

# Revista Brasileira de Engenharias

Data de aceite: 21/08/2025

## INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS ADITIVOS INSERIDOS NO PLA DURANTE PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA FDM

---

**Bruno Henrique Putsch**

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

**Andrei Buse**

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

**Junelene Custorio Pruner**

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

**George Luiz Bleyer Ferreira**

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

**Alvaro Canto Michelotti**

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

**Rodrigo Blödorn**

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

Todo o conteúdo desta revista está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).



**Resumo:** A tecnologia de fabricação por manufatura aditiva novos objetos, a partir do depósito de matéria-prima em camadas sequenciais, é uma das que mais se desenvolveu nos últimos anos, muito em razão dos diversos cenários que possibilita — seja para permitir a confecção de peças que, pelos métodos convencionais, não seriam viáveis, ou cuja complexidade seja mais elevada; seja pela redução de desperdícios e, consequentemente, de custos. Contudo, ainda há um longo caminho a ser percorrido até que se alcance plena viabilidade operacional e financeira, o que depende de pesquisas e estudos, inclusive quanto aos polímeros utilizados e aos aditivos que resultem na modificação de suas características, de modo a adaptar o material conforme as propriedades desejadas. Este trabalho tem, justamente, o intuito de verificar como a adição de talco, fibra de vidro e carbonato de cálcio no PLA (poliácido lático) influencia nas propriedades mecânicas do material. Na execução do teste de resistência à tração, foi observado um ganho de 14,94% no módulo de elasticidade com a adição de fibra de vidro, e de 11,20% com talco, quando comparado a uma amostra composta apenas de PLA. Já em relação ao carbonato de cálcio, as alterações não foram significativas. No que tange ao ponto de rompimento, os ensaios realizados com os aditivos apresentaram tendência de ruptura prematura, ocorrendo em torno de 2,5% de deformação, enquanto as amostras fabricadas com PLA puro suportaram, no mínimo, 3,2% de deformação antes do rompimento. Por fim, é importante destacar a utilização de um equipamento previamente modificado, a fim de permitir que os aditivos fossem misturados somente no instante anterior à aplicação do polímero sobre o objeto a ser fabricado.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Aditivos. PLA. Propriedades Mecânicas.

## INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de um componente pode ocorrer por meio da remoção de material, como nos processos de usinagem, nos quais parte da matéria-prima é retirada em forma de cavaco para dar forma à peça. Por sua vez, nos processos de adição de material — em que a peça é construída pela inclusão e moldagem de camadas — o desperdício é reduzido ou, em alguns casos, praticamente inexistente.

A manufatura aditiva apresenta importantes vantagens e desvantagens em comparação aos métodos tradicionais de fabricação, como soldagem, usinagem ou conformação. Entre os pontos negativos, destacam-se a complexidade de alguns métodos, a exigência de mão de obra qualificada e o aumento do tempo necessário no processo de desenvolvimento de produtos (PDP). Entretanto, os pontos positivos tornam-se cada vez mais relevantes, como a diminuição do desperdício de material e da necessidade de operação direta por parte de operadores, o que influencia diretamente na redução do custo final do produto.

Ciente desse cenário e visando ao aumento da competitividade, a indústria vem, há bastante tempo, incorporando a manufatura aditiva aos seus processos produtivos (Volpato, 2018, p. 15). Na realidade, as primeiras tentativas de produção por manufatura aditiva — ou seja, a construção de objetos pela sobreposição de camadas — remontam à década de 1890, quando Blanther desenvolveu um sistema de criação de mapas em relevo tridimensional, utilizando discos de cera para representar o contorno da topografia (Volpato, 2018, p. 19). Essa tecnologia foi base para a proposta de Matsubara, da Mitsubishi Motors, em 1974, que sugeriu o uso de uma resina fotopolimerizável coberta por partículas refratárias (como pó de grafite ou areia) para moldar objetos que, posteriormente, seriam submetidos à luz para cura.

No entanto, este não foi o primeiro sistema proposto. Por volta de 1860, François Willème utilizou 24 (vinte e quatro) câmeras dispostas em distâncias uniformes para gerar a silhueta de um objeto, permitindo a obtenção de sua forma, a qual era então esculpida.

Uma das formas mais atuais de manufatura aditiva envolve a sobreposição de camadas de polímero, tecnologia que remonta ao final da década de 1960 e início da década de 1970 (Volpato, 2018, p. 23). Desde então, os avanços têm sido expressivos. Em 2014, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) enviou à Estação Espacial Internacional (ISS, na sigla em inglês) um equipamento de manufatura aditiva (impressora 3D) para testes em ambientes de microgravidade. Essa iniciativa marca um novo patamar nas missões espaciais, pois permite a fabricação de peças e ferramentas para reparos e melhorias diretamente no espaço, reduzindo a necessidade de levar suprimentos previamente preparados (Sacani, 2014).

A expectativa de avanços ainda maiores é real, considerando experimentos realizados pela Agência Espacial Europeia (ESA), que visam à construção de bases lunares por meio da manufatura aditiva, utilizando materiais extraídos do próprio solo do satélite (Sacani, 2013).

Atualmente, já se observam impactos da manufatura aditiva no cotidiano, especialmente sob a ótica ambiental. Segundo Unmüßig (2021), cerca de 465 milhões de toneladas de plástico foram produzidas em 2019, sendo que 40% dos produtos plásticos são descartados em menos de um mês. A utilização de polímeros biodegradáveis é, portanto, essencial para evitar um desastre ambiental num futuro próximo.

Contudo, ainda existem lacunas significativas a serem superadas. A manufatura aditiva utiliza, essencialmente, dois principais tipos de polímeros — que serão abordados mais detalhadamente neste trabalho —, os quais

apresentam vantagens e desvantagens. Entre os benefícios, destaca-se a possibilidade de produção de peças complexas sem a necessidade de moldes e com baixo investimento inicial. Por outro lado, as limitações incluem a fragilidade e a baixa capacidade de deformação das peças produzidas.

O poliácido lático (PLA) é um dos principais polímeros utilizados, recebendo atenção especial por ser derivado de fontes renováveis. Conforme Oliveira (2019), o PLA apresenta uma taxa de crescimento anual estimada entre 10% e 15% e já possui diversas aplicações industriais e comerciais, como embalagens de alimentos. Antes restrito a embalagens de alto valor agregado, o material hoje é empregado em maior escala devido à redução de seus custos de produção, impulsionada pelo surgimento de novas tecnologias.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo verificar se, e de que maneira, a adição de outros materiais ao processo de produção influencia nas propriedades mecânicas das peças fabricadas em PLA por manufatura aditiva utilizando a tecnologia FDM (modelagem por deposição fundida).

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### MANUFATURA ADITIVA

O processo de manufatura aditiva (MA), popularmente conhecido por impressão 3D, é a utilização de equipamentos específicos para a construção de um objeto, previamente modelado por softwares, por meio do depósito de materiais sobre a camada anterior.

De acordo com (Rodrigues *et al.*, 2016), a MA envolve oito etapas comuns a todos os métodos: 1) Modelagem em software CAD (*Computer-aided design*); 2) Conversão para STL; 3) Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo; 4) Configuração da máquina; 5) Produção; 6) Remoção; 7) Pós-processamento; 8) Aplicação.

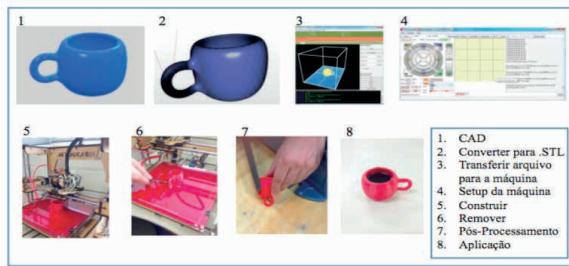


Figura 1. Oito etapas comuns a todos os trabalhos. (Rodrigues *et al.* 2016, 10).

No CAD realiza-se o desenho e a modelagem digital da peça, utilizando-se, para isso, um *software* específico ou scanners, quando se trata de engenharia reversa. O arquivo digital gerado nessa etapa é convertido, geralmente, para o formato STL (*Standard Tessellation Language*), padrão utilizado pelos equipamentos de manufatura aditiva. Na sequência, o arquivo é enviado para produção. Eventuais manipulações para corrigir o posicionamento, o tamanho ou a orientação da peça no arquivo podem ser necessárias (Rodrigues *et al.*, 2016, p. 9), assim como a configuração do equipamento, incluindo a definição da espessura de cada camada, entre outros parâmetros.

Para fins deste trabalho, é importante destacar que existem diversas tecnologias de MA. Entre elas, está a modelagem por deposição fundida (FDM), considerada a mais acessível e popular no mercado. Essa tecnologia permite a utilização de diversos tipos de materiais, mas pode apresentar limitações se o equipamento não estiver devidamente calibrado. Um dos principais inconvenientes da FDM é a visibilidade das linhas de impressão e, dependendo da orientação da peça durante a fabricação, podem ocorrer variações na resistência mecânica entre diferentes direções.

Outra tecnologia amplamente utilizada é a estereolitografia (SLA), que se destaca por proporcionar alto detalhamento e boa aparência estética às peças, sendo bastante aplicada na indústria médica. Nesse processo, uma resina líquida termoendurecível é curada por meio

de um feixe de laser UV. Durante a construção, são necessárias estruturas de suporte, que são removidas ao término do processo. Embora a SLA seja altamente precisa e apresente baixo desperdício de material, a manipulação da resina pode tornar o ambiente de trabalho desorganizado e de difícil manutenção.

A tecnologia conhecida como processamento digital de luz (DLP) é semelhante à SLA, diferenciando-se principalmente pela utilização de uma tela de projeção de luz para realizar a cura da peça. Suas vantagens também incluem a produção de peças pequenas, curvas ou translúcidas. No entanto, o alto custo da matéria-prima é uma desvantagem adicional em relação às demais técnicas.

A sinterização seletiva a laser (SLS) é outro método relevante, que promove a fusão de pós, transformando-os em material sólido. Normalmente, esse processo dispensa a necessidade de estruturas de suporte, o que reduz a demanda por acabamento adicional. Em contrapartida, o investimento necessário para a aquisição do equipamento é significativamente mais alto.

Já a sinterização direta de metal a laser (DMLS) baseia-se no depósito de uma liga metálica em pó sobre a camada anterior, sendo o material sintetizado por um feixe de laser. A principal vantagem desse processo é a fabricação de peças livres de tensões residuais (Castro, 2018). Contudo, o alto custo da matéria-prima e da operação ainda representa uma limitação importante.

A fusão seletiva a laser (SLM) apresenta semelhanças com o DMLS, com a principal diferença sendo que, neste caso, o laser não apenas sinteriza, mas funde completamente o pó metálico. Como resultado, as peças produzidas apresentam maior resistência mecânica. Apesar do custo relativamente inferior em comparação com outras tecnologias de metais, essa técnica é restrita a ligas específicas, o que pode limitar sua aplicação.

A tecnologia *multi jet fusion* (MJF) utiliza um pó extremamente fino para criar objetos com baixa porosidade e alta densidade, visto que cada camada possui aproximadamente 80 µm. Trata-se de um processo mais rápido que o SLS, mas que apresenta limitações quanto à variedade de materiais disponíveis, além de custos mais elevados.

Por fim, a tecnologia *polyjet* também possui características semelhantes à SLS, mas se diferencia por permitir a produção de peças com uma variedade maior de propriedades mecânicas. Segundo Castro (2018), essa técnica pode ser bastante útil no desenvolvimento de projetos envolvendo sobre-moldagem ou o uso de materiais como borracha de silicone, auxiliando inclusive na economia com ferramentas para testes.

As principais características, vantagens e limitações dessas tecnologias podem ser consultadas de forma resumida na Tabela 1.

Tecnologia	Velocidade	Precisão	Produtividade	Preço	Diversidade de materiais
FDM	Médio	Médio	Alto	Baixo	Alto
SLA	Alto	Alto	Alto	Médio	Médio
DLP	Baixo	Alto	Alto	Médio	Médio
SLS	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto
DMLS	Baixo	Médio	Baixo	Alto	Alto
SLM	Baixo	Médio	Baixo	Alto	Baixo
MJF	Médio	Alto	Médio	Alto	Baixo
PolyJet	Médio	Alto	Médio	Alto	Alto

Tabela 1. Comparação entre as tecnologias de impressão 3D (CASTRO, 2018).

Para esta pesquisa, utiliza-se a técnica de modelagem por deposição fundida (FDM), por ser a mais comum e acessível. Essa tecnologia fabrica objetos a partir de materiais como o poliácido lático (PLA) ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Considerando que apenas o primeiro material permite a inserção de aditivos — sendo, portanto, uma das

matérias-primas adotadas neste trabalho —, apresenta-se, a seguir, uma descrição de suas principais características.

## POLIÁCIDO LÁTICO (PLA)

O poliácido lático (PLA) é um polímero que se caracteriza por sua fragilidade e baixa capacidade de deformação, além de apresentar propriedades de barreira semelhantes às de alguns polímeros derivados do petróleo, como o politereftalato de etileno (PET). Apresenta uma temperatura de transição vítreia (Tg) que varia entre 50 °C e 80 °C, e uma temperatura de fusão cristalina (Tm) entre 130 °C e 180 °C.

Sua utilização vem crescendo em diferentes setores industriais, especialmente em aplicações voltadas a embalagens, alças, lacres, capas protetoras, acabamentos, e nos setores alimentício, automotivo, químico, cosmético, hospitalar e de utensílios domésticos, com destaque para os itens descartáveis (Garlotta, 2001).

O PLA pode ser empregado na construção de protótipos ou mesmo de peças finais, desde que não haja exigências rigorosas quanto à resistência mecânica. Além disso, destaca-se por sua aplicabilidade como material biodegradável. Suas propriedades podem ser modificadas por meio de tratamentos superficiais ou da formação de misturas com outros compostos, o que permite melhorar determinadas características mecânicas e ampliar seu campo de aplicação (Andersson, 2010 *apud* Cardinali, 2018).

## PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PLA

Existem três formas estereoquímicas distintas para o PLA: o poliácido lático-L (PLLA), o poliácido lático-D (PDLA) e o poliácido lático D-L (PDLLA). A estrutura D-L, ou seja, o PDLLA, é amorfa, enquanto o PLLA e o PDLA são polímeros semicristalinos. A alteração nas proporções dos enantiômeros L e D permitem obter polímeros com diferentes

graus de cristalinidade e, portanto, com distintas propriedades físico-mecânicas (Garlotta, 2001).

As propriedades mecânicas dos polímeros estão associadas a diversos fatores, desde o tipo de ensaio aplicado até suas características estruturais, como grau de cristalinidade, presença de grupos polares, massa molar, entre outros (Canevarolo, 2006). Estudos demonstram que tanto a resistência ao impacto quanto a temperatura de amolecimento Vicat aumentam proporcionalmente com o grau de cristalinidade e a massa molar do polímero (Garlotta, 2001).

O PLLA é conhecido por apresentar um grau de cristalinidade em torno de 37% e maior densidade aparente (cerca de 1,24 g/cm<sup>3</sup>), pois, nas regiões cristalinas, as cadeias moleculares encontram-se mais compactadas e organizadas, reduzindo o volume livre. Como resultado, o PLLA exibe propriedades superiores, como maior módulo de elasticidade (em torno de 3,0 GPa), tensão de escoamento média entre 50 a 70 MPa, e maior dureza, em comparação com a versão amorfa do PLA. Isso se deve ao arranjo mais denso das cadeias poliméricas, que dificulta seu movimento sob solicitações mecânicas (Canevarolo, 2006).

## ADITIVOS PARA POLÍMEROS

Os aditivos oferecem alternativas para superar dificuldades relacionadas ao processamento, às limitações de desempenho e às restrições quanto à estabilidade ambiental dos polímeros. Sua aplicação decorre da necessidade de facilitar a produção e de melhorar propriedades físicas e de durabilidade das peças, o que faz com que estejam em constante evolução e diversificação (Canevarolo, 2002).

A introdução de aditivos em produtos plásticos é um processo complexo, que demanda análise criteriosa dos requisitos mínimos de processamento, bem como das propriedades

finais desejadas para o produto (Almeida, 2015). De forma geral, existem dois principais objetivos para a adição de aditivos aos polímeros: a modificação das propriedades do material — como aumento da rigidez, flexibilidade ou redução de custo — e a garantia de estabilidade térmica e química durante o processamento (Rabello, 2000).

Quanto à quantidade de aditivo a ser incorporada, Almeida (2015) aponta que esta pode ser ajustada de acordo com três fatores principais: o tipo de polímero base, o processo de fabricação adotado e a aplicação final da peça. Considerando essas variáveis, é possível realizar um balanço adequado de aditivos, de modo a otimizar o desempenho do material para a finalidade pretendida.

## CARGAS OU REFORÇOS

Os polímeros, em geral, apresentam baixa resistência mecânica, térmica e estabilidade dimensional quando comparados a materiais metálicos ou cerâmicos. Contudo, destacam-se pela facilidade de processamento e pela liberdade de design que oferecem durante a fabricação de peças (Almeida, 2015).

Para superar algumas de suas limitações, é comum a adição de cargas ao material polimérico. Essas cargas podem ter função reforçante ou atuar como agentes de enchimento, promovendo alterações significativas em diversas propriedades do material, como a resistência mecânica, rigidez e densidade do produto (Rabello, 2000).

Durante o processamento, entretanto, a presença de cargas pode aumentar a viscosidade do polímero fundido, dificultando o escoamento e o molde, além de reduzir a resistência ao impacto. Em muitos casos, as cargas também contribuem para a nucleação de trincas, o que compromete a resistência à fadiga do material. Ainda assim, sua utilização apresenta vantagens importantes, como o aumento da estabilidade dimensional e a redução da retração da peça durante o resfriamento ou a cura (Almeida, 2015).

## REQUISITOS DOS ADITIVOS DE POLÍMEROS

Conforme comentam Almeida e Souza (2014), para que uma substância seja efetivamente considerada um aditivo polimérico, é necessário que atenda a determinados requisitos. Primeiramente, o aditivo deve ser eficiente, além de apresentar estabilidade suficiente para suportar as condições de temperatura e pressão às quais será submetido, sem que haja perda das características desejadas. Também é essencial que possua boa capacidade de dispersão no polímero, permitindo sua incorporação na proporção adequada.

Adicionalmente, o aditivo precisa ser estável frente a fatores ambientais, como variações de temperatura, umidade e radiação ultravioleta, de modo a evitar alterações indesejadas nas propriedades da peça ao longo do tempo. Por sua natureza molecular — geralmente menor e menos densa do que a do polímero —, o aditivo não deve apresentar incompatibilidades que dificultem sua interação com a matriz polimérica. A ligação entre as moléculas deve se manter estável não apenas durante o processamento, mas também ao longo de toda a vida útil do produto, sob pena de perda das propriedades funcionais previamente conferidas pelo aditivo.

## INSERÇÃO DE ADITIVOS AO POLÍMERO

Como visto, aditivar os polímeros resultam na modificação de suas características. Contudo, é necessário frisar que já no processo original de produção da matéria-prima, o fabricante insere suplementos, alguns de natureza obrigatória, para aumentar a produtividade ou mesmo as características físicas, tais como estabilizantes térmicos e lubrificantes. Ainda, pode haver a incorporação de agentes fotoestabilizantes, de expansão ou retardantes de chamas.

Os aditivos, diferentemente do polímero que pode ser em formas variadas, geralmente estão em pó, à exceção dos aditivos lubrificantes, que costumam ser líquidos. Contudo, visando a melhor manipulação, também é possível encontrar fornecedores que disponibilizem o aditivo na Fig. 2, sendo em A) grânulos, B) micro grânulos, C) flakes, D) pastilhas e E) bastonetes. Na Fig. 2 apresentam-se as formas que os aditivos podem ser encontrados.

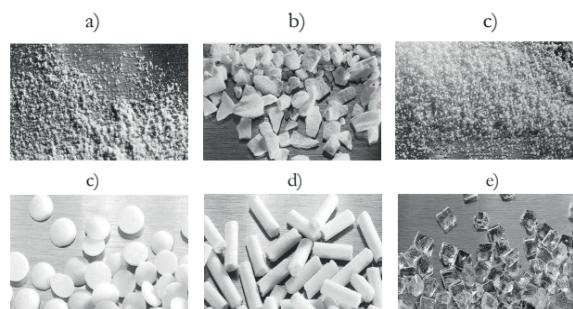


Figura 2. Cinco tipos de fornecimento de aditivos (REBELLO e PAOLI, 2013, 63).

A forma do aditivo importa ao processo de produção, pois tem relação direta com a distribuição e uniformidade no polímero e esta interfere nas características finais da peça. Ressalta-se que as moléculas de um aditivo bem distribuído e uniforme podem ser encontradas por todo o objeto impresso. Já em um aditivo mal distribuído e desuniforme, as moléculas estão concentradas em um único ponto, como pode ser observado na Fig. 3.

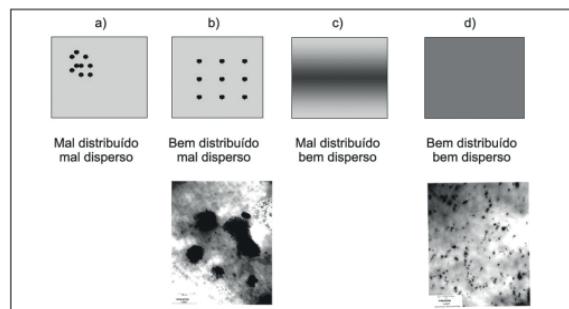


Figura 3. Distribuição uniforme do aditivo na peça (RABELLO e PAOLI, 2013, 61).

Ressalta-se, porém, que uma distribuição desigual e não uniforme não necessariamente é sinônimo de erro, haja vista que se pode estar pretendendo, no processo de produção, um produto que simule ou imite características de naturalidade, tal como textura de granito ou pedras.

## PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os materiais e equipamentos utilizados para realização deste trabalho, assim como métodos para comparação entre as propriedades das amostras produzidas.

### MATERIAIS DE ENSAIO

Os materiais utilizados neste trabalho compõem o polímero biodegradável poliácido lático – PLA e aditivos que podem contribuir com melhorias nas propriedades mecânicas do material.

### POLIÁCIDO LÁTICO

O polímero biodegradável utilizado como filamento, foi o PLA Basic da 3D Fila com diâmetro de 1,75 mm. A Tabela 2 apresenta as propriedades do material.

Propriedade	Valor
Resistência à tração na ruptura	144,8 kPa
Alongamento na ruptura	160%
Módulo elástico por tração	3,8 MPa
Resistência ao impacto IZOD	0,3 J/m

Tabela 2. Propriedades do PLA 3D fila (3D FILA, 2019).

Na Figura 4 pode-se observar como o filamento é antes da realização do processo de impressão.



Figura 4. Filamento de PLA utilizado para as amostras (3D FILA, 2019).

Como aditivos, foram utilizados os materiais fibra de vidro, talco e carbonato de cálcio.

### FIBRA DE VIDRO

A fibra de vidro é muito conhecida por ser utilizada como compósito e contribuir com aumento das propriedades mecânicas. Pelos valores intrínsecos do vidro, espera-se que a amostra de PLA + fibra de vidro tenha um aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade, com o custo de menor valor para a resistência à tração de ruptura. Na Tab. 3 apresenta-se os valores das propriedades da fibra de vidro:

Propriedade	Valor
Densidade	2,66 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à tração	2000 MPa
Módulo de elasticidade	82 GPa
Elongação	3%

Tabela 3. Propriedades da fibra de vidro (TEXGLASS, 2018).

## TALCO

O talco auxilia na estabilidade da impressão, reduzindo a absorção de água e a contração do material, aumentando a resistência à deflexão térmica. O talco é adicionado aos polímeros por simples mistura mecânica, pois existem agentes de ligação que servem como ponte entre o talco e o polímero, melhorando muito o desempenho do produto acabado. O talco utilizado nos testes é genérico e adquirido em farmácia.

## CARBONATO DE CÁLCIO

O carbonato de cálcio é o principal componente de rochas como os calcários. Então, ele pode ser obtido através da calcinação e precipitação de um carbonato de cálcio natural. Dessa forma, temos um produto de baixa densidade e alto índice de brancura. A adição de cargas do tipo carbonato de cálcio ou talco ao polipropileno é capaz de promover a melhoria de suas propriedades mecânicas como, por exemplo, o aumento do módulo de rigidez que tende a melhorar a tenacidade no ponto de fratura.



Figura 5. Carbonato de Cálcio utilizado.

## MÉTODOS

### EQUIPAMENTO DE IMPRESSÃO 3D

O equipamento de manufatura aditiva FDM utilizado para a fabricação das peças para este estudo foi da marca Creality, modelo 3D FDM Ender-3 e é um dos equipamentos mais populares do mercado (Fig. 7).



Figura 7. Imagem do equipamento utilizado para a fabricação das peças (BURGUER, 2019).

Segundo dados do fabricante, o equipamento utilizado possui dimensões de 440 mm × 440 mm × 465 mm e massa total de 8 kg, sendo capaz de produzir peças com dimensões máximas de 220 mm × 220 mm × 250 mm, a uma velocidade de impressão de até 100 mm/s. Os materiais compatíveis com o equipamento incluem PLA, TPU e ABS, todos com diâmetro de 1,75 mm. A tecnologia empregada é a de Modelagem por Deposição Fundida (FDM), e a transmissão de dados para o *software* interno pode ser realizada via conexão online ou por meio de cartão de memória SD — sendo esta última a opção adotada para o desenvolvimento deste trabalho.

Originalmente, o bico extrusor opera com camadas de altura entre 0,1 mm e 0,4 mm, possui diâmetro de 0,4 mm e precisão de ±0,1 mm, trabalhando a uma temperatura de 250 °C, enquanto a mesa aquecida permanece a 110 °C. No entanto, como será detalhado adiante, essa parte do equipamento foi modificada para permitir a inserção dos aditivos utilizados no estudo.

## CABEÇOTE MISTURADOR

O bico extrusor que será utilizado foi desenvolvido por Buerger (2018). Segundo o autor, o dispositivo, chamado de cabeçote misturador, é formado por dois funis, onde os aditivos são depositados e direcionados ao bico extrusor. Essas duas peças são conectadas a outras duas, chamadas de “encaixe do funil”, que, além de unir as partes, têm a finalidade de conduzir o material até o filamento, que corre dentro da terceira parte, chamada de “bloco misturador”, conforme Fig. 8.

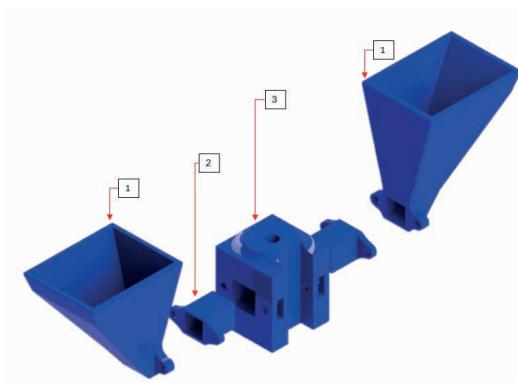


Figura 8. Detalhes do cabeçote misturador: (1) funil, (2) encaixe do funil e (3) bloco misturador (Burguer, 2019).

Em ambos os lados do funil é adicionado aditivo e, pela região central, o filamento de PLA. O aditivo é direcionado ao bico extrusor por gravidade e pelo próprio movimento natural do equipamento. O dispositivo adaptado pode ser conferido na Fig. 9.

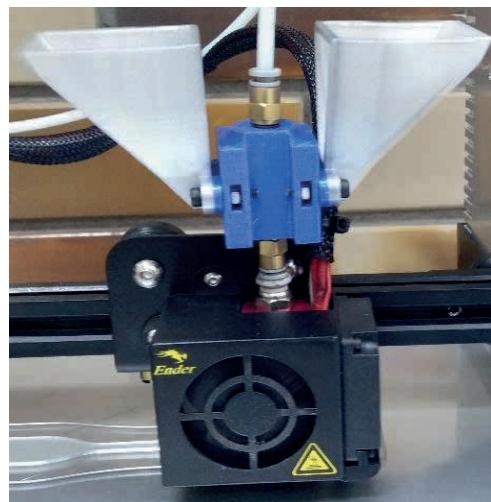


Figura 9. Cabeçote montado na impressora (Burger, 2019).

Ainda conforme Burger (2019), os melhores resultados foram obtidos quando se elevou a temperatura de extrusão para 210°C, ante os 190-200°C, indicados pela fabricante.

## CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram desenhados no software SOLIDWORKS, baseados na norma ASTM D638-02<sup>a</sup> (2002) e os arquivos foram criados com as seguintes configurações: espessura da camada em 0,12 mm; quantidade de paredes igual a 4; preenchimento de 95%; temperatura de 210 °C para o bico; temperatura da mesa em 65 °C e velocidade de 50 mm/s. Para o corpo de prova submetido à tração foi definido o Tipo IV com 5 mm de espessura, conforme a Fig. 10. Enquanto na Fig. 11 pode-se observar o corpo de prova utilizado para a realização dos ensaios de compressão.

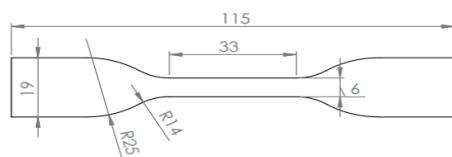


Figura 10. Geometria do corpo de prova para ensaio de tração, conforme norma ASTM D638-02a (2002).

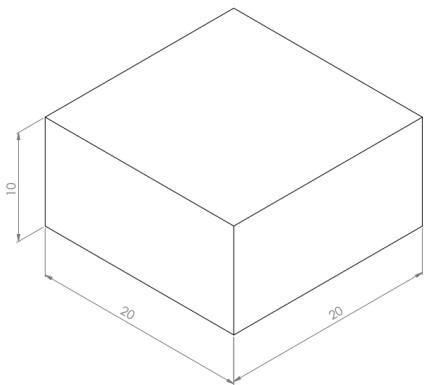


Figura 11. Bloco dimensionado para teste de compressão.

## MÁQUINA DE TESTE

Os ensaios foram realizados na máquina de tração Pantec Versat 300 da fabricante Panan-tec (Figura 12), que opera com carga máxima de 300 kN e indica deslocamento com precisão de 1  $\mu\text{m}$ . Os corpos de prova foram sujeitos a ensaios de tração e compressão, sendo que nestes foram avaliados a deformação que ocorre na peça quando aplicada tensão elástica.



Figura 12. Máquina para ensaio de tração e compressão.

## COMPRESSÃO E TRAÇÃO

Para este trabalho, foram produzidas duas amostras de cada composição distinta de PLA com aditivos para o ensaio de compressão, além de quatro corpos de prova para o ensaio de tração. A mesma quantidade foi fabricada utilizando apenas o filamento de PLA puro, com a finalidade de controle e comparação dos resultados. Na Fig. 13 são representados os corpos de prova finalizados.

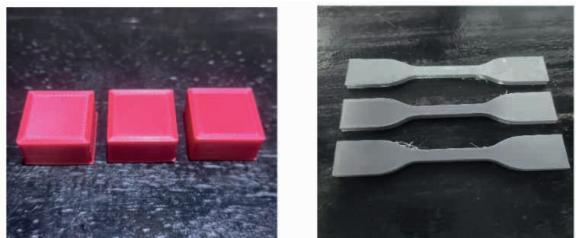


Figura 13. Corpos de prova para compressão (esquerda) e tração (direita).

## MICROESTRUTURA

Os corpos de prova foram submetidos à análise da microestrutura para que seja visualizado se existe a presença de aditivos inseridos na peça, conforme a Fig. 14.



(a)

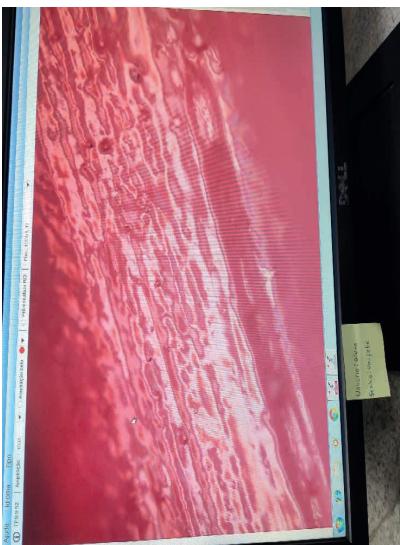


Figura 14. Comparação entre as microestruturas: a) peça fabricada apenas com PLA e b) peça fabricada com PLA e fibra de vidro.

## AVALIAÇÃO DA MASSA DAS AMOSTRAS

A massa de 4 (quatro) amostras de tração e 2 (duas) de compressão de cada composição diferente foram medidas com uma balança de precisão da SHIMADZU AUW320, com resolução de  $\pm 1$  mg, totalizando 24 corpos de prova. Na Fig. 15 apresenta-se a comparação entre a amostra sem aditivos e com fibra de vidro.



Figura 15. Exemplo medição da massa do corpo de prova fabricando com PLA e fibra de vidro.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão serão apresentados os resultados obtidos para as peças fabricadas com aditivos juntamente com PLA, bem como a discussão sobre esses procedimentos.

## ALTERAÇÕES NOS CORPOS DE PROVA

O dispositivo adaptado não possui qualquer mecanismo que force a entrada do aditivo no cabeçote de extrusão do equipamento. Ainda que seja possível perceber alterações na microestrutura do material, a dispersão dos valores das massas fez com que, em comparação às peças fabricadas apenas com PLA, tais diferenças não fossem estatisticamente significativas. O próprio movimento do cabeçote gera uma vibração suficiente no dispositivo para que o aditivo percorra o trajeto juntamente com o filamento de PLA, garantindo a adesão — embora de forma não parametrizada e sem controle rigoroso.

A Figura 16 apresenta a comparação entre as massas das amostras. As composições de PLA com fibra de vidro, bem como de PLA com talco, apresentaram um acréscimo na média das massas. Por outro lado, o carbonato de cálcio, por ser um pó mais denso, possivelmente teve sua adesão ao PLA dificultada. Em razão disso, a média das massas dos corpos de prova fabricados com essa composição ficou abaixo da média das amostras produzidas com PLA puro.

Apesar das médias apresentarem variações visíveis entre si, as diferenças não se mostraram estatisticamente significativas. Para verificar essa hipótese, aplicou-se o teste de hipótese nas médias das massas, cujas fórmulas serão apresentadas na próxima seção. Os resultados dos testes estatísticos encontram-se no Apêndice A.

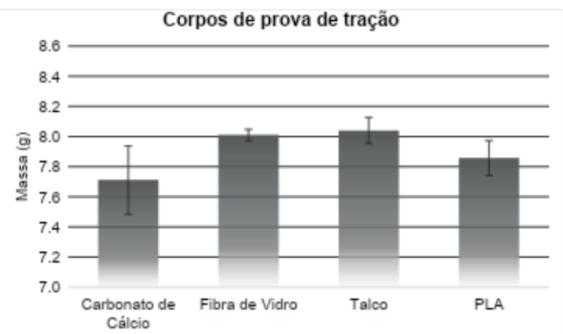


Figura 16. Média aritmética das medições de massas das amostras.

## ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E TRAÇÃO

As curvas dos gráficos de resistência à tração estão representadas com a tensão máxima pela deformação que o material sofre, conforme a Fig. 17.

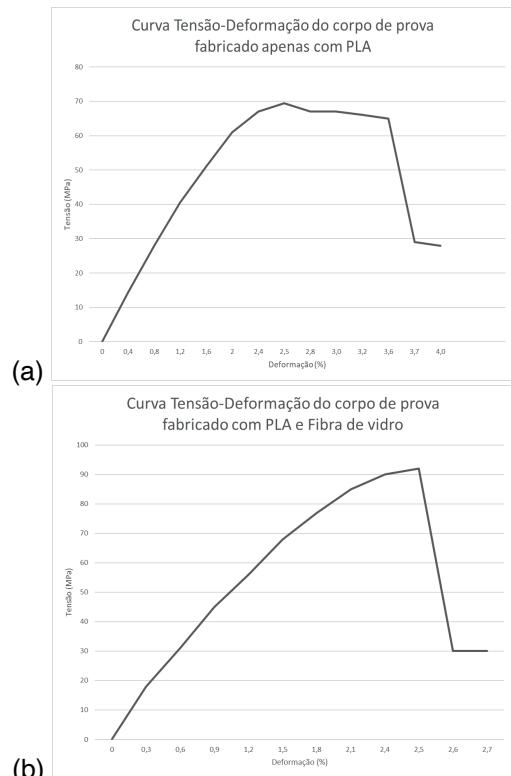


Figura 17. Comparação entre as curvas de tensão-deformação: a) apenas PLA e b) corpos de prova de PLA com fibra de vidro.

Ao comparar os gráficos dos corpos de prova de PLA puro e de PLA com fibra de vidro, observa-se que as amostras compostas apenas por PLA apresentam uma faixa de deformação plástica entre 2% e 3%. Já nas amostras com adição de fibra de vidro, percebe-se um comportamento mais rígido e frágil, caracterizado por um alongamento até a ruptura de aproximadamente 2,4%, embora suportando tensões máximas superiores.

Os dados de tensão máxima (MPa) e deformação na ruptura (%) das amostras de PLA puro e PLA com aditivos estão apresentados na Figura 18.

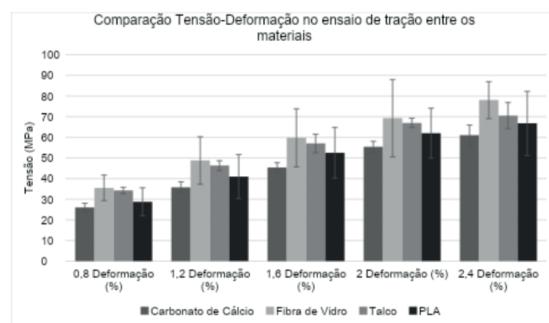


Figura 18. Comparação entre as curvas de tensão-Deformação no teste de compressão.

Para consolidação dos valores encontrados, investigou-se pelo teste de hipótese a tensão média dos três materiais comparados ao PLA puro na mesma condição para 1,6%, 2,0% e 2,4% de deformação. Na Eq. (1) encontra-se a fórmula da variância utilizada.

$$s^2 = \frac{\sum x^2}{n} - \bar{x}^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

onde:

$\Sigma x^2$  - Somatório dos valores elevados ao quadrado

n - quantidade de amostras

$\bar{x}^2$  - Média elevada ao quadrado

Após o cálculo da variância, calculou-se a variância combinada entre o corpo de prova com aditivo e PLA puro. Na Eq. (2) encontra-se a fórmula da variância combinada utilizada.

$$S\bar{x}_1 - S\bar{x}_2 = \sqrt{\left(\frac{(n_1 s^2_1 + n_2 s^2_2)}{n_1 + n_2 - 2}\right) * \frac{(n_1 + n_2)}{n_1 * n_2}} \quad \text{Eq. (2)}$$

onde:

$n_1$  – quantidade de amostras do corpo de prova com aditivo

$n_2$  – quantidade de amostras do corpo de prova apenas com PLA

$s^2_1$  – variância do corpo de prova com aditivo

$s^2_2$  – variância do corpo de prova apenas com PLA

Com estes valores calculados, pode-se obter o T de student. Na Eq. (3) encontra-se a fórmula utilizada.

$$T = \frac{\bar{x}_{fibra} - \bar{x}_{pla}}{S\bar{x}_1 - S\bar{x}_2} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde:

$\bar{x}_{pla}$  – Média aritmética dos valores encontrados para o PLA

$\bar{x}_{fibra}$  – Média aritmética dos valores encontrados para a fibra de vidro

$S_x$  – Variância combinada entre o corpo de prova com aditivo e PLA puro

Para um intervalo de confiança de 95% e com quatro amostras, utiliza-se o valor tabelado de  $T(\alpha = 0,05) = 2,447$ . Todos os resultados foram comparados estatisticamente e estão apresentados no Apêndice A. Os valores obtidos no teste de tração para as amostras fabricadas com PLA + fibra de vidro e PLA + talco, quando deformadas acima de 2%, mostraram-se estatisticamente significativos. Para

deformações de apenas 1,6%, nenhum dos materiais apresentou diferenças relevantes, e os corpos de prova contendo carbonato de cálcio também não evidenciaram alterações consideráveis em relação ao PLA puro.

Ao dividir o valor da tensão (MPa) pela deformação (%), obtém-se o módulo de elasticidade do material. Os dados obtidos no teste de tração realizado em todas as quatro amostras de cada composição estão apresentados na Tabela 4.

	Tensão máxima (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
PLA puro	71,50	3,40	27,50
PLA com fibra de vidro	73,75	2,50	34,63
PLA com talco	68,75	2,30	33,50
PLA com carbonato de cálcio	63,67	3,00	30,13

Tabela 4 – Média aritmética do resultado dos ensaios de resistência à tração.

Observa-se um aumento de 14,94% no módulo de elasticidade com a adição de fibra de vidro e de 11,20% com a adição de talco. Em contrapartida, o uso de carbonato de cálcio resultou em uma redução de 8,71% nesse parâmetro, em comparação com os corpos de prova compostos apenas por PLA.

Entretanto, os ensaios realizados com aditivos indicaram uma tendência ao rompimento prematuro, ocorrendo por volta de 2,5% de deformação, enquanto as amostras produzidas exclusivamente com PLA suportaram, no mínimo, 3,2% de deformação antes da ruptura. Os resultados obtidos com o uso do carbonato de cálcio mostraram-se significativamente inferiores aos obtidos com fibra de vidro ou talco, sendo considerados indesejáveis para os fins propostos.

Os resultados referentes ao ensaio de compressão dos materiais estão apresentados na Fig. 19.

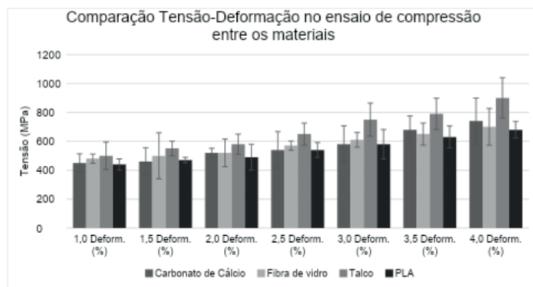


Figura 19. Comparação entre as curvas de tensão-deformação no teste de compressão.

Por segurança, o ensaio de tração foi interrompido após 4% de deformação, valor considerado suficiente para a geração dos gráficos e a obtenção dos dados necessários. No gráfico apresentado, constam os valores médios obtidos a partir da análise de todas as peças submetidas à compressão.

Conforme observado na Figura 19, no ponto correspondente a 4% de deformação, houve um acréscimo aproximado de 23% na tensão máxima suportada pelas peças de PLA com talco, e de cerca de 5% nas peças de PLA com fibra de vidro, em comparação com aquelas compostas apenas por PLA puro. Por outro lado, as amostras fabricadas com PLA e carbonato de cálcio apresentaram valores bastante próximos aos do PLA puro, sem diferenças estatisticamente significativas acima de 3% de deformação, conforme indicado nas Tabelas 20 e 21, localizadas no Apêndice A.

Um exemplo de alteração nas propriedades mecânicas decorrente da adição de aditivos em polímeros pode ser observado no trabalho de Cerruti *et al.* (2011), citado por Klemann (2018), o qual demonstra que a inserção de resíduos vinícolas no polímero PHB contribui positivamente para os valores de tensão elástica. Segundo os autores, a dispersão da estrutura polimérica é favorecida com a adição do material. De forma semelhante, na Figura 18 e na Tabela 4, é possível perceber uma relação entre o aumento da massa e o acréscimo na tensão elástica, confirmando a tendência observada pelos autores.

Tanto a fibra de vidro quanto o talco são amplamente conhecidos por atuarem como cargas no interior da matriz polimérica, preenchendo o material e promovendo o aumento da resistência mecânica das peças fabricadas. No entanto, o rompimento prematuro observado nas amostras com esses dois aditivos pode estar associado à formação de trincas instáveis, geradas por concentrações de tensão ao redor dos aditivos, conforme discutido por Bucknall e Paul (2009) *apud* Klemann (2018).

## CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi identificar variações nas propriedades mecânicas de peças fabricadas por manufatura aditiva com a tecnologia FDM utilizando filamento de PLA com diferentes aditivos. Foi possível realizar um estudo das características dos materiais e obter resultados promissores para algumas das composições analisadas.

A principal alteração nas propriedades mecânicas foi observada nos ensaios de tração. Considerando-se a tensão aplicada no ponto de 2,4% de deformação, verificou-se um aumento de 14,94% no módulo de elasticidade para as amostras com fibra de vidro e de 11,20% para aquelas com talco, em comparação com o PLA puro. Por outro lado, os corpos de prova contendo carbonato de cálcio não apresentaram ganhos significativos em relação ao material de controle. É possível que a incorporação da fibra de vidro, realizada de forma não parametrizada, tenha contribuído para uma maior dispersão dos resultados, reduzindo a confiabilidade de alguns dados, como os obtidos no ponto de 2,0% de deformação — conforme pode ser conferido no Apêndice A.

De modo geral, os ensaios realizados com os aditivos demonstraram uma tendência ao rompimento precoce, ocorrendo em torno de 2,5% de deformação, enquanto as amostras compostas apenas por PLA resistiram a deformações de, no mínimo, 3,2% antes da falha.

Considerando o aumento do módulo de elasticidade em baixos níveis de deformação, as peças fabricadas com PLA aditivado com fibra de vidro ou talco mostram-se potencialmente adequadas para aplicações onde o carregamento levaria o PLA puro a atingir a zona de deformação plástica. Nesses casos, os aditivos poderiam atuar como reforços, impedindo a deformação permanente da peça.

Para estudos futuros, recomenda-se a análise do comportamento dos aditivos em diferen-

tes temperaturas de extrusão, uma vez que não é possível afirmar que a temperatura de 210 °C utilizada neste experimento seja ideal para garantir a fusão adequada entre o filamento de PLA e os aditivos incorporados. Também seria interessante avaliar se temperaturas inferiores, na faixa usual de 180–200 °C, poderiam ser mais eficientes, a depender das características térmicas dos aditivos empregados.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudêncio de, e Wender B. Souza. 2014. **Engenharia dos polímeros: tipos de aditivos, propriedades e aplicações**. São Paulo: Saraiva.
- BUCKNALL, C. B.; PAUL, D.R. **Notched impact behavior of polymer blends: Part 1: New model for particle size dependence**. Elsevier, n. 50, p. 5539 – 5548, 2009.
- BUERGER, Glauco. **Impressão 3d com adição de grafite durante processo**. 2019. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Unifebe, Brusque, 2019.
- CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Ciência dos Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- CARDINALI, Jéssica. Avaliação das propriedades mecânicas de corpos de prova de PLA com diferentes cores obtidos por processo aditivo por extrusão. 2018. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- CASTRO, Zuffo. 2018. **Tipos de Impressora 3d**. *Revista Industria 4.0*, (novembro). <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-impressora-3d>.
- CERRUTI, P.; Santagata, G.; Gomez D'Ayala, G.; Ambrogi, V.; Carfagna, C.; Malinconico, M.; Persico, P. **Effect of natural polyphenolic extract on the properties of a biodegradable starch-based polymer**. *Polymer Degradation and Stability*. v. 96, p. 839-846, 2011.
- GARLOTTA, Donald. 2001. **A Literature Review of Poly (Lactic Acid)**. *Journal of Polymers and the Environment* 9, no. 2 (abril).
- KLEMANN, Laísa Cristina. **Influência da adição de subprodutos da indústria vinícola nas propriedades do polímero biodegradável poli (ácido lático)**. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.
- OLIVEIRA, Ana Carolina Salgado de. **Poli (Ácido Lático) Aplicado para Embalagens de Alimentos: Uma Revisão**. 2019. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/713/501>. Acesso em: 31 out. 2021.
- RABELLO, Marcelo. 2000. **Aditivação de Polímeros**. São Paulo: Artliber.
- RABELLO, Marcello, and Marco-Aurélio de PAOLI. 2013. **Aditivação de termoplásticos**. São Paulo: Artliber.
- RODRIGUES, Vinícius P., Eduardo de S. Zancul, Caue G. Mançanares, Caio M. Giordano, and Mario S. Salerno. 2016. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. *Revista Geopros*, (abril). <https://revista.feb.unesp.br/index.php/geopros/article/view/1657/784>.

SACANI, Sérgio. 2013. **Construindo Uma Base Lunar Com Impressão 3D**. Space Today. <https://spacetoday.com.br/construindo-uma-base-lunar-com-impressao-3d/>.

SACANI, Sérgio. 2014. **A Impressora 3D da Estação Espacial Internacional**. Space Today. <https://spacetoday.com.br/a-impressora-3d-da-estacao-espacial-internacional/>.

UNMÜBIG, Barbara. 2021. **Poluição por plástico no planeta está perto do ponto de não retorno. Como vamos sair dessa?** Rede Brasil Atual. <https://www.redebrasilitual.com.br/blogs/blog-na-rede/2021/08/poluicao-plastico-perto-nao-retorno/>.

VOLPATO, Neri. 2018. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Blucher.

## APÊNDICE A

Teste de hipótese para investigação das massas dos corpos de prova.

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	0,2809
Xpla:	7,9517	n:	4
H0:	$\bar{x}_{fibra}$	=	$\bar{x}_{pla}$
H1	$\bar{x}_{fibra}$	>	$\bar{x}_{pla}$
T	0,2086	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )		Não se pode rejeitar H0	

Tabela A1. Massa das peças de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,049	S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	0,2818
Xpla:	7,9517	n:	4
H0:	$\bar{x}_{talco}$	=	$\bar{x}_{pla}$
H1	$\bar{x}_{talco}$	>	$\bar{x}_{pla}$
T	0,3453	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )		Não se pode rejeitar H0	

Tabela A2. Massa das peças de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	7,7106	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	1,7450
Xpla:	7,9517	n:	4
H0:	$\bar{x}_{pla}$	=	xcalcio
H1	$\bar{x}_{pla}$	>	xcalcio
T	-0,1382	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )		Não se pode rejeitar H0	

Tabela A3. Massa das peças de PLA+calcio de vidro e apenas PLA

## Teste de hipótese para investigação das tensões suportadas no teste de tração

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	5,2895
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{fibra}$	=	$\bar{x}_{pla}$
H1:	$\bar{x}_{fibra}$	>	$\bar{x}_{pla}$
T	1,37	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )	<b>Não se pode rejeitar H0</b>		

Tabela A4. 1,6% de deformação no teste de tração de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	6,2965
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{fibra}$	=	$\bar{x}_{pla}$
H1:	$\bar{x}_{fibra}$	>	$\bar{x}_{pla}$
T	3,85	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )	<b>Rejeita-se H0</b>		

Tabela A5. 2,0% de deformação no teste de tração de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	6,2965
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{fibra}$	=	$\bar{x}_{pla}$
H1:	$\bar{x}_{fibra}$	>	$\bar{x}_{pla}$
T	3,85	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )	<b>Rejeita-se H0</b>		

Tabela A6. 2,4% de deformação no teste de tração de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,0097	S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	4,11298756
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{talco}$	=	$\bar{x}_{pla}$
H1:	$\bar{x}_{talco}$	>	$\bar{x}_{pla}$
T	1,09	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )	<b>Não se pode rejeitar H0</b>		

Tabela A7. 1,6% de deformação no teste de tração de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,0097	S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	3,9264
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{talco}}$	=	$\bar{x}_{\text{pla}}$
H1	$\bar{x}_{\text{talco}}$	>	$\bar{x}_{\text{pla}}$
T	3,69	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )	<b>Rejeita-se H0</b>		

Tabela A8. 2,0% de deformação no teste de tração de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,0097	S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	3,8918
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{talco}}$	=	$\bar{x}_{\text{pla}}$
H1	$\bar{x}_{\text{talco}}$	>	$\bar{x}_{\text{pla}}$
T	4,69	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )	<b>Rejeita-se H0</b>		

Tabela A9. 2,4% de deformação no teste de tração de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	8,0097	S <sup>2</sup> Xcalcio - Xpla:	3,8703
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{pla}}$	=	$\bar{x}_{\text{calcio}}$
H1	$\bar{x}_{\text{pla}}$	>	$\bar{x}_{\text{calcio}}$
T	-1,87	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )	<b>Não se pode rejeitar H0</b>		

Tabela A10. 1,6% de deformação no teste de tração de PLA+carbonato de cálcio de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	8,0097	S <sup>2</sup> Xcalcio - Xpla:	3,9131
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{pla}}$	=	$\bar{x}_{\text{calcio}}$
H1	$\bar{x}_{\text{pla}}$	>	$\bar{x}_{\text{calcio}}$
T	0,70	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )	<b>Não se pode rejeitar H0</b>		

Tabela A11. 2,0% de deformação no teste de tração de PLA+carbonato de cálcio de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	8,0097	S <sup>2</sup> Xcalcio - Xpla:	3,8837
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{pla}}$	=	$\bar{x}_{\text{calcio}}$
H1	$\bar{x}_{\text{pla}}$	>	$\bar{x}_{\text{calcio}}$
T	2,19	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )	<b>Não se pode rejeitar H0</b>		

Tabela A12. 2,4% de deformação no teste de tração de PLA+carbonato de cálcio de vidro e apenas PLA

Teste de hipótese para investigação das tensões suportadas no teste de compressão.

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}$ fibra	=	$\bar{x}$ pla
H1	$\bar{x}$ fibra	>	$\bar{x}$ pla
T	7,35	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )		<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A13. 2,0% de deformação no teste de compressão de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}$ fibra	=	$\bar{x}$ pla
H1	$\bar{x}$ fibra	>	$\bar{x}$ pla
T	7,35	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )		<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A14. 3,0% de deformação no teste de compressão de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xfibra:	8,0097	S <sup>2</sup> Xfibra - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}$ fibra	=	$\bar{x}$ pla
H1	$\bar{x}$ fibra	>	$\bar{x}$ pla
T	4,90	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )		<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A15. 4,0% de deformação no teste de compressão de PLA+fibra de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,0097	S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}$ talco	=	$\bar{x}$ pla
H1	$\bar{x}$ talco	>	$\bar{x}$ pla
T	22,05	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )		<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A16. 2,0% de deformação no teste de compressão de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,0097	S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571	n:	4
H0:	$\bar{x}$ talco	=	$\bar{x}$ pla
H1	$\bar{x}$ talco	>	$\bar{x}$ pla
T	41,64	T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )		<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A17. 3,0% de deformação no teste de compressão de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xtalco:	8,0097		S <sup>2</sup> Xtalco - Xpla:	67,1131
Xpla:	7,8571		n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{talco}}$	=	$\bar{x}_{\text{pla}}$	
H1	$\bar{x}_{\text{talco}}$	>	$\bar{x}_{\text{pla}}$	
T	3,20		T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )			<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A18. 4,0% de deformação no teste de compressão de PLA+talco de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	8,0097		S <sup>2</sup> Xcalcio - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571		n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{pla}}$	=	$\bar{x}_{\text{calcio}}$	
H1	$\bar{x}_{\text{pla}}$	>	$\bar{x}_{\text{calcio}}$	
T	7,35		T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T > T( $\alpha=0,05$ )			<b>Rejeita-se H0</b>	

Tabela A19. 2,0% de deformação no teste de compressão de PLA+C. de cálcio de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	8,0097		S <sup>2</sup> Xcalcio - Xpla:	4,0825
Xpla:	7,8571		n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{pla}}$	=	$\bar{x}_{\text{calcio}}$	
H1	$\bar{x}_{\text{pla}}$	>	$\bar{x}_{\text{calcio}}$	
T	0,00		T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )			<b>Não se pode rejeitar H0</b>	

Tabela A20. 3,0% de deformação no teste de compressão de PLA+C. de cálcio de vidro e apenas PLA

Xcalcio:	8,0097		S <sup>2</sup> Xcalcio - Xpla:	334,4313
Xpla:	7,8571		n:	4
H0:	$\bar{x}_{\text{pla}}$	=	$\bar{x}_{\text{calcio}}$	
H1	$\bar{x}_{\text{pla}}$	>	$\bar{x}_{\text{calcio}}$	
T	-0,33		T( $\alpha=0,05$ )	2,447
Como T < T( $\alpha=0,05$ )			<b>Não se pode rejeitar H0</b>	

Tabela A21. 4,0% de deformação no teste de compressão de PLA+C. de cálcio de vidro e apenas PLA