



ESTUDO SOBRE MODELOS FABRICADOS EM IMPRESSÃO 3D PARA MOLDES DE FUNDIÇÃO

Eduardo Possamai Tinelli¹

Lucas Cardoso Mezzari²

Anderson Daleffe³

Gilson De March⁴

Resumo: O tema do estudo em questão envolve a tecnologia de impressão 3D e seu ingresso na área de fundição. O tema vem sendo cada vez mais pertinente, com o crescimento vem surgindo algumas dúvidas e curiosidades referente ao seu ingresso no meio fabril. A problemática do trabalho se concentra em analisar o processo de impressão 3D visando a obtenção de resultados que favorecem o uso dessa tecnologia para a fabricação de modelos para a fundição, tendo em vista seu desgaste superficial, já que se trata de material abrasivo (areia) para fabricação dos moldes a serem fundidos. Com a quebra de moldes impressos observou-se a necessidade de fazer alguns ensaios de tração, ensaio de dureza e medição de rugosidade nos materiais. Assim o objetivo deste estudo é fazer teste com dois materiais diferentes (ABS e PLA) para melhor aplicação dentro do ramo. A pesquisa tem natureza de solucionar um grande problema escolhendo melhor material e mais adequado para o processo. A medição de rugosidade com o efeito da pintura PU, nos trouxe melhorias significativas em relação aos corpos de prova natural impressos, PLA teve redução de 2,677 μm para 0,813 μm e nos cps de ABS foi de 3,888 μm para 0,755 μm , 81% de redução. A pintura mostra resultados visíveis em sua rugosidade, porem em sua medição de dureza os corpos de prova (ABS e PLA) obtiveram em torno de HD a mais para cada corpo de prova pintado, se tornando quase desprezível.

Palavras-chave: Impressão 3D. Ensaios laboratoriais. Resultados concretos.

1 INTRODUÇÃO

O movimento histórico e social da indústria se caracteriza pelo desenvolvimento e criação de novos equipamentos e máquinas, com o intuito de facilitar processos e obter maiores resultados e eficiência, desenvolvendo, desta forma, novos processos produtivos industriais. A adaptabilidade dos processos

¹ Aluno mestrado Eng. Metalúrgica UniSATC, 2023, Eduardo.tinelli@satc.edu.br

² Aluno Graduação UniSATC, 2022, lucasmezzari@hotmail.com

³ Professor UniSATC, anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Professor UniSATC, gilson.march@satc.edu.br



produtivos torna-se uma alternativa interessante em muitos casos. Pois, segundo Thanh e Phong (2023) quando toda uma ordem de coisas é alterada, no intuito de desenvolver novos conhecimentos que geram novos produtos e serviços, essas alterações seriam classificadas como inovação radical devido ao seu alto grau de novidade; e do outro lado tem-se a inovação incremental, aquela que gera pequenas mudanças, e se caracteriza pelo seu baixo grau de novidade (THANH, PHONG, 2023).

Exemplificando, pode-se pensar num modelo de celular, o qual no período de um ano é atualizado para um novo modelo com uma câmera melhor, nesse caso tem-se uma inovação incremental. A indústria moderna apresenta uma grande necessidade em relação a velocidade dos processos, sempre buscando atender as exigências dos clientes. Conforme estudos de Mietti (2018), a inovação e a competitividade estão intimamente ligadas, uma vez que o ciclo de vida dos produtos vem diminuindo cada vez mais. As empresas necessitam de um processo de desenvolvimento de produto mais rápido e barato (MIETTI, 2018).

Moldes são elementos mecânicos muito utilizados para a fabricação, para a produção de materiais em base polimérica, como, por exemplo, na injeção de termoplásticos, e também utilizados para a fundição de objetos metálicos. O projeto e o método de fabricação dos moldes têm grande importância na qualidade das peças que nele serão produzidas e no tempo de vida de um molde. Hoje em dia, pode-se encontrar os moldes em diversas áreas da indústria como: automotiva, eletrodoméstica, equipamentos de informática, moveis, etc. (SILVEIRA, 2017).

As metodologias convencionais empregadas nos processos de fabricação têm como objetivo agregar forma e funcionalidade a partir da remoção, moldagem, união de componentes e ou conformação do material como, por exemplo, na usinagem, fundição, soldagem e forjamento para materiais metálicos e não metálicos. Entretanto, no final da década de 1980 surgiu um novo meio de fabricação, com metodologia baseada na adição de material, a AM, ou impressora tridimensional (3D) economizando insumos e reduzindo resíduos uma vez que a matéria-prima é depositada conforme a necessidade definida no modelo programado (ZIER, 2019).

Diante da crescente demanda de fabricação de peças, estudos são aprimorados buscando, através de novas máquinas ou aperfeiçoamento de métodos, maior facilidade de confecção. Dentre eles está impressão 3D que conquistou espaço



dentro das indústrias e universidades possibilitando o desenvolvimento de objetos essenciais para o andamento das pesquisas, sem depender de recursos adicionais (MARZANO, 2015). A Impressão 3D, também conhecida como prototipagem rápida, é uma nova forma de tecnologia de fabricação aditiva onde um modelo tridimensional é criado pela deposição de sucessivas camadas de material (MARZANO, 2015).

O processo permite de forma rápida a construção de ferramentas, peças ou modelos a partir da sinterização de matérias-primas, tais como ABS (resina sintética feita a partir do petróleo), Nylon e misturas de pós-metálicos, por ação de um laser. As peças são obtidas numa única operação apresentando resistência mecânica, rigor dimensional, reprodução de detalhes e rugosidade superficial, permitindo servirem como simples protótipos, modelos finais que terão utilização imediata ou ferramentas de produção, como nos moldes para injeção de plástico ou metal (MARZANO, 2015).

O processo de impressão 3D consiste primeiramente no desenho da peça com o auxílio de um software de edição em três dimensões bastando submeter o arquivo no computador da impressora e a mesma fatiará o objeto em diversas camadas. Em seguida, um laser é projetado no pó da matéria-prima fazendo o material aquecer e chegar próximo do ponto de fusão criando a primeira camada por aderência da superfície das partículas. A primeira camada é resfriada de modo muito rápido após a passagem do laser. O processo segue cobrindo a camada recém-criada com mais pó repetindo todo o processo até a conclusão do objeto (MONTEIRO, 2015).

As seleções do material em conjunto com os parâmetros de processo são fundamentais para obtenção de peças com qualidade estética, dimensional e atendimento a especificações mecânicas do projeto. Peças impressas em 3D são consideradas como estruturas compósitas laminadas por terem camadas fundidas empilhadas verticalmente, e isso resulta nas propriedades anisotrópicas desse material. Devido a isso, as propriedades mecânicas de peças FDM são dependentes não só na qualidade do filamento empregado, como também nos parâmetros de impressão (LOVO et al., 2017).

Na fabricação de peças pela impressão 3D, o volume do objeto e consequente tempo e material utilizado, são fatores a serem levados em conta no projeto (DOMÍNGUEZ et al., 2020). Uma vantagem desse método é a possibilidade de efetuar um preenchimento parcial da peça. Essa técnica é utilizada para diminuir



densidade interna da peça, reduzindo o tempo e materiais utilizados na sua fabricação (FERNANDEZ VICENTE, et al., 2016). Na prática isso significa que apenas parte do volume interno da peça contém material e isso é alcançado através do espaçamento dos filamentos depositados (KIENDL 2019).

Com a devida contextualização, o problema de pesquisa a ser solucionado nesse estudo é: entre a PLA e ABS, enquanto matérias-primas para modelos feitos em 3D, qual apresenta melhor desempenho em rugosidades, desgaste superficial e ensaio de tração?

Sendo assim, o objetivo geral do estudo é obter dados concretos sobre o acabamento superficial dos modelos impressos em 3D comparando alguns materiais apresentados e obtendo dados referente a sua análise de rugosidades, desgaste superficial e ensaio de tração. Estudar os resultados afim de obter o melhor material para usabilidade no ramo de fundição.

Para alcançar o pretendido, estabeleceram-se como objetivos específicos: Fazer testes baseados em artigos com relação ao acabamento superficial de materiais impressos em 3D (PLA e ABS); Analisar a rugosidade com aparelho de medição (Rugosímetro digital portátil) para avaliação dos corpos de prova que serão apresentados; Analisar o desgaste por abrasão de roda de borracha em ensaio laboratorial; Ensaio de tração para verificar resistência dos materiais e Estudar os resultados afim de obter o melhor material para usabilidade no ramo de fundição.

A análise de rugosidade será feita de acordo com a norma NBR 6405 e com a pintura vamos verificar sua melhoria de superfície para possíveis ajustes de acabamento superficial.

O ensaio de desgaste abrasivo será feito de acordo com a norma ASTM G65-16 para melhor e mais adequado material para usar no ramo de fundição. Logo esses ensaios, utilizaremos a máquina EMIC de 100 Kn para o ensaio de tração.

O processo de impressão 3D permite fabricar peças altamente complexas adicionando os materiais camada por camada com o mínimo de desperdício, economizando tempo e custo, sendo decisiva para a eficiência do processo e reduzindo sua complexidade, permitindo prototipagem rápida, processos de produção altamente descentralizados, além da boa variedade de matérias-primas disponíveis e sem uso de materiais tóxicos (HORST; VIEIRA, 2018).



Todavia, um dos grandes problemas encontrados nesses modelos fabricados em impressoras 3D é acabamento superficial e a quebra de moldes, que após a moldagem na areia em contato com a reação de resinas (processo *pep set*) e catalisador, não se obtém um molde em perfeitas condições, encrustando areia nos filamentos impressos do modelo e tendo um retrabalho muito grande para refazer o processo, perdendo tempo de produção e mão de obra dobrada. Neste sentido, justifica-se a escolha do tema por se tratar de um assunto relevante e ficou pertinente analisar dados referente a rugosidade, desgaste a abrasão já que se trata de atrito com areia e molde, e também ensaio de tração para melhor escolha de matéria prima para impressão e utilização.

A natureza da pesquisa realizada é caracterizada como pesquisa aplicada, tendo em vista o intuito de gerar conhecimentos práticos para a resolução da pergunta-problema desse estudo. A abordagem do problema é baseada na pesquisa quantitativa, tendo em vista que os dados coletados foram analisados mediante variáveis quantificáveis (rugosidade, desgaste superficial e ensaio de tração).

O tipo de pesquisa, enquanto seus objetivos é uma pesquisa exploratória, pois busca-se analisar o desempenho das matérias-primas para os moldes de fundição. A última caracterização metodológica é em relação aos procedimentos técnicos da pesquisa, esse é um estudo de caso, conforme as variáveis estabelecidas.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D E SUAS TECNOLOGIAS

Tradicionalmente, quando se fala da produção de peças tridimensionais, logo vem à mente processos como usinagem, moldagem, entre outros, em que é utilizada a manufatura subtrativa, consistida na retirada do material sobressalente para que se chegue no produto final. Entretanto, a Manufatura Aditiva se difere destes processos pois se chega ao produto desejado através da deposição de materiais dentro da impressora, que, dependendo do tipo de equipamento e material utilizado, podem ser criados diversos tipos de objetos, desde itens sem encaixes até formas complexas que podem fazer parte de um conjunto de peças (MACEDO, 2020).

A *Rapid Prototyping* (RP), conhecida em português como Prototipagem Rápida, é a técnica pela qual se obtém uma peça física por meio da adição sucessiva de camadas de material, com base num modelo computacional 3D. Tal tecnologia



pode agregar no contexto do processo de desenvolvimento do produto (PDP), em que a prototipagem ocupa um papel central para evitar desperdícios, erros de processo e entregas erradas ao final de uma *pipeline* de desenvolvimento. Assim, é possível otimizar os processos de PDP por meio da automação e pela adoção de tecnologias em 3D *printing*, diminuindo custos com não conformidades e viabilizando rentabilidade maior para as empresas (ALBUQUERQUE, 2017).

Diversas potências econômicas no cenário global têm feito investimentos significativos nessa área (entre as quais pode-se citar os Estados Unidos e a China), resultando em maior expansão tecnológica, propiciando o surgimento de novas áreas de aplicação para MA, como a indústria de fundição, que é propriamente problemática principal do presente trabalho. Em função de sua versatilidade e relativa facilidade de operação, a manufatura aditiva oferece diversas vantagens em relação aos processos tradicionais de fabricação (torneamento, fresamento, estampagem, etc.), tais como: melhor aproveitamento de material, componentes fabricados em processo único, desenvolvimento de produto mais rápido e possibilidade de fazer formas mais complexas (ALBUQUERQUE, 2017).

Diversos tipos de tecnologia podem ser utilizados pela manufatura aditiva, sendo a impressão 3D um dos tipos mais inovadores e de fácil acessibilidade para pequenos produtores. A tabela 1 oferece uma visão geral dos tipos de processos disponíveis para a MA e suas principais características:

Figura 1: Tipos de MA

| Processo | Estado | Técnica de criação de camadas | Tipo de mudança de fase | Material |
|-------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| Estereolitografia | Solução resina | Cura camada líquida | Fotopolimerização | Fotopolímeros |
| Modelamento | Solução resina | Cura camada líquida | Solidificação por resfriamento | Polímeros (ABS policarbonato) |
| FDM | Filamento | Extrusão de polímeros fundidos | Solidificação por resfriamento | Polímeros (ABS policarbonato) |
| 3D Print | Pó | Aglutinação de partículas | Sem mudança de fase | Cerâmicos, polímeros, pó metálico e areia |
| SLS/SLM | Pó | Camada de pó | Sinterização/ Fusão | Polímeros, metais e cerâmicos |
| EBM | Pó | Camada de pó | Fusão | Titânio e ligas de titânio |

Fonte: Macedo (2020).



Embora a utilização de tecnologias 3D traga inúmeros benefícios para a indústria, em especial nos processos de prototipagem, reconhece-se que determinadas práticas resultam em produtos relativamente mal acabados e que precisam receber um acabamento superficial em função dos filamentos em camadas. Tal problema é encontrado especialmente na utilização da *Fused Deposition Modelling* (FDM), que mesmo quando parametrizada para gerar superfícies suaves e com curvaturas pode gerar um *staircase effect*, impactando na qualidade final do produto (BORGES, 2015).

Para garantir bons resultados na técnica, desenvolveram-se métodos de pós-tratamento químico superficiais que podem contribuir para um melhor acabamento e facilitar as demais etapas do processo de prototipagem. (BORGES, 2015).

No processo de fundição em areia, no molde a ser vazado, é utilizado um modelo da peça a ser fabricada (geralmente de aço, alumínio, madeira ou isopor) para criar uma cavidade. Por causa da contração de volume que ocorre durante a solidificação do metal, o modelo deve ter propriedades maiores que a peça final. Além do modelo, é utilizada uma ferramenta chamada núcleo, geralmente feita de areia, cuja função é evitar que o metal preencha essa área do molde (ALBUQUERQUE, 2017).

Desta forma, qualquer desvio que modifique a qualidade necessária para a fabricação da peça é entendido como defeito de fundição. Essa concepção abrange questões relacionadas à condição superficial e interna da peça, presença de vazios, precisão dimensional e acabamento superficial, esses itens são os fatores que podem causar os defeitos no processo de fundição. Santana (2016) também aponta que os defeitos podem estar relacionados a uma diversidade de situações, tais como: o molde de areia (erosão, movimento do molde, etc.), a alimentação do metal líquido e a composição química dos elementos utilizados e suas reações com oxigênio.

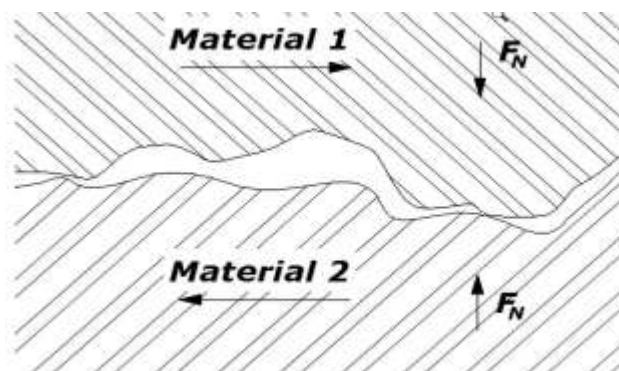
Os desenhos de modelos a serem feitos por meio da manufatura aditiva devem ter as peças orientadas na sala de construção de forma a reduzir o material de suporte a ser utilizado, ter uma boa relação entre peso e volume, além de possuir folgas na estrutura de suporte e peças de reposição (SWIFT, 2013). No entanto, limitações como anisotropia do material devido à deposição das tiras, dificuldade na

formação de cantos vivos e pontiagudos devido à pressão de contato no filamento que sai do bocal da extrusora e menor resistência à tração também devem ser consideradas em comparação com a moldagem por injeção do mesmo termoplástico (SWIFT, 2013).

Entre os elementos citados anteriormente, o principal é a linha de partição, porque ela é a responsável em criar a cavidade do molde. A localização da linha de separação, define o custo final das matrizes, nos ângulos de saída, nas linhas de fluxo e também se relaciona a ideia do projeto e aparamento de rebarba. O projeto da linha de partição começa com a escolha da melhor direção de corte, garantindo menores custos de produção e maior produtividade (COSTA, MARQUES e SHAFFER, 2015).

O atrito, causado principalmente pela irregularidade das partículas abrasivas, é um fenômeno observado em várias situações de superfícies de deslizamento e rolamento, e a função de muitos sistemas mecânicos depende diretamente do valor de atrito adequado, não apenas mecânico, de maneira que o seu cálculo é necessário para que o equipamento funcione corretamente. O desgaste ou abrasão é geralmente dividido em dois tipos, desgaste entre dois corpos e desgaste entre três corpos (TSHIPTSCHIN, 2019). Na abrasão entre dois objetos, conforme mostrado na Figura abaixo, as partículas duras embutidas na microestrutura do material 1 podem danificar a superfície do material mais dúctil 2, tornando-o plástico, conforme a taxa de desgaste.

Figura 2: Abrasão entre Corpos



Fonte: Tschiptschin (2019).

Partículas duras podem ser deliberadamente misturadas em materiais, como em rebolos e reforços cerâmicos, para garantir que o desgaste ocorra em



superfícies opostas, ou podem vir do próprio ambiente, como contaminação por areia. Como mostrado na figura, a rugosidade da superfície de contato afeta o desgaste abrasivo entre dois objetos, onde uma força aplicada a uma pequena área aumenta a pressão de contato nesses pontos salientes, o que permite uma penetração mais pronunciada de partículas duras na cavidade dúctil. Cada partícula que entra em contato com a superfície promove micro ranhura ou micro corte, que remove pequenas camadas de material. 10.000 dessas partículas podem causar danos graves à superfície de uma peça (TSHIPTSCHIN, 2019).

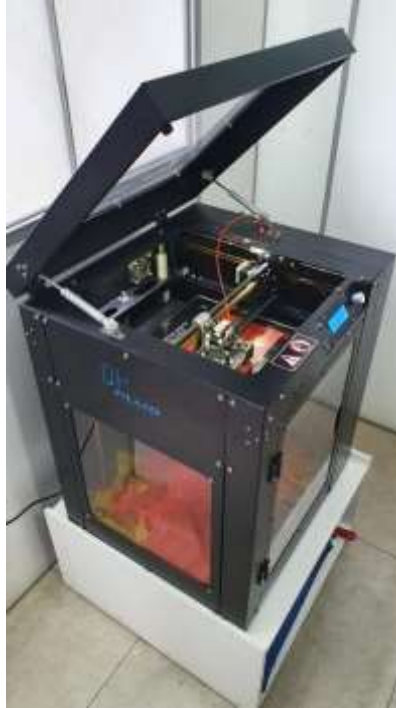
2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram confeccionados 27 corpos de prova no total, onde 12 peças para ensaio de desgaste em PLA (6 maciças e 6 favadas em 5%) e mais 6 figuras do material ABS (maciço). Para o ensaio de tração, foram confeccionados 9 corpos de prova onde 6 de PLA (maciço e favado em 5%) e 3 ABS (Maciço) para verificação dos dados. Os modelos para ensaio de desgaste são retangulares com dimensões de 10mm de altura x 25mm x 80mm, e já as figuras para ensaio de tração são padrão de tamanho, tanto para chapas metálicas, quando para polímeros. Utilizando o software de conversão para a impressora 3D, nos corpos de prova em PLA favados, usamos 5% de favo em seu volume total (modelo hexagonal). A velocidade de impressão nos favos foi de 100mm/min e sua velocidade na camada maciça de 3mm foi de 60mm/min. O diâmetro dos fios utilizados foram de 1.2mm.

Pôr a empresa utilizar material com camada externa de 2mm e internamente o material oco em PLA, optou-se em efetuar os testes nos mesmos também. A impressora utilizada foi uma 3D CLONER DH PLUS fig. 3, dimensões de mesa 320mmx320mm cedida pela empresa Ferrara Fundição. Como o PLA já vem sendo imprimido pela empresa, optou-se por imprimi-lo primeiro, sua temperatura de fusão é baixa comparada a do material ABS, com bico a 180° C e mesa a 80° C. Tendo em vista uma das vantagens, a impressão com impressora aberta sem muita necessidade de cuidado com empeno, e mesmo com a baixa temperatura de mesa cria uma boa aderência, os materiais foram confeccionados sem problema algum. A impressão dos corpos de prova em PLA duraram cerca de 14 horas e trinta minutos,

tanto para as figuras do ensaio de tração, quanto para as figuras do ensaio de desgaste.

Figura 3: Impressora 3D DH Plus



Fonte: Autor (2022)

O material ABS foi posto para impressão, porém não foi alcançado sucesso com a impressora da Ferrara fundição, já que a mesma tem algumas componentes desprotegidos, o material não se comportou bem, empenando suas pontas mesmo com os procedimentos de limpeza de mesa e fixador para melhorar a aderência. Em seguida foi possível fazer a impressão com uma impressora lacrada que foi cedida pelo orientador Anderson Daleffe sem nem um problema. Comparando ao PLA, o ABS possui uma maior temperatura de mesa e fica em 100° C, foi impresso nas mesmas condições que o PLA (maciço).

O PLA foi cedido pela Ferrara fundição, e ABS cedido pelo orientador do estudo em questão. Os desenhos dos corpos de prova são padrão para os ensaios laboratoriais. Do solidwork converte-se para o programa da impressora que se chama Matter control onde foi definido cada parâmetro, temperatura de mesa, bico, velocidade da impressão, tempo do material acabado, quantidade de material por ciclo, entre outros fatores que já estavam pré programados na impressora.

Com a conclusão da confecção de todos esses materiais, três modelos de cada (somente ensaio de desgaste) foram pintados com um selador de plástico para não haver descolagem do fundo promovendo mais aderência, logo após esses modelos impressos foram pintados com fundo PU (Produto de alta tecnologia, utilizado para enchimento da superfície, nivelando-a de acordo com um bom reparo de funilaria assim como irregularidade apresentada. Promove bom isolamento de outras camadas e assegura a melhor aderência da tinta de acabamento) que tem uma secagem ao toque de 30 a 60 minutos e cura total de 12 horas.

Nesse aspecto, ainda é fundamental caracterizar os testes conduzidos para a averiguação do proposto nesse estudo. A seguir serão apresentadas as considerações iniciais sobre o teste de rugosidade, ensaio de roda de borracha, ensaio de dureza (SHORE) e ensaio de tração, respectivamente.

2.1 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE (Ra)

O teste de rugosidade é medido pelo rugosímetro SJ-310 da Mitutoyo figura 4, sendo assim o processo de medição consiste em percorrer a superfície que será analisada com o apalpador (que carrega a agulha apalpadora) acompanhado por uma guia que auxilia ele a se mover na mesma direção, analisando um antes e depois da pintura com o fundo PU. As medições serão feitas individuais em cada corpo de prova, retirando uma média nos materiais de PLA com e sem pintura, ABS com e sem pintura e PLA oco com e sem a pintura superficial. Após a medição, os corpos de prova pintados, serão lixados para verificação de possíveis melhorias na superfície.

Figura 4: Rugosímetro digital



Fonte: Autor (2022)

Figura 5: Ensaio de rugosidade



Fonte: Autor (2022)

2.2 ENSAIO DE RODA DE BORRACHA

Em seguida os corpos de prova foram pesados e incluídos para a reprodução do ensaio de roda de borracha ou melhor um tribômetro fig. 6 que consiste em pressionar as amostras em um pêndulo com peso de aproximadamente 5Kg (50N) em um disco redondo de aço revestido por borracha sob a alimentação constante de um material abrasivo (areia seca) de acordo com a norma ASTM G65-16 para verificação e conclusão do desgaste de cada corpo de prova com e sem a inclusão de produtos em sua superfície. Após ensaiado o material passara por uma limpeza e retirada de areia em sua superfície para uma nova pesagem na balança digital. A versão padrão do ensaio para classificação de desgastes em materiais, utiliza a Eq. 1 da norma especificada para encontrar a perda de volume da matéria.

$$(Eq. 1) V=(M/\rho) *1000[\text{mm}^3]$$

Onde:

M = Perda de massa após o ensaio (g)

ρ = Densidade (g/cm³)

V = Perda de volume (mm³)

Logo após os cálculos com essa equação é possível então, determinar a taxa de desgaste em cada material:

$$(Eq. 2) Q = V/(N*S)$$

Onde:

V = Perda de volume (mm^3);

Q = Taxa de desgaste (mm^3/Nm);

N = Carga aplicada (N);

S = Distância de deslizamento (m);

Figura 6: Tribômetro (roda de borracha)



Fonte: Autor (2022)

2.3 ENSAIO DE DUREZA (SHORE)

Após o ensaio de desgaste foi medido a dureza dos corpos de prova para obter uma média entre eles. Nele, um durômetro *Shore* foi utilizado na medição da dureza, que foi feita de maneira portátil conforme a norma NBR 07546. O método consiste em medir a profundidade da impressão deixada no material com a aplicação da carga e é dependente de outros fatores além da dureza, como das propriedades viscoelásticas e da duração do ensaio

Figura 7: Medidor de dureza SHORE



Fonte: Autor (2022)

2.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Logo após esses testes, foram realizados ensaios de tração nos mesmos para determinar a tensão normal máxima de ruptura, a tensão de escoamento e a ductilidade dos materiais. O ensaio foi realizado na SATC no laboratório LACAMI de acordo com a norma ASTM D 638 com a ajuda de um bolsista, a máquina usada foi uma EMIC de 100kn figura 8.

Figura 8: Máquina de tração EMIC



Fonte: Autor (2022)

Com a devida apresentação de como foram conduzidos os experimentos, elemento fundamental para compreender os tipos de testes realizados, bem como os

instrumentos necessários, a seção abaixo apresenta os resultados e discussões dos resultados e variáveis encontradas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Sobre a rugosidade dos materiais observamos que o ABS tem um acabamento superficial mais rugoso do que o material PLA identificado nos corpos de prova impressos, e de acordo com a tabela 1 abaixo seu resultado final deu aproximadamente 31,14% abaixo do resultado do (ABS). Como o objetivo desse ensaio é identificar o melhor material qualificado para aplicar na área de fundição, os dois materiais foram pintados com fundo PU, já comentado no trabalho. Sem a pintura deu uma diferença considerável em sua medição (ABS em 3,888) e (PLA em 2,677). Todavia, os corpos de prova pintados com PU, tiveram resultados menores e mais próximos entre si, sendo 0,813 μ m para PLA e 0,755 μ m para ABS, culminando em uma redução significativa.

O corpo de prova em ABS teve redução de 80,59% em relação ao natural impresso ao corpo de prova pintado com PU. Logo após, os corpos de prova pintados foram lixados com uma lixa grão 600 pra identificar possíveis melhorias, reduzindo 88,15% do valor que tinha obtido na primeira medição dos corpos de prova em PLA e 89,89% do valor em ABS. Nos corpos de prova da figura 9, verificou-se a diferente do acabamento superficial nos CPs sem pintura, com a pintura e posterior lixamento para melhor acabamento superficial.

Figura 9: Corpos de prova com e sem a pintura



Fonte: Autor (2022)



Tabela 1: Medição de rugosidade nos corpos de prova

| CORPO DE PROVA | MATERIAL | CARACTERISTICAS | RUGOSIDADE (Ra) μm | RUGOSIDADE CP. LIXADO (Ra) μm |
|----------------|----------|--------------------|-------------------------------|--|
| CP1, 2, 3 | PLA | MACIÇO | 2,677 | |
| CP4, 5, 6 | PLA | MACIÇO COM PINTURA | 0,813 | 0,317 |
| CP7, 8, 9 | ABS | MACIÇO | 3,888 | |
| CP10, 11, 12 | ABS | MACIÇO COM PINTURA | 0,755 | 0,393 |
| CP13, 14, 15 | PLA | FAVADO | 3,463 | |
| CP16, 17, 18 | PLA | FAVADO COM PINTURA | 0,737 | 0,44 |

Fonte: Autor (2022)

Não é comum fazer corpos de prova maciços para usar na indústria, por fatores relevantes a ela, com um tempo de impressão muito mais elevado em relação aos materiais favados com 5% de preenchimento do volume total, um gasto excessivo de material a ser impresso que também conta no orçamento final da peça, porém foram confeccionados dessa forma para obter dados concretos em relação aos ensaios de desgaste e tração.

3.1 ENSAIO DE RODA DE BORRACHA

No ensaio de roda de borracha, os corpos de prova que foram pintados tiveram a perda de massa parecida dos outros sem a pintura, com isso observou-se que a pintura ajuda mais com a questão de acabamento superficial do material do que como uma barreira para fontes abrasivas. A pintura serviu para retardar o tempo de abrasão até o material em si, observando na indústria uma abrasão aparente e uma respectiva parada para manutenção dos modelos impressos.

O material que se obteve melhor resultado em questão de desgaste por abrasão no tribômetro foi o PLA, que perdeu uma massa muito menor que o ABS obtendo uma diferença de 2,4 gramas na média dos corpos de prova apresentados no ensaio. O ensaio dos corpos de prova impressos em PLA com paredes de contorno com 3 mm e sua interna com preenchimento em 5% do volume favado, perderam pouca massa porém em alguns CPS houve a abrasão total de um lado para o outro por conta de romper a barreira maciça.

OS corpos de prova maciços (PLA) tiveram seus desgastes médios após o ensaios em roda de borracha, onde, se constatou que a maior profundidade resultante do teste foi 3,0mm em (PLA). Logo, possível observar com modelos impressos com preenchimento parcial, a espessura natural mínima precisaria ser acima deste valor. A Figura 10 apresenta os corpos de prova ensaiados, enquanto a Tabela 12 os resultados.

Figura 10: Corpos de prova após o ensaio de desgaste.



Fonte: Autor (2022)



Tabela 2: Desgaste

| CORPO DE PROVA | MATERIAL | CARACTERISTICAS | MEDIA DE PERDA (gramas) |
|----------------|----------|--------------------|-------------------------|
| CP1, 2, 3 | PLA | MACIÇO | 0,749 |
| CP4, 5, 6 | PLA | MACIÇO COM PINTURA | 0,741 |
| CP7, 8, 9 | ABS | MACIÇO | 3,042 |
| CP10, 11, 12 | ABS | MACIÇO COM PINTURA | 3,2 |
| CP13, 14, 15 | PLA | FAVADO | 0,315 |
| CP16, 17, 18 | PLA | FAVADO COM PINTURA | 2,157 |

Fonte: Autor (2022)

Utilizando as equações 1 e 2, para o cálculo da perda de massa e taxa de desgaste, se obteve os valores finais de cada amostra (Tabela 3). Considerando a densidade do material PLA em $1,24 \text{ g/cm}^3$ e para material ABS em $1,04 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 3: Taxa de desgaste

| CPs | VOL. (mm^3) | DESLIZ. (Metros) | CARGA (N) | T. DE DESGASTE (mm^3/Nm) |
|--------------|------------------------|------------------|-----------|--|
| CP1, 2, 3 | 604,29 | 0,045 | 50 | 268,57 |
| CP4, 5, 6 | 597,58 | 0,039 | 50 | 306,45 |
| CP7, 8, 9 | 2925 | 0,068 | 50 | 860,29 |
| CP10, 11, 12 | 3076,92 | 0,066 | 50 | 932,4 |
| CP13, 14, 15 | 254,03 | 0,075 | 50 | 67,74 |
| CP16, 17, 18 | 1739,51 | 0,075 | 50 | 463,86 |

Fonte: Autor (2022)

3.2 ENSAIO DE DUREZA

Na tabela 4 abaixo obtemos o ensaio de dureza nos corpos de prova. Realizadas três medições de cada corpo de prova, a média na tabela mostra o resultado de cada CP. O PLA maciço e PLA oco tem uma medição de dureza mais elevada em relação ao ABS maciço. A pintura superficial é quase desprezível em relação as medições, há um diferença mínima em relação ao cps naturais, aumentando em torno de 1 HD em todos as medições conforme (Tabela 4).



Tabela 4: Ensaio de dureza

| CORPO DE PROVA | MATERIAL | CARACTERISTICAS | MEDIA DOS TRES ENSAIOS (HD) |
|----------------|----------|--------------------|-----------------------------|
| CP1, 2, 3 | PLA | MACIÇO | 58,7 |
| CP4, 5, 6 | PLA | MACIÇO COM PINTURA | 63,03 |
| CP7, 8, 9 | ABS | MACIÇO | 68,1 |
| CP10,11, 12 | ABS | MACIÇO COM PINTURA | 65,81 |
| CP13,14, 15 | PLA | FAVADO | 64,77 |
| CP16,17, 18 | PLA | FAVADO COM PINTURA | 68,94 |

Fonte: Autor (2022)

3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com a realização do ensaio de tração foi possível obter as características mecânicas dos dois materiais descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Ensaio de tração (médias)

| CPS | MATERIAL | CARACTERISTICAS | F. (KN) | TENS. /F. MAX (MPA) | TENS. ES1 (MPA) | DEF. (%) |
|-----------|----------|-----------------|---------|---------------------|-----------------|----------|
| CP1, 2, 3 | PLA | MACIÇO | 1,13 | 18,63 | 12,63 | 2,8 |
| CP4, 5, 6 | ABS | MACIÇO | 0,96 | 9,96 | 6,5 | 3,36 |
| CP7, 8, 9 | PLA | FAVADO EM 5% | 1,06 | 22,56 | 14,8 | 3,1 |

Fonte: Autor (2022)

O ensaio de tração dos materiais apresentados foram os seguintes, conforme mostra a tabela 5. O PLA provou ser um material que suportou maior carga estática, aproximadamente 22,56 MPA no material oco, e 18,63 MPA no material maciço. É um material que não aceita deformação comparada ao ABS, porem no material oco ele obteve um resultado melhor com sua curva de alongamento em relação ao maciço.

Comparado ao PLA, o ABS suportou menos carga estática 9,96 MPA. Porém, ele tem um período de deformação um pouco maior, ou seja, é um material mais dúctil. O que o coloca em uma categoria de material interessante no aspecto de absorção de carga.

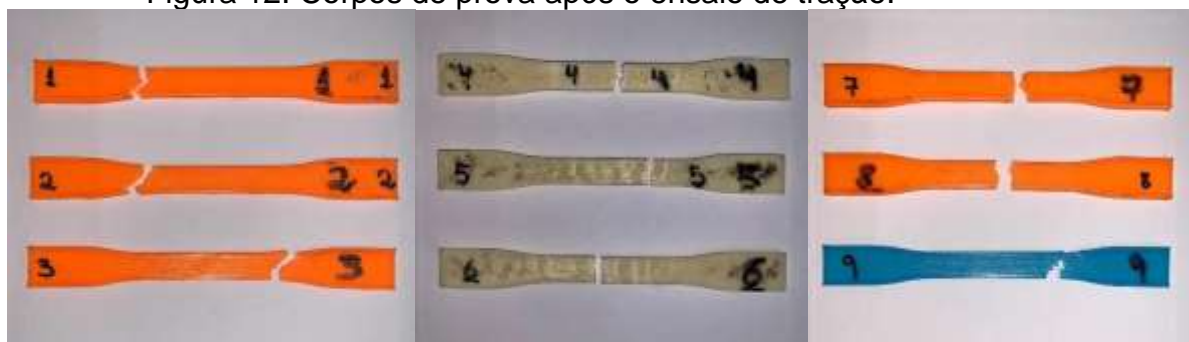
Figura 11: Corpo de prova sendo ensaiado



Fonte: Autor (2022)

A figura 12 abaixo mostra os corpos de prova após os ensaios. Nos corpos de prova 1, 2,3 (PLA maciço), mostram ruptura na mesma região. Os cps 4, 5, 6 (ABS maciço) romperam de maneira ordenada fazendo um corte transversal. Por fim os cps 7, 8, 9 (PLA oco) material impresso com paredes inferior e superior em 2mm e favos ocos entre paredes teve sua ruptura irregular e com locais discrepantes um dos outros comparando com a impressão maciça.

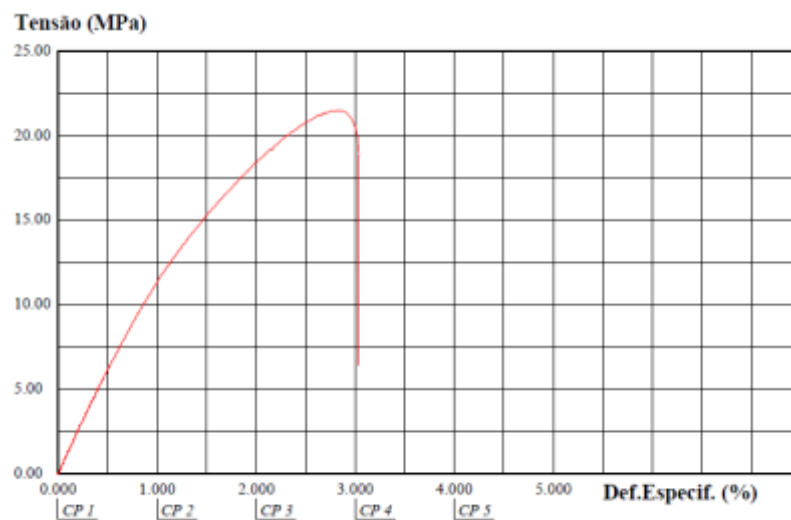
Figura 12: Corpos de prova após o ensaio de tração.



Fonte: Autor (2022)

Na figura 13 abaixo mostra se o comportamento de um dos corpos de prova em PLA maciço, suportando uma boa tensão e com seu regime plástico muito pequeno. Ele não tem grande deformação antes do rompimento, ou seja, ele é pouco dúctil em relação ao material ABS apresentado na tabela da Figura 15.

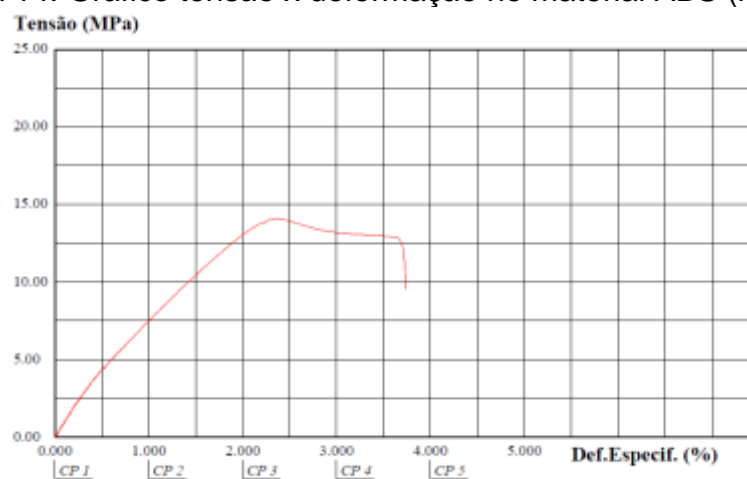
Figura 13: Gráfico tensão x deformação no material PLA (maciço)



Fonte: Autor (2022)

A figura 14 abaixo mostra o comportamento no gráfico do corpo de prova em ABS, mostra melhor elasticidade, tendo em vista um alongamento maior do que o PLA. Sua fase plástica apresenta boa tenacidade que nada mais é do que a capacidade do material absorver impacto nessa fase.

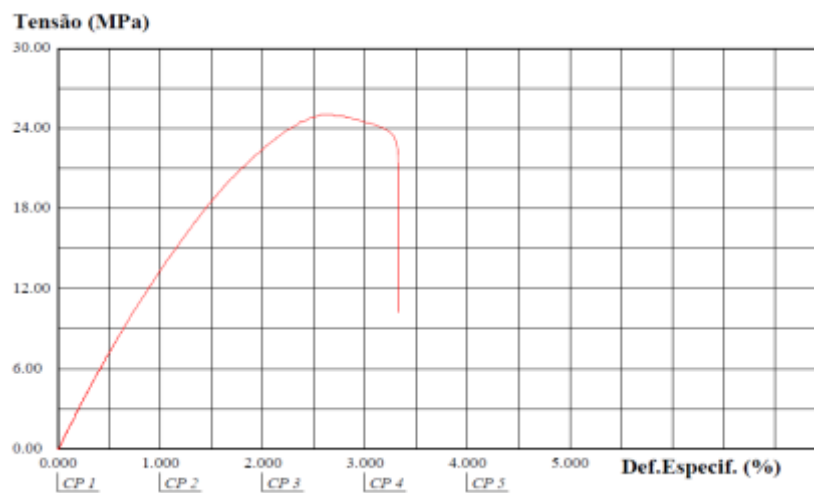
Figura 14: Gráfico tensão x deformação no material ABS (maciço)



Fonte: Autor (2022)

Na figura 15 abaixo mostra o resultado um pouco diferente do que no PLA (maciço), suportando uma tensão mais elevada e obtendo uma curva de alongamento maior. Sua deformação foi maior do que no material maciço e provou que por ser material oco, se comporta bem com elevadas cargas.

Figura 15: Gráfico tensão x deformação no material PLA (oco)



Fonte: Autor (2022)

4 CONCLUSÃO

O teste de abrasão nos materiais maciços, observamos que os corpos de prova em ABS obtiveram maior desgaste no ensaio, cerca de 3 gramas, contra 0,7 gramas de PLA. Com as medições de desgaste provou que os corpos de prova em PLA tem mais resistência ao desgaste, mostrando-se um material mais duro. Medindo a altura de desgaste nos corpo de prova em PLA (maciço), e após feita uma análise para utilizar o material PLA (favado em 5%) no processo, tanto pelo tempo de impressão quanto para sua durabilidade em relação aos processos abrasivos. Com paredes de contorno em 3mm o material não ultrapassaria a barreira de contorno, tendo assim um material mais leve, rápido e com menor desgaste a areia.

No ensaio de tração os corpos de prova em PLA (maciço) suportaram grandes tensões, com regime plástico muito pequeno e provando ser pouco dúctil. Corpos de prova em PLA (favado em 5%) suportou tensões maiores que em material maciço, obtendo um alongamento maior. O ABS mostrou ser um material com maior



alongamento, apresentando uma boa tenacidade e uma baixa carga em relação a ambos os corpos de prova em PLA maciços e favados.

Sobre o ensaio de dureza, o ABS provou ser mais mole do que o material PLA impresso nas duas condições, 6 a 8 HD a menos. A pintura superficial traz pouca melhoria no ensaio de dureza, cerca de 1HD em cada corpo de prova. A sua medição de dureza provou que os materiais são o que são conforme os outros ensaios.

Com a medição de rugosidade se conclui que os corpos de prova em ABS formam um material mais rugoso em relação ao PLA (maciço e favado) e que deixa uma diferença enorme na medição, cerca de 1 a 2 microns a mais. Os materiais pintados se igualam na medição, obtendo valores semelhantes. Com a pintura vem o lixamento do material que diminui a rugosidade em quase 50% melhorando mais ainda o acabamento superficial da peça impressa, obtendo uma boa moldagem para o processo de fundição evitando possíveis quebras por conta da cura feita com areia e resinas. Poderia ser pertinente para uma pesquisa futura o acabamento superficial dos cps de ABS com vapor de acetona para implementação do processo também na indústria, não só em fundições.

REFERÊNCIAS

THANH, Trung Le; PHONG, Ba Le. High-involvement HRM practices stimulate incremental and radical innovation: The roles of knowledge sharing and market turbulence. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, Volume 9, Issue 1, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2199853123001087>

ALBUQUERQUE, Bruno Souza. Estudo da fabricação de ferramental de fundição por manufatura aditiva. 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9214/1/PB_DAMEC_2017_2_02.pdf.

BORGES, F. B. F. L., (2015) Tratamento superficial de peças fabricadas por prototipagem rápida. Dissertação de mestrado, Publicação ENM.DM-231A/2015, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 54p.

SANTANA, Adevanil Dos Santos. Identificação dos principais defeitos de fundição através da aplicação de ferramentas da qualidade: estudo de caso em uma fundição de peças metálicas. Trabalho de Bacharel em Engenharia de Produção. Centro Universitário Católico De Vitória. Vitória, 2016. Disponível em: <https://unisaes.br/wp-content/uploads/2021/10/tcc-engprod-adevanil-1.pdf>



MACEDO, André Felipe Falsarella Lima. Uso da manufatura aditiva em ferramentais de fundição em areia. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, 2020. 44 f.

COSTA, L. L.; MARQUES, A. S.; SCHAEFFER L. Fatores de influência no projeto de matrizes para forjamento a quente. Congresso Anual da ABM, 70^o, 2015, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/fatores-de-influencia-no-projeto-de-matrizes-para-forjamento-a-quente>

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. Manufacturing process selection handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

DOMÍNGUEZ, G. A.; CLAVER, J.; CAMACHO, S. M. A. Considerations on the applicability of test methods for mechanical characterization of materials manufactured by FDM. "Materials, v.13, n. 1,p. 28", 2020.

FERNANDEZ-VICENTE, M.; WILSON, C.; SANTIAGO, F.; ANDRES, C.; Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. 3D Printing and Additive Manufacturing, v. 3, n. 3, 2016.

HORST, D.; DUVOISIN, C.; VIEIRA, R. "Additive Manufacturing at Industry 4.0: A Review". International Journal of Engineering and Technical Research, v. 8, p. 3- 8, 2018.

KIENDL, J., CHAO, G. Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layup. Composites Part B 180, 2019.

LOVO, J. F. P.; CARLOS A. F. Estudo De Propriedades Mecânicas E Anisotropia Em Peças Fabricadas Por Manufatura Aditiva Tipo FDM. Mechchanical strength. Int J AdvManuf Technol, v.89, n. 5–8, p.2175–2191, 2017.

MARZANO, M.G. 2015. 59f. Análise Comparativa de Peças de Aço Obtidas por Fundição ou Impressão 3D: Análise Tridimensional por Microct e Caracterização das Propriedades Mecânicas. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MONTEIRO, M. T. F. 2015. 130f. A IMPRESSÃO 3D NO MEIO PRODUTIVO E O DESIGN: um estudo na fabricação de joias. Programa de Pós-Graduação em Design (Mestrado em Design). Universidade Do Estado De Minas Gerais, Belo horizonte, 2015.

SILVEIRA, T. J. E. da. Fabricação de Moldes de Fundição pelo Processo de Impressão 3D: Analise Experimental com Estudo de Caso. 2017. 75f. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.



STOETERAU, R. L. et al. Tribologia – Apostila de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis. SC. Brasil. 2004. p. 110-180.

TSCHIPTSCHIN, A, P. Falhas por Desgaste: Análise de falhas III. Universidade de São Paulo – USP.

ZIER, A. F., *et al.* "Estudo da Prototipagem Rápida por Meio da Impressão 3d e Seu Efeito na Redução de Custos e Prazos dos Projetos de Produto." Memorial TCC Caderno da Graduação, v. 5.1, p.301-318, 2019.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.