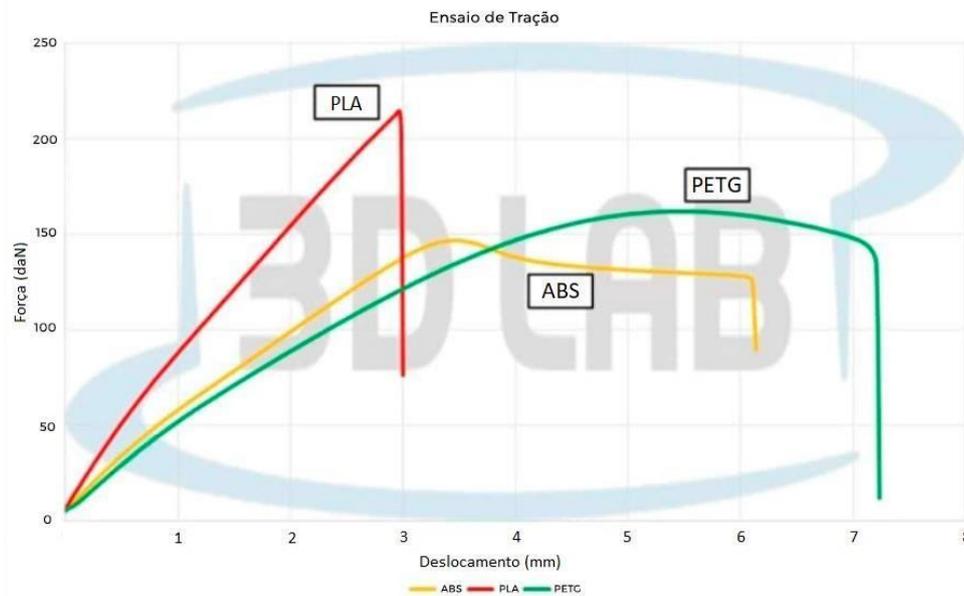
O PLA se trata de um material produzido através de fontes renováveis, portanto se trata de um produto ecologicamente correto, pode ser produzido a partir do amido de milho, das raízes da mandioca e da cana. Possui uma degradação rápida quando lançado na natureza, sendo em torno de 48 meses quando em contato com a água, e 24 meses quando enterrado. Ainda, uma vantagem interessante do PLA é que é inofensivo a saúde humana, ou seja, pode ser usado em recipientes de alimentos e em caso de ingestão de alguma parte acidentalmente, não trará riscos à saúde, uma vez que o organismo o converte em ácido lático, que se trata de uma substância segura a saúde humana (SILVEIRA, 2018).

O PETG possui uma funcionalidade muito similar ao filamento ABS, apresentando boa resistência à temperatura, durabilidade e ótima capacidade de resistência, e possui a facilidade de ser impresso como o filamento PLA. Outra vantagem do PETG é que ele apresenta pouca deformação durante a impressão (3DLAB, 2017).

O ABS é um filamento feito a partir do petróleo, e foi um dos primeiros filamentos a serem utilizados e possuem algumas características como: Resistência a elevadas temperaturas, resistência a impactos, resistência a umidade, possui boa flexibilidade, e também se trata de um material muito durável.

O filamento TRITAN é um material durável que possui características únicas para impressão 3D, uma vez que é feito de copoliéster e permite a construção de peças com alta resistência. Por ser um material que resiste a altas temperaturas e pressão, ele é comumente utilizado na área de engenharia para a fabricação de peças mecânicas. Além disso, por possuir baixa contração e quase nenhum empenamento, sendo ideal para a impressão de peças grandes (3DLAB, 2017). A Figura 2 demonstra o comportamento de três dos quatro filamentos utilizados no trabalho quando submetidos a esforços de tração.

Figura 2 - Comportamento dos filamento PLA, PETG e ABS em ensaio de tração.



Fonte: 3Dlab (2017)

Através da análise percebe-se que o PLA foi o filamento que aguentou maior carga, porém foi o que se mostrou menos dúctil entre todos, uma vez que não teve grande deformação antes do rompimento. O ABS foi o que apresentou maior percentual de deformação, entretanto foi o que menos suportou carga entre os 3 filamentos. O PETG suportou em torno de 160 kg, porém teve uma boa absorção antes da sua ruptura (3DLAB,2017).

Fazendo uma comparação entre todos, é possível perceber que o PETG é capaz de suportar uma carga maior que o ABS e ser mais dúctil. Em seguida, comparando o PLA com o PETG, é notório que ele suportou maior carga, entretanto teve uma deformação menor antes da ruptura.

3.4. Máquina universal de ensaios.

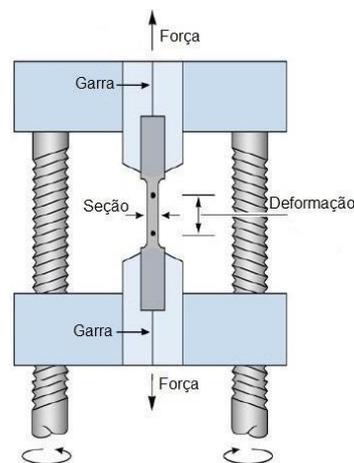
Quando se deseja conhecer o comportamento de determinados materiais quando submetidos a forças e suas propriedades, os ensaios mecânicos se tornam indispensáveis. Entre os ensaios mecânicos, os que mais se destacam são o de tração e compressão, no entanto, existem outros tipos de ensaios como, por exemplo, o ensaio de flexão, impacto, abrasão, entre outros. A Máquina Universal de Ensaio, em sua maioria, são vinculadas a um software que gera um diagrama de carga versus deslocamento a medida que o ensaio vai acontecendo.

Devido a sua variedade de funções, a Máquina Universal de Ensaio atende diversas normas nacionais e internacionais, sendo algumas delas NBR, ISO, ASTM, ABNT BIOPDI(n.d). Essa máquina é muito utilizada em diversas áreas: construção civil, polímeros, plástico, têxtil, madeira, automotivo, entre outros.

3.4.1. Teste de tração

Os ensaios de tração tem por objetivo a determinação da resistência mecânica de um material quando este é submetido a esforços de tração. Um software, por meio de sensores presentes na máquina universal de ensaios, faz o registro dos dados do deslocamento da placa superior em relação à posição inicial estabelecida, bem como a força aplicada em cada instante de tempo (CANTO e PESSAN, 2003). A Figura 3 apresenta o princípio de funcionamento de um teste de ensaio .

Figura 3 - Modelo representativo de um ensaio de tração.



Fonte: Biopdi (s.d)

O valor da tensão de tração pode ser mensurado pela Equação 1:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Em que, σ é a tensão de tração (MPa), P é a carga de tração (kN), A é a área inicial do corpo de prova (m²).

A área para o corpo de prova pode ser calculada utilizando a Equação 2.

$$A = W.T \quad (2)$$

Em que, W é a largura da seção estreita do corpo de prova, T é a espessura do corpo.

A deformação específica do material é dada pela Equação 3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (3)$$

Em que ε é a deformação específica, ΔL é a variação de comprimento (m), L_0 é o comprimento inicial (m), L_i o comprimento instantâneo(m)

3.4.2. Teste de compressão

O ensaio de compressão é a aplicação de determinada carga em um corpo de prova. Quando a carga é aplicada, o corpo tende a encurtar sua altura e aumentar seu diâmetro, sendo a deformação encontrada por meio da medição da distância entre as placas que comprimem o corpo pela a carga de compressão (VALÍČEK, 2015)

Por meio de testes de compressão, é possível determinar a força necessária para deformar ou romper esse corpo, podendo ser obtidos Módulo de elasticidade, tensão à compressão, tensão de escoamento, resistência à compressão, deformação sob compressão.

O valor da tensão de compressão pode ser mensurado pela seguinte Equação 1 e a deformação específica pela Equação 3. A área, por apresentar uma seção transversal circular, deve ser calculada utilizando a Equação 4.

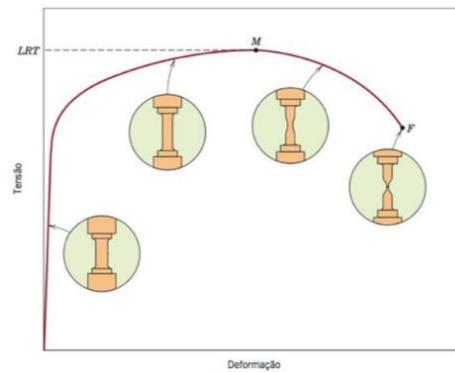
$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

Em que, d é o diâmetro do corpo de prova (m).

3.4.3. Curva Tensão-Deformação

A curva tensão-deformação é uma forma de representar graficamente o comportamento de deformação de um determinado material quando submetido a carga de tração ou compressão.

Figura 4 - Curva Tensão-Deformação.

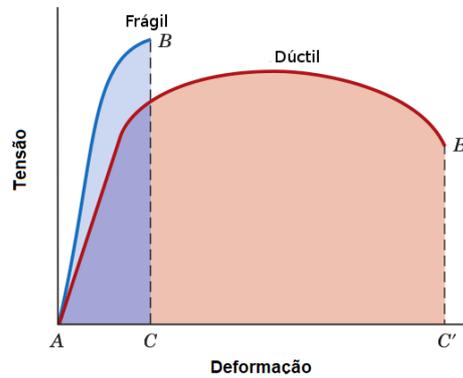


Fonte: Callister, Rethwisch(2016)

A Figura 4 exemplifica por meio da curva tensão-deformação o comportamento típico de um material quando submetido a um ensaio de tração até o momento de sua ruptura, ponto F. O ponto representado pela letra M é o ponto mais alto da curva, onde é possível observar a maior tensão que esse corpo aguentou, sendo representada pela letras LRT (Limite de Resistência a Tração).

A Tensão (σ) para esse gráfico é calculado utilizando a Equação 1, enquanto a deformação específica, utiliza-se a Equação 3. O gráfico Tensão-Deformação pode apresentar curvas diferentes se o material estudado for dúctil ou frágil, como ilustrado na Figura 5. Um material dúctil é aquele que apresenta grandes deformações antes de atingir o ponto de ruptura. Já um material frágil se deforma muito pouco antes de atingir o ponto de ruptura (HIBBELER, 2004).

Figura 5- Comparação das curvas de Tensão-Deformação para materiais frágeis e dúcteis



Fonte: Adaptado Callister, Rethwisch(2016)

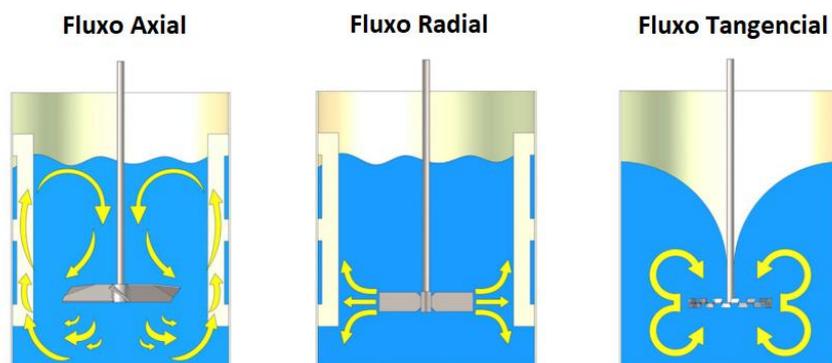
3.5. Agitação e mistura.

3.5.1. Impelidores

Um sistema de agitação necessita, obrigatoriamente, do uso de impelidores, sendo eles formado de hélices ou pás de diversos formatos e comprimentos, que são fixos a um eixo central girante. Normalmente, o eixo é fixo no topo do tanque. Os impelidores ou, como também são conhecidos, agitadores, tem por finalidade criar um fluxo dentro de um tanque (BARBOSA, 2004).

Os impelidores podem ser classificados de acordo com o fluxo que produzem, sendo eles de fluxo radial, axial ou tangencial, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6- Tipos de fluxos gerados por impelidores.



Fonte: Grabe(2023)

O fluxo axial impulsiona o fluido contra o fundo do tanque, proporcionando, assim, o processo de mistura. Em contrapartida, o fluxo radial promove a mistura ao impulsionar o

fluido contra as paredes. Já o tangencial proporciona um movimento circular em volta do eixo de acionamento, tendo as componentes axial e radial coexistindo simultaneamente (CREMASCO, 2014). Os impelidores também podem se diferenciar com base no regime de mistura, laminar ou turbulento, quanto, também, pela sua finalidade (BARBOSA, 2004).

Em biorreatores, é comum se utilizar o impelidor Rushton de seis pás planas (Figura 7), pois, esse agitador promove um fluxo radial ao fluido, fazendo com que obtenha uma mistura mais homogênea, juntamente com uma melhor transferência de oxigênio (PASTEL et al., 2009)

Figura 7- Impelidor convencional de aço inoxidável.



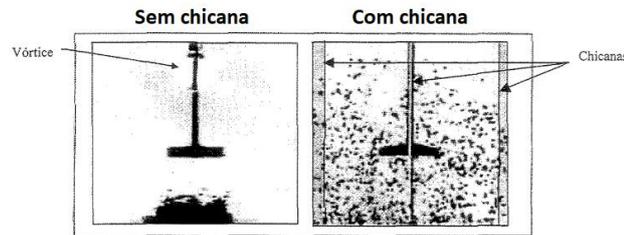
Fonte: Do autor (2023)

3.5.2. Chicanas

As chicanas ou defletores, são aparatos utilizados em tanques agitados para minimizar a formação de vórtices e aumentar a estabilidade do sistema. Usualmente, utilizam chicanas para promover fluxo axial em uma mistura e em suspensão de sólidos, já para fluxos radiais, são usadas para dispersão de gás (BARBOSA, 2004).

A diferença entre um processo de agitação com e sem o uso de chicanas, pode ser observado na Figura 8.

Figura 8- Comparação do processo de agitação com e sem chicanas.



Fonte: Myers et al (2002)

Pode ser observado que uma grande disposição de sólidos no fundo do tanque onde a agitação ocorre sem a presença de chicanas, como, também, a formação de vórtice.

3.5.3. Reologia

A viscosidade pode ser definida como uma medida de resistência do fluido, sendo este líquido ou gasoso, à sua taxa de deformação. Ou seja, esta propriedade se opõe ao escoamento do fluido e, quanto maior a viscosidade, maior será a tensão de cisalhamento necessária para fazer com que este se mova (WELTY et al., 2017).

A grande maioria dos fluidos segue a Lei de Newton da Viscosidade apresentada na Equação 5.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr} = \mu \cdot \gamma' \quad (5)$$

Em que μ é a viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [m.Pa.s].

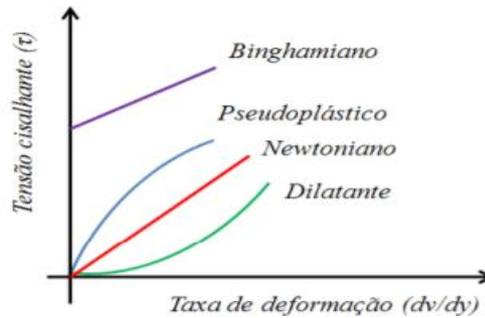
Quando um fluido obedece a Lei de Newton, este pode ser chamado de fluido newtoniano, uma vez que a tensão de cisalhamento necessária para o movimentar, τ , segue uma relação linear à sua taxa de deformação, γ' (WHITE, 2011).

Existem fluidos que não obedecem a Lei de Newton, esses são conhecidos de fluidos não-newtonianos. Este grupo é dividido, ainda, de acordo com o comportamento das substâncias que dele fazem parte, sendo os principais subgrupos: pseudoplásticos, dilatantes e fluidos de Bingham. Os pseudoplásticos são aqueles cuja viscosidade diminui conforme há um aumento da tensão cisalhante. Já quando a viscosidade do fluido aumenta com a tensão de cisalhamento, os fluidos são chamados de dilatantes. Os fluidos de Bingham são aqueles cujo comportamento requer uma tensão finita de escoamento antes de começar a escoar.

A Figura 9 apresenta o comportamento da tensão dos fluidos newtonianos e não-newtonianos e dos subgrupos pseudoplásticos, dilatantes e plásticos de Bingham de acordo

com a taxa de deformação destes, γ' .

Figura 9- Reograma de fluídos.



Fonte: Fox & McDonald (1998)

3.6. Tempo de Mistura

O tempo de mistura (t_m) é definido como o período de tempo necessário para a completa homogeneização de um fluido agitado em um reator (KRAMERS et al., 1953). De acordo com Korda et al. (2013), o tempo de mistura é um parâmetro de desempenho econômico de um tanque agitado e impacta diretamente nos custos de operação e na qualidade final do produto.

Existem alguns métodos para determinação do tempo de mistura, sendo os mais relevantes o método da temperatura, colorimétrico e condutividade.

3.6.1. Método da temperatura

O método de pulso de temperatura consiste em retirar 10% do volume inicial de água presente no biorreator e, em seguida, adicionar 10% de água a uma temperatura mais elevada, analisando a variação da temperatura ao longo do tempo. O t_m foi obtido como sendo o tempo necessário para que o valor da temperatura atingisse 95% do seu valor final (TAN et al., 2011)

3.6.2. Método colorimétrico

A determinação do tempo de mistura, através desse método, se dá pela adição de um corante em um líquido claro. No entanto pode ser realizado, também, por meio de uma

reação química na presença de um indicador (BATTAGLINI, 1998; TAN, 2011).

3.6.3. Método de condutividade

O método de condutividade ou pH, consiste na injeção de soluções ácidas (HCl) ou básicas (NaOH) na mistura e analisado o pH até a estabilização desta variável (CORRÊA, 2016).

3.7.Fator de Tempo de Mistura

O fator tempo de mistura é utilizado como um parâmetro para a realização de aumento de escala para sistemas agitados. Este fator é proporcional ao tempo de mistura e a rotação do impelidor. Assim como no tempo de mistura, o objetivo dos processos industriais é a obtenção do menor fator tempo de mistura possível durante o processo. Quando se deseja fazer um “scale-up” do sistema de agitação, deve-se utilizar o parâmetro fator de tempo de mistura (φ). O fator de tempo de mistura pode ser obtido por meio da Equação 6.

$$\varphi = \frac{t_m (ND_i^2)^{\frac{2}{3}} g^{\frac{1}{6}} D_i^{\frac{1}{2}}}{H_L^{\frac{1}{2}} D_T^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

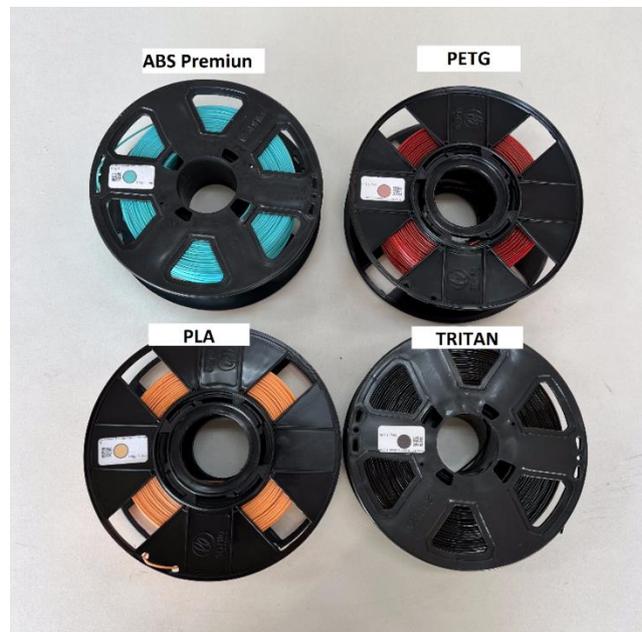
Em que, t_m é o tempo de mistura (s), N é a rotação (rps), g é a gravidade, D_i o diâmetro do impelidor (m), H_L é a altura de líquido (m), D_T é o diâmetro do tanque (m).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Escolha dos filamentos

Existem dezenas de filamentos no mercado, no entanto, foram selecionados quatro filamentos que possuem características mais adequadas para a aplicação como impelidor em tanques agitados, sendo eles o PLA, PETG, ABS Premium e o TRITAN. A Figura 10 apresenta os quatro tipos de filamentos com suas referidas cores.

Figura 10- Filamentos utilizados no presente trabalho



Fonte: Do autor (2023)

4.2. Modelagem e Impressão dos corpos de prova .

Inicialmente, os corpos para realização dos testes de tração e compressão foram modelados seguindo as recomendações presentes na normal ASTM D638-14 (2014) e ASTM D695(2002), instituídas pela American Society for Testing and Materials.

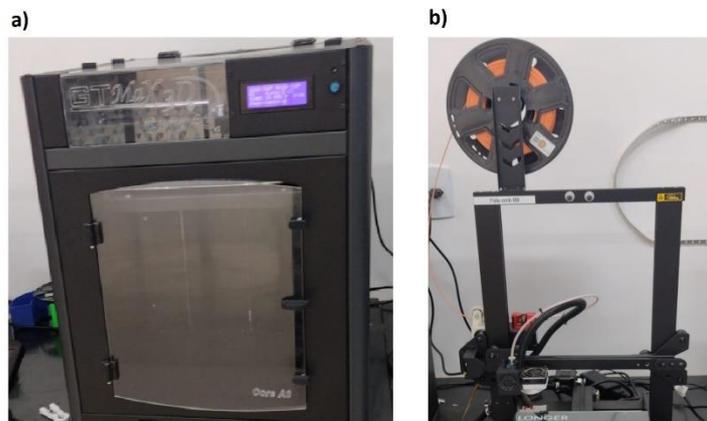
Posteriormente, foi utilizada uma impressora do modelo GTMax 3D core a3v2 e outra do modelo Creality Ender 3 3D FDM, ambas mostradas na Figura 11. A impressora GTMax 3d core a3v2 é acompanhada de uma mesa aquecida com capacidade de imprimir objetos com volume máximo de 27 litros, sendo utilizadas para imprimir os objetos feitos de ABS

Premium e TRITAN, uma vez que demandam temperaturas mais elevadas.

Utilizou-se, também, a impressora Creality Ender 3 3D FDM, que é acompanhada de uma mesa capaz de imprimir objetos com volume de até 12,5L, sendo utilizada para impressão dos termoplásticos PLA e PETG.

Todos os objetos foram impressos em parceria com o Centro Universitário de Lavras (UNILAVRAS), onde foi utilizado o Laboratório de criações e impressões (“espaço maker”).

Figura 11- Impressora 3D utilizadas no projetos, modelos a) GTMax3D b) Creality Ender 3 3D FDM.



Fonte: Do autor(2023)

Os corpos de prova foram impressos seguindo alguns parâmetros pré-estabelecidos, sendo a temperatura de extrusão determinada de forma específica para cada um dos termoplásticos, conforme recomendado pelo fabricante e mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na impressão dos corpos de prova

PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES
Preenchimento Interno	Triangular
Densidade de preenchimento	100%
Velocidade de impressão	60 mm/s
Largura da extrusão	0,4 mm
Camadas sólidas superiores	100% preenchida
Camadas sólidas inferiores	100% preenchida
Camadas sólidas em paredes laterais	100% preenchida
Espessura de cada camada	0,2 mm

PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES
Orientação da deposição dos filamentos	55°
Diâmetro dos filamentos	1,75mm
Temperatura de extrusão – PLA	195°C
Temperatura de extrusão – PETG	235°C
Temperatura de extrusão – ABS	225°C
Temperatura de extrusão – TRITAN	280°C

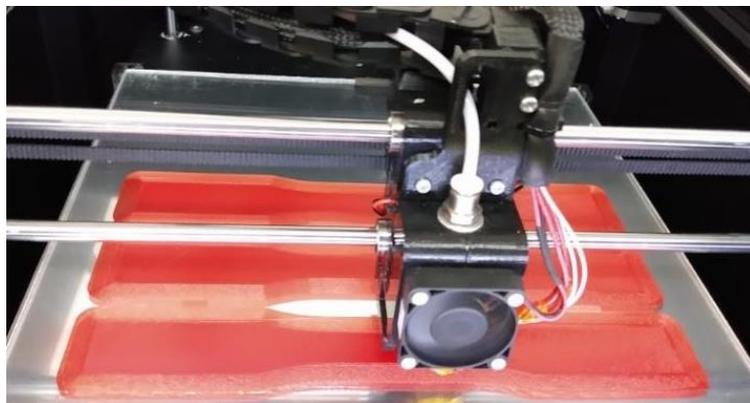
Fonte: Do Autor (2023)

A forma triangular do preenchimento interno é anteriormente estabelecido pelo software após a realização da modelagem e exportação para impressão 3D. A largura de extrusão é um parâmetro já estabelecido pelo fabricante. Com intuito de testar a resistência máxima suportada por cada material, optou-se por um preenchimento de 100% para os corpos de prova. A velocidade de impressão foi definida de forma que não prejudicasse a estrutura dos corpos, optando por uma velocidade considerada média de 60 mm/s.

Foi utilizado um bico de impressora de 0,2 mm, uma vez que a impressora atua no intervalo de 0,005 mm e 0,4 mm, dessa forma, os objetos finais apresentaram uma maior precisão no acabamento.

Os filamentos possuem um diâmetro padrão de fabricação de 1,75 mm, e foram dispostos a 55° devido a direção dos esforços que a peça estará submetida durante sua vida útil. Foram impressos 5 corpos de prova de tração e 5 para compressão em cada um dos filamento.

Figura 12- Processo de impressão dos corpos de provas.



Fonte: Do autor (2023)

4.3. Ensaio Mecânico

Nos ensaios mecânicos foram realizados apenas os ensaios de tração e compressão, pois o intuito deste estudo é caracterizar os materiais e determinar qual material possui maior limite de resistência máximo. Os testes de tração e compressão foram realizados na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (*UEPAM*) do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras, com o auxílio de uma máquina universal de ensaios, Figura 13.

Figura 13- Máquina universal em ensaio de ensaios do UEPAN (DCF/UFLA).

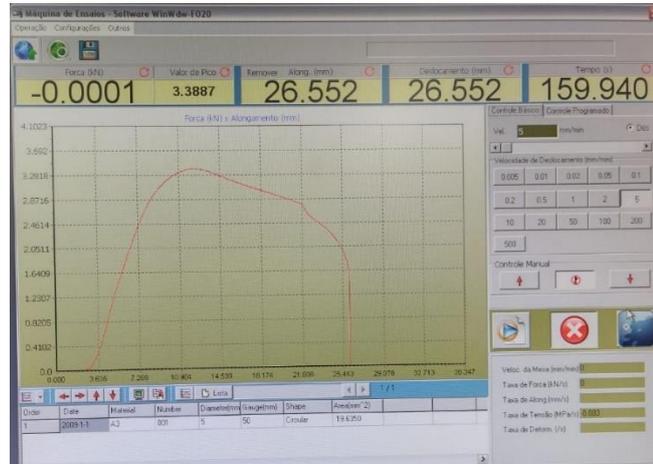


Fonte: Do autor (2023)

De acordo com as normas vigentes, são recomendados a realização de testes de ensaios em materiais plásticos utilizando cinco corpos de prova para caracterizar as propriedades dos materiais com precisão.

O equipamento utilizado foi acompanhado de um software próprio, chamado Wdw f020, que realizava o monitoramento dos ensaios. A interface do software está apresentada na Figura 14.

Figura 14- Interface do software Wdw f020.



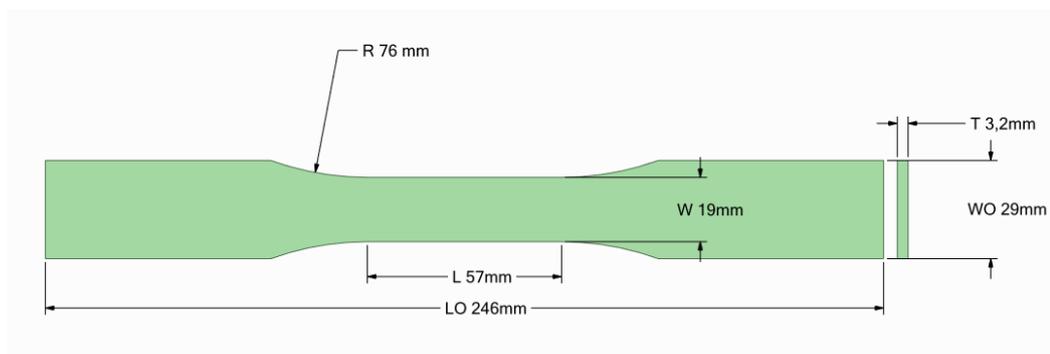
Fonte: Do autor (2023).

O software permitiu a ajustar a velocidade de ensaio para a velocidade recomendada nas normas vigentes de 5 mm/min. Os dados foram coletados com uma precisão de 0,06 segundos. Após a realização de cada ensaio, foi gerado uma matriz de dados no formato .txt, na qual possuía informações de número de identificação, carga (kN), tempo(s) de deformação (mm). O tratamento dos dados foi feito utilizando o software Microsoft Excel®, sendo obtidos valores de tensão e deformação para os materiais.

4.3.1. Ensaio de tração.

Para os ensaios de tração, os corpos de prova foram modelados segundo a ASTM D638 (2014), se enquadrando na categoria de tipo III, uma vez que a espessura da chapa do objeto se encontra entre o intervalo de 7 e 14 mm (Figura 15).

Figura 15- Dimensões dos corpos de prova submetidos à tração.



Fonte: Do autor (2023)

Para o ensaio de tração, foi utilizado a Máquina Universal de Ensaio, na qual o corpo de prova foi preso por dois pregadores de metais em suas extremidades, como mostra a Figura 16.

Figura 16- Ensaio de tração na Máquina Universal de Ensaio.

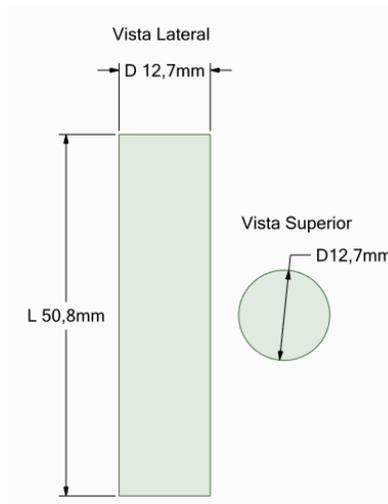


Fonte: Do autor (2023)

4.3.2. Ensaio de compressão.

Para a realização do ensaio de compressão, foi feito a modelagem computacional dos corpos de prova com base na norma ASTM D695(2002), responsável pelo ensaio de compressão para plásticos rígidos.

Figura 17- Dimensões dos corpos de prova submetidos a compressão.



Fonte: Do autor (2023)

Para o ensaio de compressão, utilizou-se também a máquina de ensaio. No entanto,

foi necessário remover ambos os pregadores e adicionar um adaptador próprio para esse tipo de ensaio, como mostrado na Figura 18.

Figura 18- Ensaio de compressão utilizando uma Máquina Universal de Ensaios.



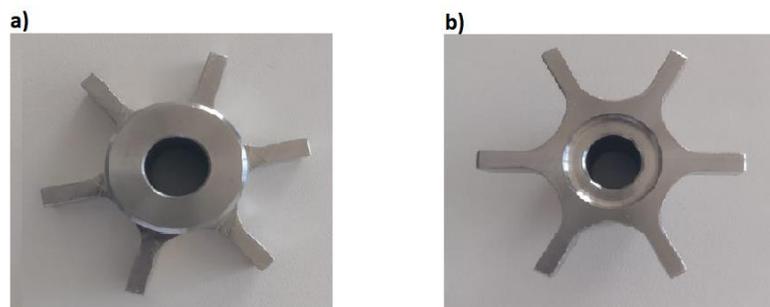
Fonte: Do autor (2023)

4.4. Modelagem e impressão dos impelidores.

4.4.1. Impelidor Rushton

As dimensões usadas na modelagem do impelidor Rushton, foram obtidas por meio da medição do impelidor convencional (Figura 19), utilizando um paquímetro digital.

Figura 19- Impelidor Rushton convencional a) vista superior b) vista inferior.

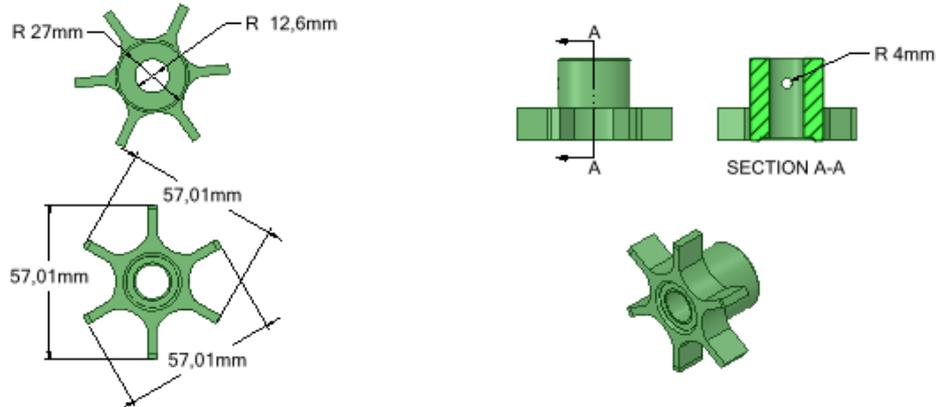


Fonte: Do autor (2023)

Os projetos foram dimensionados utilizando o software SpaceClaim, do pacote ANSYS

free students, Figura 20:

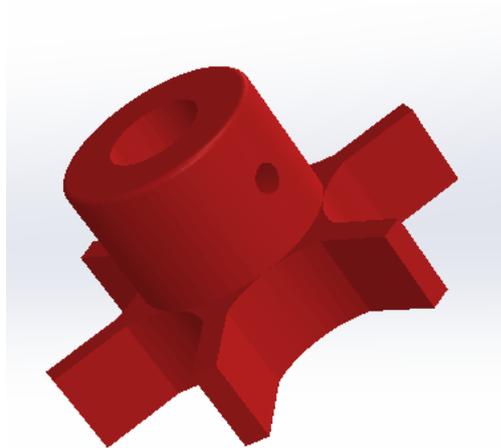
Figura 20- Dimensionamento do impelidor Rushton.



Fonte: Do autor (2023)

Como a versão gratuita para estudante do software ANSYS Spaceclaim é limitada, não foi possível salvar o arquivo no formato utilizando em impressoras 3D (.stl). Por esse motivo, foi modelado um outro impelidor por meio do software SolidWorks, no qual, também, foi possível fazer a análise dinâmica da peça em estudo.

Figura 21- Detalhes da modelagem do impelidor Rushton utilizando o software SolidWorks.



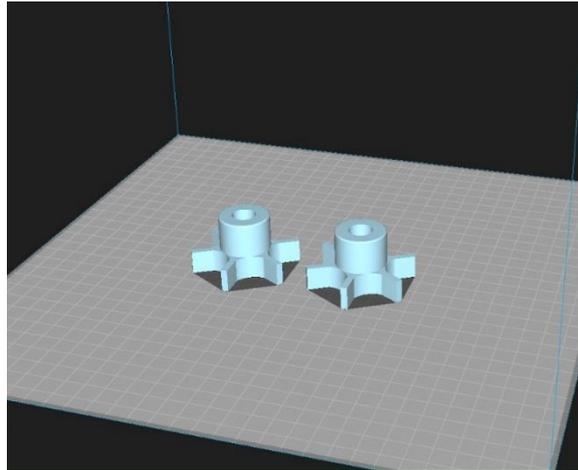
Fonte: Do autor (2023)

Como observado nas Figuras 21 e 22, o impelidor consta com um orifício em um de seus lados, sendo esse o local onde é introduzido um parafuso do tipo allen para fixar o impelidor no eixo central do biorreator. O orifício real possui um diâmetro de 4,2 mm, no entanto, foi modelado com 4 mm de diâmetro, isso se deve ao fato do material ser um plástico, tornando fácil a confecção da rosca interna do orifício utilizando um macho para

dar formato.

Feito a modelagem, foi utilizado o software CURA Ultimaker 3D para realizar o que se chama de “fatiamento”, que consta no processo no qual é feita a preparação da peça para a modelagem 3D (Figura 22).

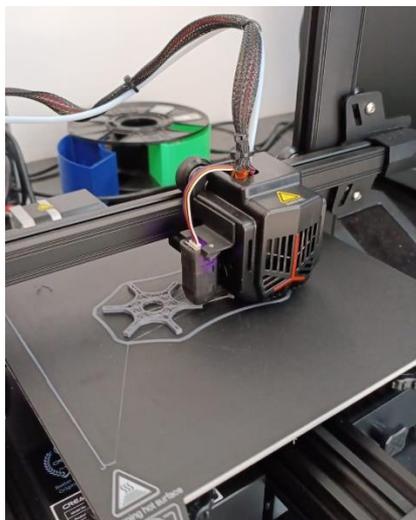
Figura 22- Interface gráfica do software CURA Ultimaker 3D



Fonte: Do autor (2023)

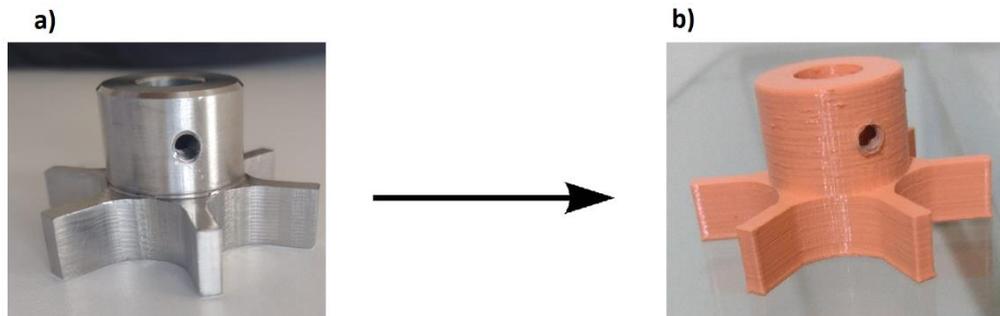
Após o processamento pelo software, se dá início a impressão do objeto pela impressora (Figura 23). O tempo de impressão de cada impelidor foi de 3,5 horas e o resultado pode ser observado na Figura 24, onde é possível ambos os modelos, impresso e convencional.

Figura 23- Imagem representativa do processo de impressão 3D dos impelidores.



Fonte: Do autor(2023)

Figura 24 - Comparação do a) impelidor convencional e b) impelidor impresso em termoplástico.



Fonte: Do autor(2023)

4.5. Biorreator

Para esse trabalho, utilizou-se o biorreator Biofoco® modelo Rubia 7,5L presente no Laboratório de Engenharia Bioquímica (LEB/UFLA). O biorreator é composto de um vaso de vidro de 16,7 cm de diâmetro, acoplado a um rotor na parte superior. O rotor é acionado por meio de um painel de controle que possui uma interface amigável ao usuário, podendo variar a rotação de 0 a 1200 rpm com ± 1 rpm de precisão.

Figura 25- Biorreator de bancada do Laboratório de Engenharia Bioquímica - UFLA



Fonte: Do autor(2023)

4.6. Tempo de mistura

Para encontrar o tempo de mistura foi utilizado o método de pulso de temperatura,

devido sua precisão e facilidade de realização. O impelidor foi acoplado ao eixo central do biorreator (Figura 25). Adicionou-se um volume de água de 3L dentro do vaso. Em seguida retirou-se 10% do volume (300mL) com o auxílio de um béquer e acionou-se o rotor do equipamento. Posteriormente, foi coletada a temperatura da água e adicionou-se 300mL de água em torno de 70°C ao vaso do reator, sendo, simultaneamente, acionado o cronômetro. A coleta de dados de temperaturas foi realizada a cada 10 segundos, totalizando 240 segundos de dados coletados. Foi utilizados impelidores prototipados nos termoplásticos PLA, PETG, ABS Premium e TRITAN, sendo coletado o tempo de mistura para ambos na rotação de 300 rpm e 600 rpm em duplicata.

Figura 26- Impelidor acoplado ao eixo central do reator e o sensor de temperatura



Fonte: Do autor(2023)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

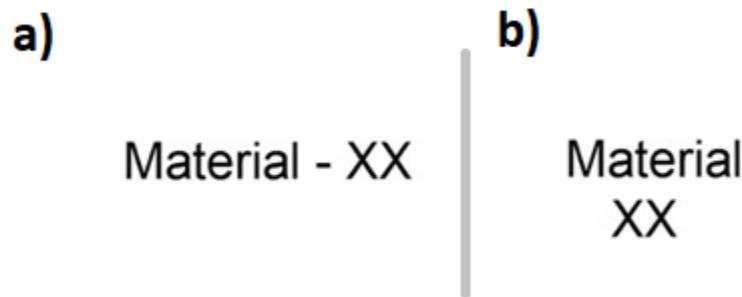
5.1. Impressão e Identificação dos corpos de prova

Ao analisar os corpos de prova impressos, é possível afirmar que são de boa qualidade, uma vez que não apresentaram nenhum defeito estrutural aparente. Foram impressos cinco corpos de prova para cada material em cada um dos ensaios, somando um total de quarenta corpos de prova, sendo vinte para o ensaio de tração e outros vinte para o ensaio de compressão.

Os corpos de prova de tração e compressão de cada material foram impressos de maneira conjunta, demandando um tempo total de 12 horas. Após a impressão, foi realizado o acabamento das peças, onde lascas do material foram retiradas com auxílio de uma lixa 800.

Para facilitar a identificação dos corpos de prova, foi desenvolvida a seguinte metodologia:

Figura 27- Metodologia adotada na identificação dos corpos de prova para ensaios de a) compressão b) tração.



Fonte: Do autor(2023)

Em que “Material” indica o nome do termoplástico usado no corpo de prova e XX indica a numeração de identificação, podendo variar de 1 a 5.

5.2. Ensaio de tração

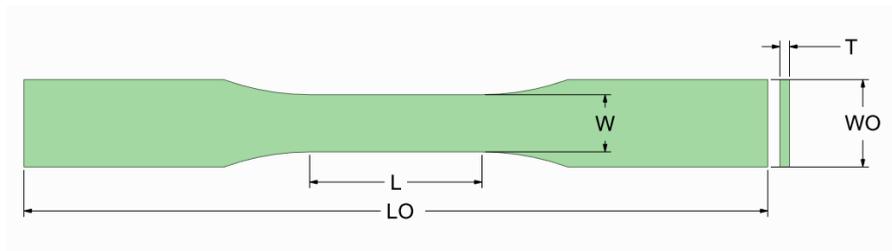
Na Figura 28, pode-se observar os corpos de provas correspondentes a cada um dos termoplásticos, sendo representado por cores diferentes pra facilitar a diferenciação dos materiais.

Figura 28- Corpos de prova do ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 29- Dimensões de referência para os corpos de prova do ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2023)

As dimensões expostas na Figura 29, foram utilizadas seguindo o padrão determinado pela norma ASTM D638(2014). A norma, também, cita valores de tolerância para cada uma dessas dimensões, sendo elas representadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova analisado, segundo a norma ASTM D638.

Dimensão	Sigla	Unidade	Tolerância
Largura da seção estreita	W	mm	$\pm 0,5$
Largura total	WO	mm	$\pm 0,5$
Comprimento total	LO	mm	-
Espessura	T	mm	$\pm 0,4$

Fonte: ASTM D638 (2014)

Na Tabela 3 é possível observar os dados coletados utilizando como referência as dimensões mostrada na Figura 29.

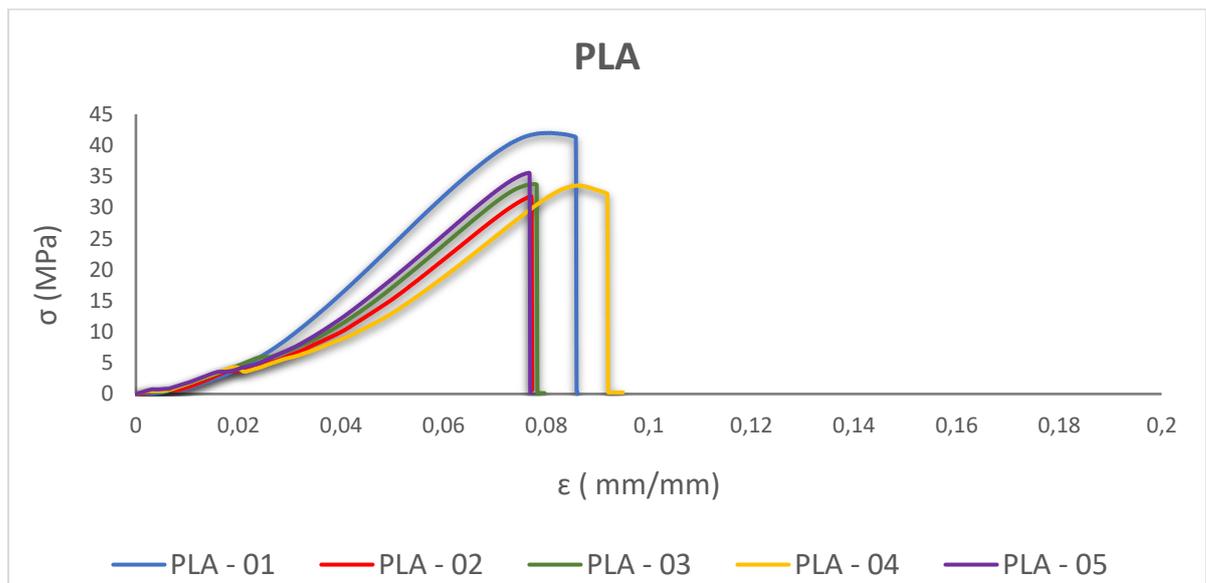
Tabela 3 - Dados referente as dimensões médias dos corpos de prova do ensaio de compressão.

Material	W (mm)	WO (mm)	LO (mm)	T(mm)	Área (mm ²)
Polácido Lácteo (PLA)	19,23	28,56	245	3,11	59,86
PETG	19,22	28,78	245	3,21	61,68
ABS Premium	19,33	28,71	245	3,12	60,26
TRITAN	19,07	28,99	245	3,29	62,66

Fonte: Do autor(2023)

Após o ensaio obteve-se as informações de carga e deslocamento a cada instante de tempo, e com a área de seção calculada e o comprimento previamente medido, obteve-se a curva tensão x deformação para cada corpo de prova. Os dados obtidos são mostrados nas Figuras 30,31,32 e 33:

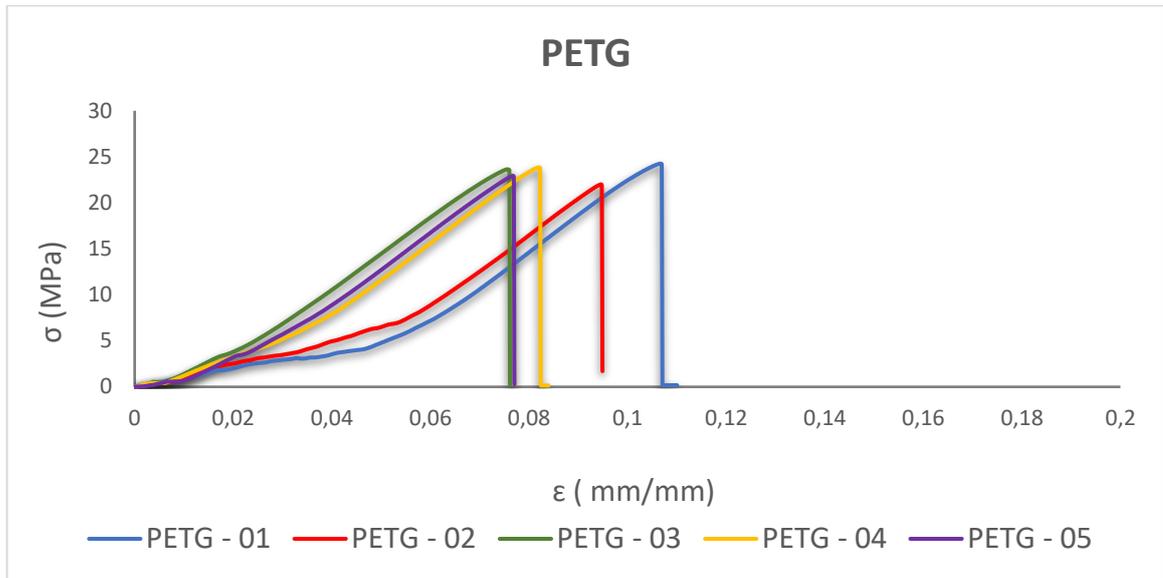
Figura 30- Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico PLA.



Fonte: Do autor (2023)

Ao se comparar as curvas Tensão-Deformação para o termoplástico PLA, exibidas na Figura 2, com a Figura 30, pode-se afirmar que trata-se de um material frágil.

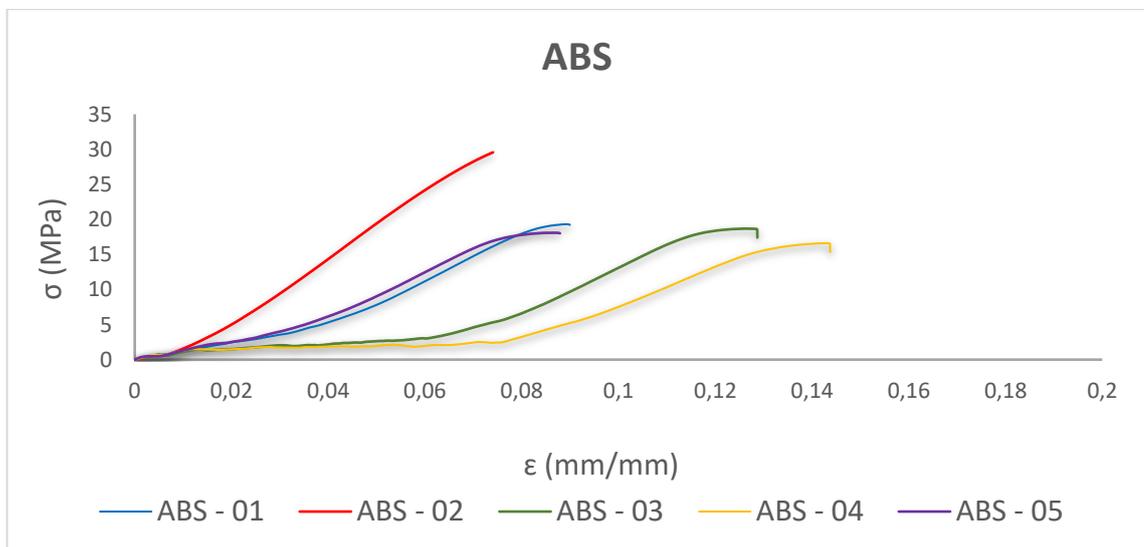
Figura 31- Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico PETG.



Fonte: Do autor(2023)

Os resultados para os corpos de provas de PETG submetidos a tração apresentaram um resultados já esperado.

Figura 32- Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico ABS.

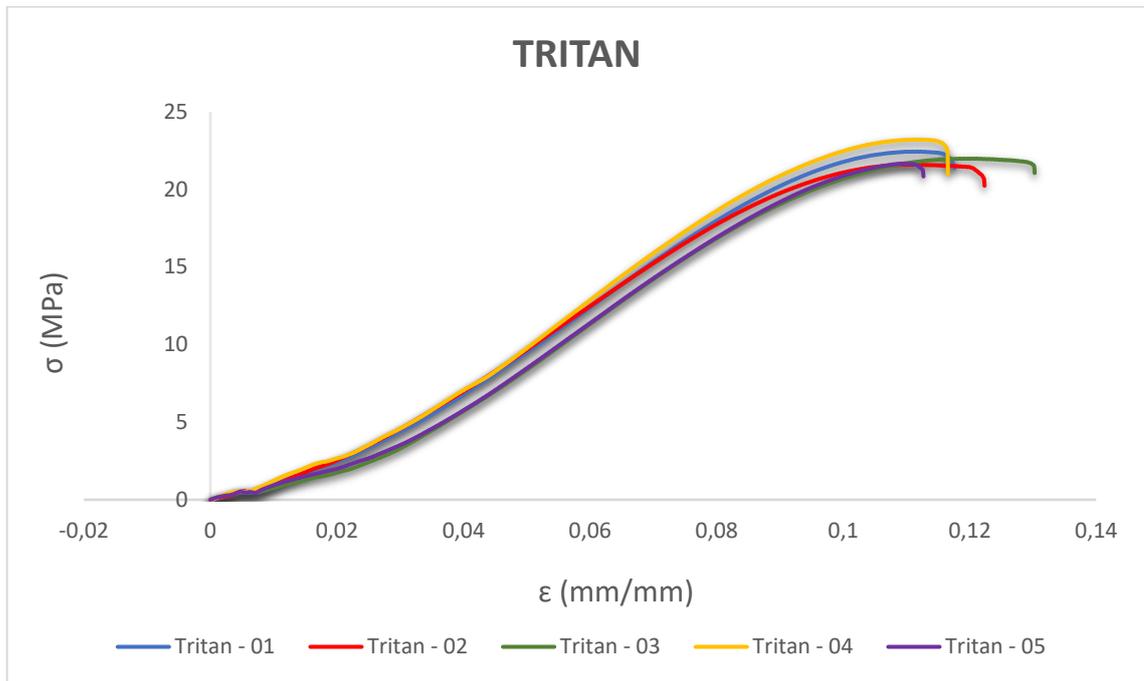


Fonte: Do autor (2023)

Analisando os resultados dos ensaios de tração para o termoplástico ABS, percebe-se que, ao comparar com a Figura 2, o mesmo apresentou um comportamento de material dúctil, embora tenha tido algumas oscilação entre os resultado, principalmente para o corpo de prova “ABS - 02”, no qual se rompeu antes do esperado, podendo ser devido a falhas estruturais internas no corpo de prova e até a falhas ligada a fixação do corpo de

prova na máquina de ensaios.

Figura 33- Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de tração para o termoplástico TRITAN.



Fonte: Do autor (2023)

Da mesma forma que o ABS, o termoplástico TRITAN também apresentou um comportamento de um material dúctil. Seus resultados não se divergiram muito nos cinco teste.

A Tabela 4 apresenta os dados de limite de resistência a tração para cada ensaio realizados para os termoplástico, juntamente com a deformação de ruptura desses materiais. Para deixar evidente a diferença entre os termoplásticos que apresentaram um comportamento de materias frágeis e de materias dúcteis, foi plotado a Figura 34 e feito uma análise comparativa entre eles.

Tabela 4 - Dados referente aos corpos de prova do ensaio de tração.

Material	Identificação	ε Ruptura (mm/mm)	Limite de Resistência a Tração (MPa)
Polácido	PLA 01	0,09	42,00
	PLA 02	0,08	31,83
Láctco (PLA)	PLA 03	0,08	33,77
	PLA 04	0,09	33,54

Material	Identificação	ϵ Ruptura (mm/mm)	Limite de Resistência a Tração (MPa)
	PLA 05	0,08	35,58
Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)	PETG 01	0,06	23,40
	PETG 02	0,09	22,00
	PETG 03	0,08	23,64
	PETG 04	0,08	23,85
	PETG 05	0,08	22,93
Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	ABS 01	0,09	19,32
	ABS 02	0,07	17,88
	ABS 03	0,13	18,70
	ABS 04	0,14	16,61
	ABS 05	0,09	18,10
Copolíster (TRITAN)	TRITAN 01	0,12	22,44
	TRITAN 02	0,12	21,60
	TRITAN 03	0,12	21,98
	TRITAN 04	0,11	23,22
	TRITAN 05	0,11	21,67

Fonte: Do autor(2023)

Tabela 5- Medidas de Limite de Resistência à Tração em cinco corpos de prova para cada termoplástico estudado.

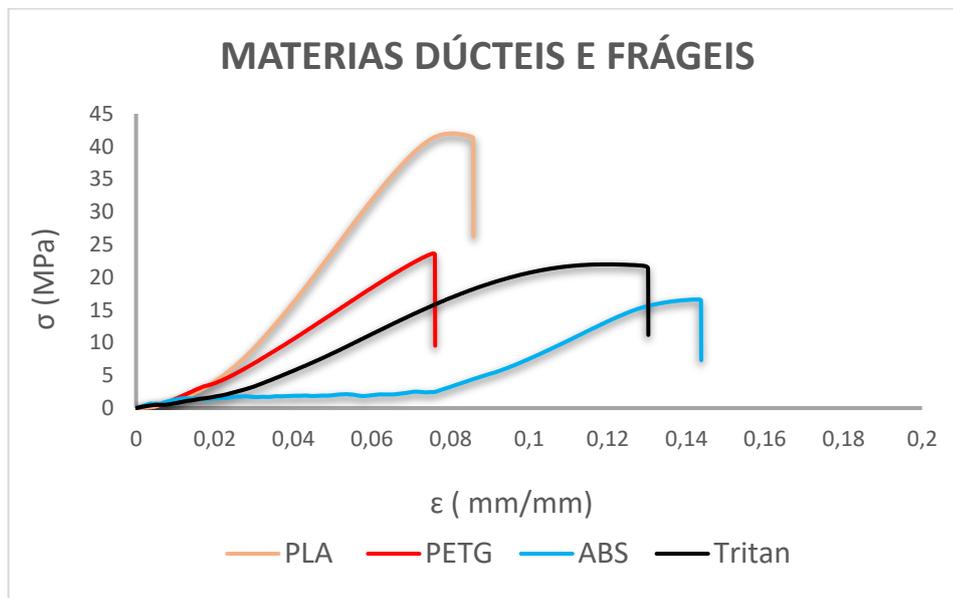
 Materiais	 Limite de Resistência à Tração
PLA	35,344 a1
PETG	23,164 b
ABS Premium	18,122 c
TRITAN	22,182 b

1 – médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem a um mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott($p < 0,05$)

Fonte: Do autor(2023)

É possível observar na Tabela 5 que o PLA apresentou a maior médias de Limite de Resistência à Tração entre os termoplásticos Analisados, seguido pelo PETG e o Tritan, que não tiveram uma diferença significativa entre si e, por último, o ABS Premium, apresentando o menor valor para o Limite de Resistência.

Figura 34- Curvas de Tensão-Deformação para comparação entre os termoplástico em ensaio de tração.

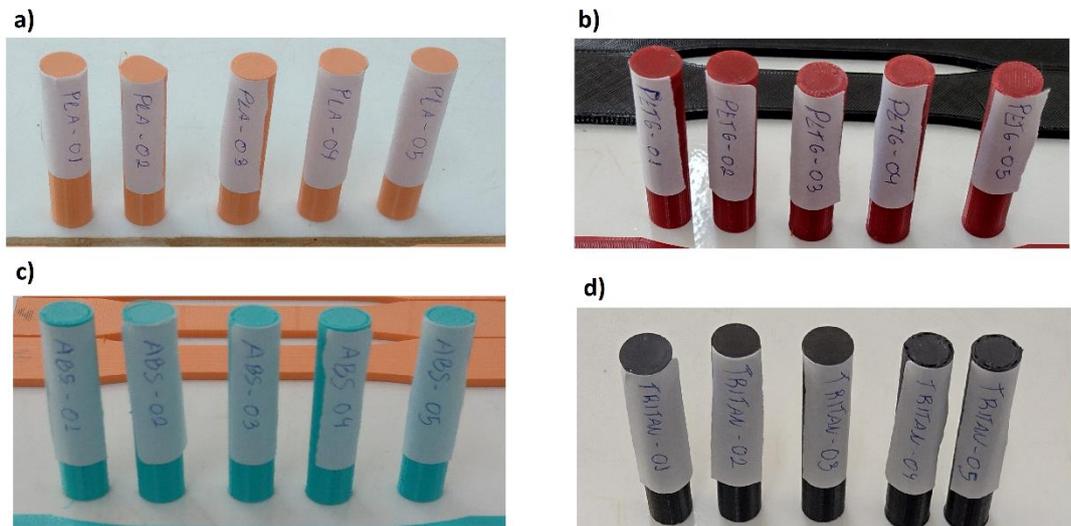


Fonte: Do autor (2023)

Analisando a Tabela 4 e o Figura 34, percebe-se que dentre os materiais termoplásticos estudados, aquele que apresentou um maior limite de resistência a tração foi o PLA, no entanto, como se trata de um material frágil, seu ponto de ruptura ocorreu antes do ABS e do Tritan, que são materias dúcteis, comprovando o mostrado na literatura.

5.3. Ensaio de compressão

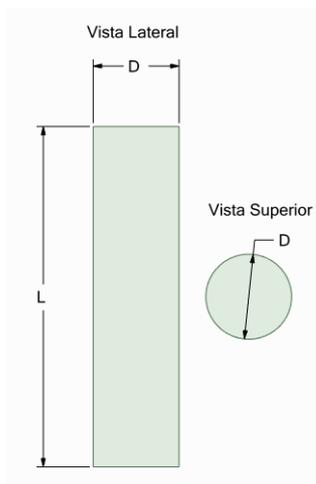
Figura 35- Corpos de prova do ensaio de compressão, sendo cada grupo de cinco referentes ao material: a) PLA b) PETG c) ABS d) TRITAN



Fonte: Do autor (2023)

Foi feito o uso de um paquímetro digital para coletar as dimensões dos corpos de prova, utilizando como referência as variáveis mostradas na Figura 36.

Figura 36- Dimensões de referência para os corpos de prova do ensaio de compressão.



Fonte: Do autor (2023)

Em que L é o comprimento, D é o diâmetro.

O software da máquina de ensaio gera os resultados em formato de arquivo de texto(.txt), logo, foi preciso realizar o tratamento desses dados utilizando o software Microsoft Excel, no qual utilizou-se delimitadores para separar e analisar os resultados.

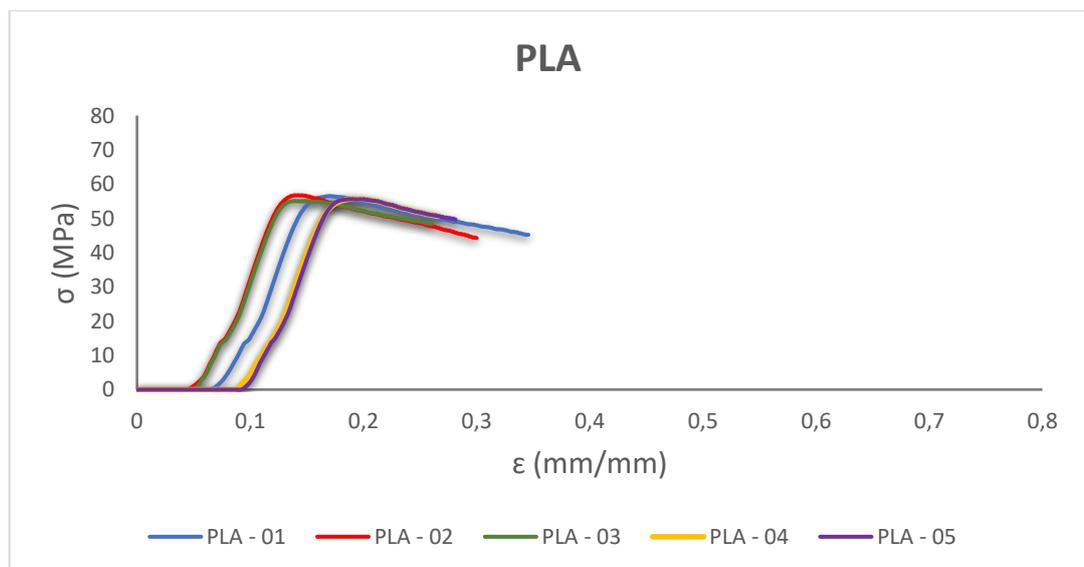
A Tabela 6 mostra os dados coletados, tratados e calculados dos corpos de prova para o ensaio de compressão.

Tabela 6 - Dados referente as dimensões média dos corpos de prova do ensaio de compressão.

Material	Identificação	L (mm)	D (mm)	Área (mm ²)
Polácido Láctico (PLA)	PLA	50,94	12,43	121,29
Poliétileno Tereftalato Glicol (PETG)	PETG	51	12,48	122,29
Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	ABS	50,51	12,66	125,85
Copoliéster (TRITAN)	TRITAN	50,97	12,52	123,04

Fonte: Do autor (2023)

Figura 37- Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico PLA.

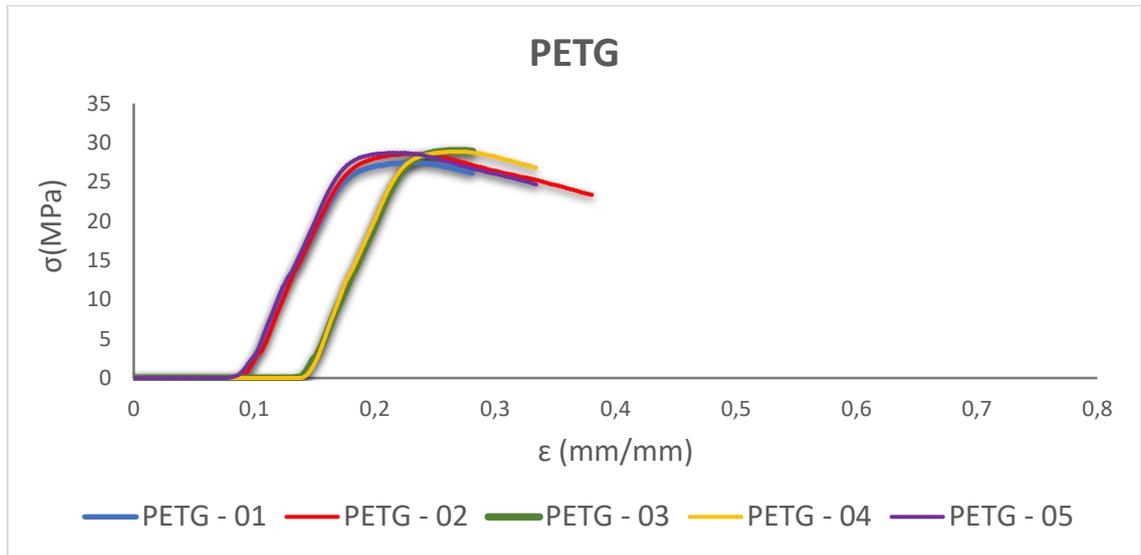


Fonte: Do autor (2023)

No ensaio de compressão, também foi possível observar o comportamento de material

frágil do PLA, apresentando um alto valor de tensão e pouca deformação antes da ruptura.

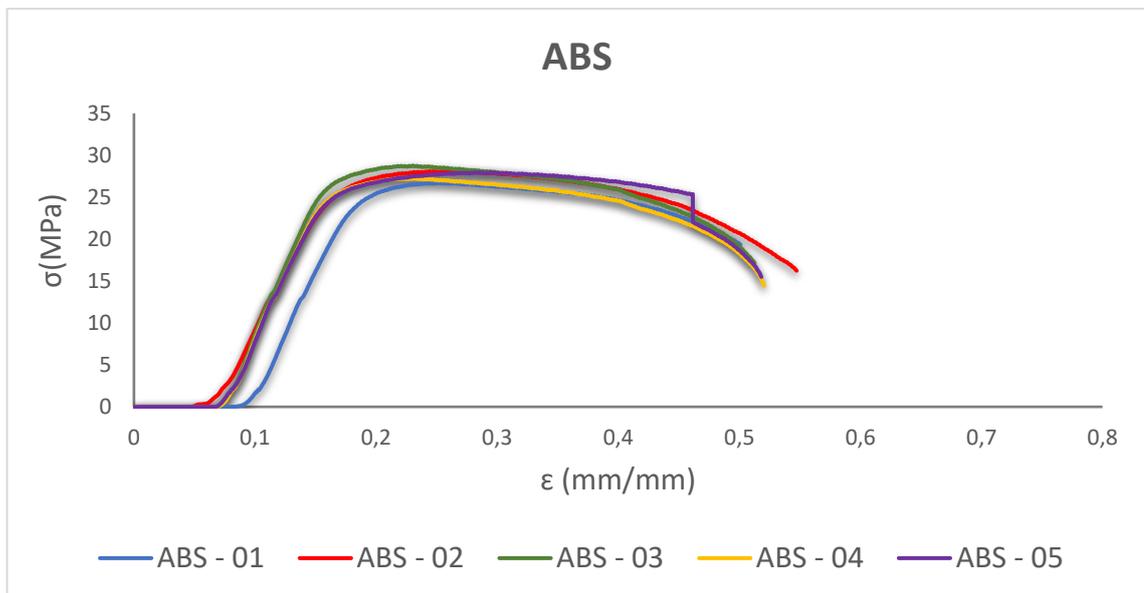
Figura 38 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico PETG.



Fonte: Do autor (2023)

O PETG, por ser um material frágil, apresenta uma curva seguindo o modelo do PLA, no entanto, começa a se deformar com uma tensão menor do que o PLA.

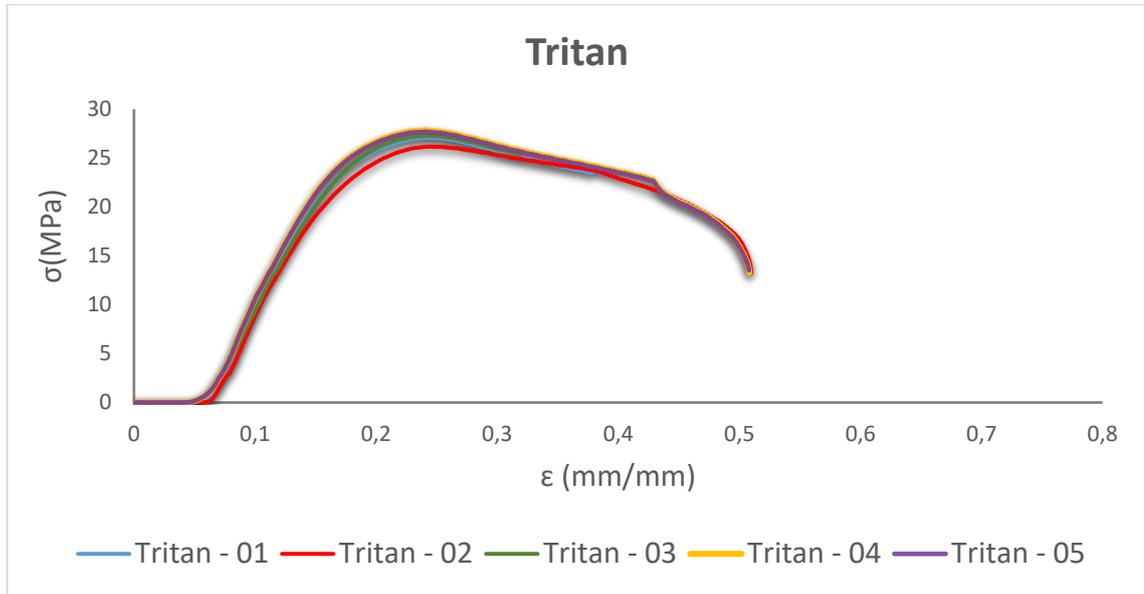
Figura 39 - Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico ABS.



Fonte: Do autor (2023)

Percebe-se que o termoplástico ABS apresentou grandes deformações antes da ruptura, isso mostra a sua característica de material dúctil. O mesmo não acontece nas curvas Tensão-Deformação para o PLA e o PETG.

Figura 40- Curvas Tensão-Deformação em um ensaio de compressão para o termoplástico TRITAN.



Fonte: Do autor (2023)

No termoplástico TRITAN também é observado grande deformação do material antes da ruptura.

A Tabela 7 apresenta os dados de limite de resistência a tração para cada um dos ensaios realizados. Assim como no ensaio de tração, também, foi selecionado um ensaio de cada termoplástico e plotado um gráfico para fins de comparação (Figura 41).

Tabela 7 - Dados referentes aos corpos de prova do ensaio de compressão.

Material	Identificação	Limite de Resistência a Compressão (MPa)
Polácido Láctico (PLA)	PLA 01	56,53
	PLA 02	56,76
	PLA 03	55,08
	PLA 04	55,77
	PLA 05	55,68
PETG	PETG 01	27,48
	PETG 02	28,58
	PETG 03	28,92
	PETG 04	28,87

Material	Identificação	Limite de Resistência a Compressão (MPa)
	PETG 05	28,73
	ABS 01	26,72
	ABS 02	28,09
ABS Premium	ABS 03	28,77
	ABS 04	27,26
	ABS 05	27,96
	TRITAN 01	27,10
	TRITAN 02	26,19
TRITAN	TRITAN 03	27,31
	TRITAN 04	27,84
	TRITAN 05	27,70

Fonte: Do autor(2023)

Tabela 8 - Medidas de Limite de Resistência à Compressão em cinco corpos de prova de cada termoplástico estudado.

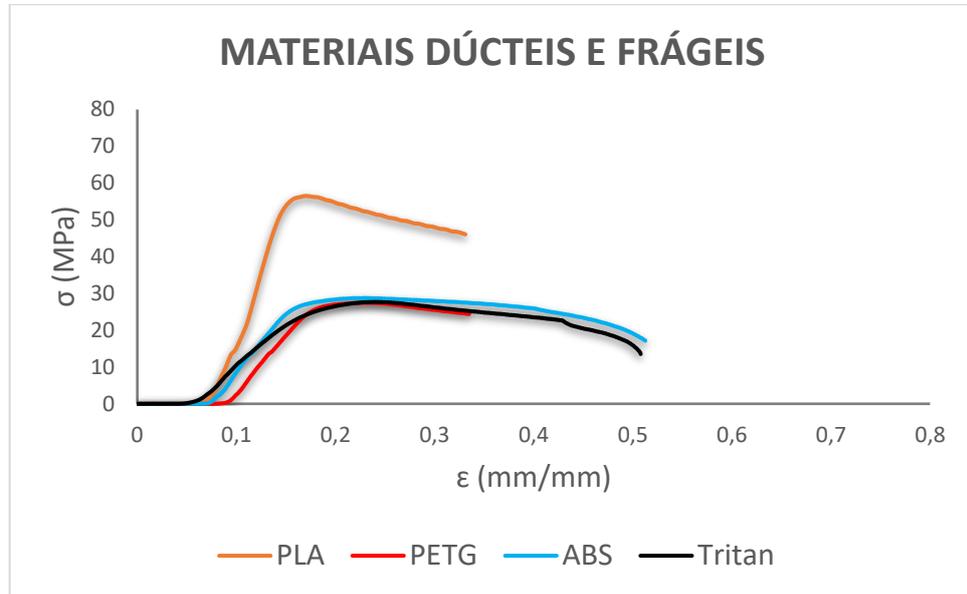
 Materiais	 Limite de Resistência à Compressão
PLA	56,17 a1
PETG	28,51 b
ABS Premium	27,76 cb
Tritan	27,23 c

1 – médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem a um mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott($p < 0,05$)

Fonte: Do autor(2023)

A Tabela 8, apresenta o PLA como o termoplástico que obteve o maior valor para o Limite de Resistência a Compressão, seguido pelo PETG, no qual os resultados demonstraram não se diferir do ABS Premium. O TRITAN apresentou o menor valor médio de Limite de Resistência à Compressão.

Figura 41- Curvas de Tensão-Deformação para comparação entre os termoplástico em ensaio de compressão



Fonte: Do autor(2023)

Analisando os gráficos referentes ao ensaio de compressão, percebe-se que no início dos testes ocorre deformação do material com uma baixa tensão sendo aplicada, isso acontece devido as fibras interna do material começarem a se rearranjarem até uma estrutura mais resistente, sendo necessário um aumento da tensão para o material começar a se deformar.

Para os ensaios de compressão notou-se uma proximidade nos resultados dos corpos de prova de cada um dos materiais, sendo que o PLA mostrou um limite de resistência em torno de três vezes maior quando comparo ao PETG, ABS e TRITAN, assim como mostrado previamente na Figura 2.

5.4.Tempo de mistura

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi utilizado um fluido newtoniano, a água ($\mu=0,000891 \text{ kg/m.s}$ e $\rho=997,0 \text{ kg/m}^3$).

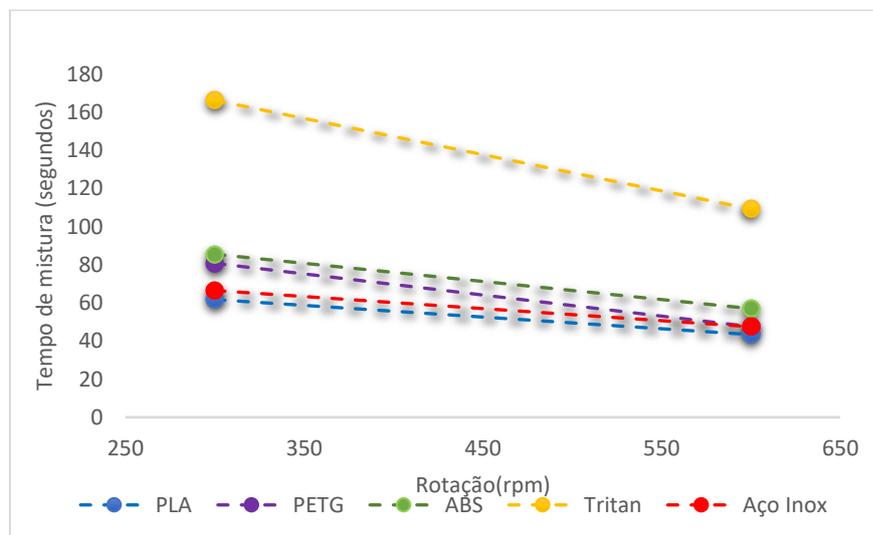
Este fluido foi selecionado devido a sua facilidade de ser encontrado e, também, por representar a reologia de vários fluidos usados na indústria.

Tabela 9 - Dados de tempo de mistura médio para cada rotação.

Material	Tempo de mistura (s) ± 5	
	Rotação	
	300rpm	600 rpm
Aço Inox	66,50	47,50
PLA	61,75	43,37
PETG	80,75	47,50
ABS	85,50	57,00
TRITAN	166,25	109,25

Fonte: Do autor (2023)

Figura 42- Tempo de mistura para cada material estudado



Fonte: Do autor(2023)

Como esperado, à medida que aumenta a frequência de agitação dos impelidores, diminui o tempo de mistura. Pelos dados apresentados na Tabela 9 bem como na Figura 42, o termoplástico PLA apresentou uma redução no tempo de mistura de 7,1% (300rpm), 8,7% (600rpm) quando comparado ao Aço Inox (Padrão). O PETG não apresentou um resultado satisfatório para a rotação de 300 rpm, uma vez que teve um aumento de 21,4%. No entanto, para 600 rpm o tempo de mistura foi o mesmo que o impelidor padrão. O termoplástico ABS apresentou um aumento de 28,6%(300 rpm), 20%(600 rpm). O Tempo de mistura utilizando o TRITAN teve um aumento de 250%(300rpm) e 230%(600rpm).

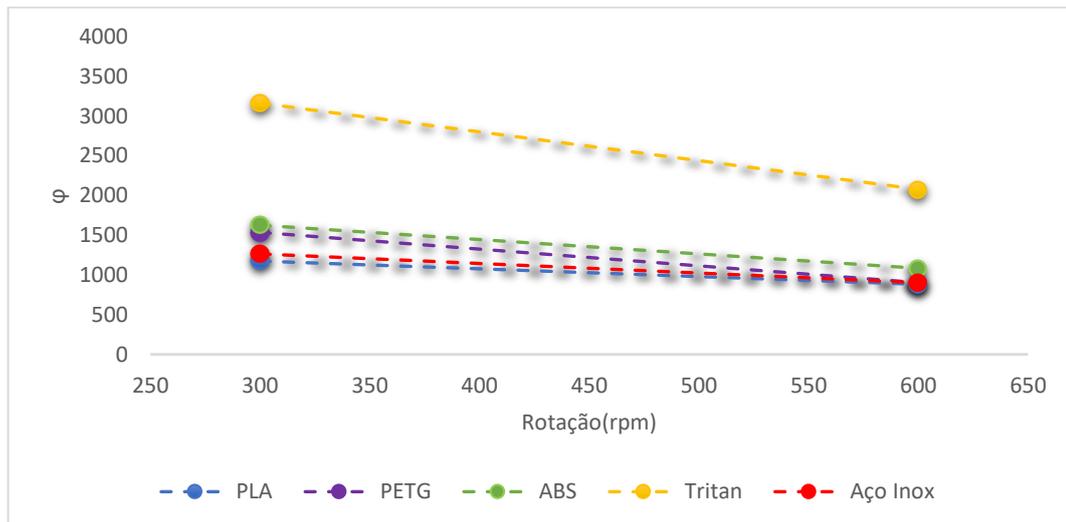
Pelos dados apresentados, pode-se observar que o tipo de material em que os agitadores são confeccionados, tem uma influência significativa no tempo de mistura do processo.

O PLA obteve os melhores resultados visto que, dentre os termoplásticos estudados, foi o único que apresentou uma redução do tempo de mistura. O TRITAN, apesar de ser considerado um termoplástico inovador, foi aquele que apresentou os piores resultados em comparação aos demais, mostrando ser ineficiente na avaliação do tempo de mistura em um processo de agitação e mistura.

5.5.Fator de tempo de mistura

O fator tempo de mistura (Φ) foi determinado pela Equação 1, proposta por Norwood e Metzner (1960). Os valores de fator de tempo de mistura podem ser observados na Figura 43.

Figura 43 - Fator de tempo de mistura para os termoplásticos estudados.



Fonte: Do autor (2023)

Como o interessante para processos industriais é a obtenção de fator de tempo de mistura cada vez menores, observa-se que para ambas as rotações de 300 e 600rpm, o PLA apresentou valores menores que o impelidor convencional de aço. De modo geral, os valores de fator de tempo de mistura apresentaram um resultado satisfatório, uma vez que os valores ficaram bem próximo do impelidor de aço inoxidável, com exceção no impelidor prototipado no termoplástico TRITAN que, quando comparado aos demais, demonstrou não ser um material adequado para essa aplicação.

6. CONCLUSÃO.

Em sua maioria, os impelidores são produzidos a partir de aço inoxidável. No entanto, esse material possui um complexo processo de fabricação, sendo necessário altas temperaturas e equipamentos específicos. Sendo assim, esse trabalho, teve por objetivo mostrar que os termoplásticos podem ser uma forma viável na substituição do metal, devido a sua facilidade de modelagem e fabricação. Para isso foi realizado ensaios mecânicos e calculado o tempo de mistura para cada termoplástico avaliando a sua eficiência em sistema de agitação e mistura.

Com base nos resultados obtidos pelos materiais no ensaios de tração e compressão, aquele que apresentou os melhores resultados para ambos os testes foi o PLA, pois, apesar de ter demonstrado uma razoável deformação inicial quando submetido à compressão, obteve um maior limite de resistência nos dois ensaios, além de possuir uma boa trabalhabilidade durante a modelagem na impressão.

Nos testes de tempo de mistura, o PLA foi o único termoplástico que apresentou uma redução de tempo, sendo ela de 7,1% para 300 rpm e 8,7% para 600 rpm, como também apresentou um resultado de fator de tempo de mistura menor que o impelidor convencional de aço inoxidável.

Por tanto, pode-se concluir que, dentre os termoplásticos estudados, o PLA foi o mais adequado para aplicação em processo de agitação e mistura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.B. METZNER, R.E. OTTO, **Agitation of non-Newtonian fluids**, AIChE J. 3.1957.

ALMEIDA, A. G; CAGNINI, P. **Avaliação de Diferentes tipos de Impelidores na taxa de transferência de calor e tempo de mistura em um biorreator de bancada**, Ponta Grossa, 2021.

Agitadores: robustos, duráveis e dimensionados de acordo com suas necessidades.

Grabe, 2022. Disponível em <<https://www.grabe.com.br/agitadores.php>>. Acessado em 22 Dez. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 - 14:**

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA:

ASTM International, 2014. 17 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D695 - 02A:**

Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West

Conshohocken, PA: ASTM International, 2002. 8 p.

BARBOSA, J. E. **Dimensionamento do eixo do impelidor em sistema de agitação e mistura para processos industriais.** Dissertação de Mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.

Beer, Johnston & DeWolf, Mechanics of Materials, 4th ed., McGraw-Hill, 2002

BUFFO, M. M; CORRÊA, L. J; ESPERANÇA, M. N; CRUZ, A. J. G; FARINAS, C. S; BADINO, A. C A. C. BADINO. **Estudo do cisalhamento em biorreator convencional com três diferentes associações de impelidores.** São Carlos. Universidade Federal de São Carlos, 2016.

CALDERBANK PH, MOO-YOUNG MB. **The prediction of power consumption in the agitation of non-newtonian fluids.** Trans Inst Chem Eng, 1959.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016

CANEVAROLO, JR., SEBASTIÃO, V. – **Ciência dos Polímeros: um texto básico para Tecnólogos e Engenheiros.** São Paulo, Editora Artliber, 2006

CANTO, L. B.; PESSAN, L. A. **Resistência à tração, flexão e compressão.** In:

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. (Ed.). **Técnicas de Caracterização de Polímeros.** São Paulo: Artliber Editora, 2003. p. 341- 360.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of chemical processing equipment.** Woburn:

Butterworth-Heinemann, 2000.

COLLIGNON, M.L.; DELAFOSSE, A.; CRINE, M.; TOYE, D. **Axial impeller selection for anchorage e dependent animal cell culture in stirred bioreactors: methodology based on the impeller comparison at just-suspended speed of rotation.** Chem.Eng.Sci., v.65, p.5929-5941, 2010.

Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D. 3Dlab, 2017. Disponível em <<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Acessado em 22 Dez. 2022.

CORRÊA, L.J., BADINO, A.C. CRUZ, A.J.G. **Avaliação de configurações de impelidores na hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar.** XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.

CORRÊA, L. J, BADINO, A. C, CRUZ, A. J. G. - **Mixing design for enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse: methodology for selection of impeller configuration.** Bioprocess and Biosystems Engineering, 39:285–294, 2016.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** 3. São Paulo Blucher 2014.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** 1. São Paulo Blucher 2012.

GHOTLI, R. A.; RAMAN, A. A. A.; IBRAHIM, S.; BAROUTIAN, S. **Liquid-Liquid Mixing in Stirred Vessels: A Review.** Chem. Eng. Comm, v. 200, n. 5, p. 595–627. Jan. 2013.

KORDAS, M., STORY, G., KONOPACKI, M., RAKOCZY, R. - **Study of Mixing Time in a Liquid Vessel with Rotating and Reciprocating Agitator.** Ind. Eng. Chem. Res. 52:13818-13828, 2013.

KRAMERS, H., BAARS, G.M., KNOLL, W. H. - **A comparative study on the rate of mixing in stirred tanks.** Chemical Engineering Science, 2:35-42, 1953.

METZNER, A.B; FEEHS, R.H; RAMOS, H. L; OTTO, R.E; TUTHILL, J.D. **Agitation of viscous Newtonian and non-Newtonian fluids,** A.I.Ch.E. Journal, 1961.

PATEL, N., CHOY, V., MALOUF, P., THIBAUT, J., **Growth of Trichoderma reesei RUT C30 in stirred tank and reciprocating plate bioreactors.** Process Biochemistry. 2009. 44, 1164– 1171.

PINHEIRO, C. M. P.; MOTA, G. E; STEINHAUS, C.; SOUZA, M. **Impressoras 3D: uma mudança na dinâmica do consumo.** Signos do Consumo, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 15-22, jan./jun. 2018.

Stainless Steel Prices. AgmetalMiner. Disponível em: <<https://agmetalminer.com/metal-prices/stainless-steel/>> . Acesso em 06 Fev. 2023

SpaceClaim offers lightweight 3D modeling for fast, simple answers. ANSYS, Inc., c2022. Disponível em: < <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>>. Acessado 25 Dez. 2022.

Ultimaker Cura: Primeiros passos para a impressão 3D. Disponível em:<https://blog.eletrogate.com/ultimaker-cura-primeiros-passos-para-impresao3d/?gclid=EAIaIQobChMIncHpjqGq9wIVa0FIAB0scQXAEAAAYASAAEgI96vD_BwE>. Acessado em: 22 Dez. 2022.

Fox and McDonald, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 5ed, LTC editora, 1998. RUSHTON, J.H.; COSTISH, E.W.; EVERETT, H.J. Power characteristics of mixing impellers. Part I. **Chemical Engineering Progress**, v.46, p.395-404, 1950.

SILVEIRA, G. Filamentos: os 4 mais utilizados e suas características - Afinko. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/4-filamentos-mais-utilizados-fdm/#:~:text=O%20ABS%20%C3%A9%20um%20copol%C3%ADmero>>. Acesso em: 23 Dez. 2022.

SOUZA, L. A. Polímero termoplástico termorrígido. Mundo da Educação. Disponível em < <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/polimero-termoplastico-termorrigido.htm>> Acesso em 23 Dez. 2022.

VALÍČEK, J.; HARNIČÁROVÁ, M.; ÖCHSNER, A.; HUTYROVÁ, Z.; KUŠNEROVÁ, M.; TOZAN, H.; MICHENKA, V.; ŠEPELÁK, V.; MITAL, D.; ZAJAC, J. Quantifying the Mechanical Properties of Materials and the Process of Elastic-Plastic Deformation under External Stress on Material. **Materials 2015, 8, 7401-7422. <https://doi.org/10.3390/ma8115385>**

WELTY, J R.; RORRER, G L.; FOSTER, David G. Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa, 6ª edição. Grupo GEN, 2017.

9788521634201. Disponível em : <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634201/>>. Acessado em: 22 Dez. 2022.

Ensaio de Tração. Biopdi. Disponível em: < <https://biopdi.com/ensaio-de-tracao/>>. Acessado dia 23 Dez. 2022.

WHITE, Frank M. Mecânica dos Fluidos. Grupo A, 2011. 9788580556070. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580556070/>>.Acessado em: 23 Dez. 2022.