

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LUIZ GUSTAVO DA SILVA

SUPORTES POROSOS DE PLA E ABS PARA IMOBILIZAÇÃO DO FUNGO

***Aspergillus oryzae* IPT-301 OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

LUIZ GUSTAVO DA SILVA

SUPORTES POROSOS DE PLA E ABS PARA IMOBILIZAÇÃO DO FUNGO
Aspergillus oryzae IPT-301 OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Sylma Carvalho Maestrelli

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Silva, Luiz Gustavo da.

Suportes porosos de PLA e ABS para imobilização do fungo *Aspergillus oryzae* IPT-301 obtidos por impressão 3D / Luiz Gustavo da Silva. - Poços de Caldas, MG, 2025.

34 f. : il. -

Orientador(a): Sylma Carvalho Maestrelli.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. FDM. 2. Modelagem. 3. Açúcares nutracêuticos. 4. FOS. 5.
Biotecnologia. I. Maestrelli, Sylma Carvalho, orient. II. Título.

LUIZ GUSTAVO DA SILVA

SUPORTES POROSOS DE PLA E ABS PARA IMOBILIZAÇÃO DO FUNGO
Aspergillus oryzae IPT-301 OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 02 de dezembro de 2025

Prof.^a Dr.^a Sylma Carvalho Maestrelli
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Dr.^a Ana Carolina Vieira
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

MSc. Felipe de Paula Faria
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

RESUMO

A crescente procura de açúcares saudáveis, o mercado de frutooligossacarídeos (FOS) se encontra em expansão, podendo chegar a US\$ 7,50 bilhões em 2032. No entanto, concentração de FOS encontrada em espécies vegetais é insuficiente para a produção e comercialização em larga escala do produto, motivando a busca por técnicas alternativas de produção deste açúcar nos setores alimentício e farmacêutico. Enzimas como a frutossiltransferase (FTase, E.C. 2.4.1.9), de *Aspergillus oryzae* IPT-301 podem catalisar a reação de transfrutossilacção da sacarose para produção de FOS; todavia, o tempo de meia vida da biomassa é curto comprometendo a produção de FOS em larga escala. Uma das maneiras de se aumentar a estabilidade da biomassa é por meio da sua imobilização em suportes inertes e insolúveis, atuando como uma barreira de proteção contra as condições adversas do meio reacional, e contribuindo para o aumento do tempo de meia vida das enzimas e aumentando seu potencial de reuso. Materiais poliméricos, considerados também de alto potencial para adsorção e catálise pelas suas características superficiais, alta pureza e facilidade de modificação morfológica tornando candidatos a suportes porosos. Este trabalho apresenta os primeiros estudos relacionados à produção de peças porosas poliméricas de poli-ácido láctico (PLA) e borracha estireno-butadieno-acrilonitrila (ABS) por meio da técnica FDM (*fused deposition modelling*), envolvendo desde as etapas de criação e desenvolvimento dos modelos 3D porosos, caracterização dos polímeros para posterior impressão 3D das peças em condições otimizadas e avaliação das peças porosas obtidas. Os resultados foram satisfatórios; tanto que a pesquisa está sendo continuada ampliando-se o leque de polímeros investigados, além da obtenção e caracterização de compósitos cerâmica/polímero, buscando a sinergia das propriedades das peças porosas para imobilização de biomassa e futura produção de açúcares nutracêuticos.

Palavras-chave: FDM; modelagem; açúcares nutracêuticos; FOS; biotecnologia

ABSTRACT

Driven by the increasing demand for health-promoting sugars, the fructooligosaccharide (FOS) market is undergoing significant expansion and is projected to reach USD 7.50 billion by 2032. Nevertheless, the endogenous FOS concentrations in plant species remain insufficient to support industrial-scale extraction and commercialization, thereby stimulating the development and optimization of alternative biotechnological production routes for this carbohydrate within the food and pharmaceutical industries. Enzymes such as fructosyltransferase (FTase, E.C. 2.4.1.9), from *Aspergillus oryzae* IPT-301, can catalyze the transfructosylation reaction of sucrose to produce FOS; however, the short half-life of these extracellular enzymes compromises large-scale FOS production. One of the ways to increase the stability of these enzymes is through their immobilization on inert and insoluble supports, which act as a protective barrier against the adverse conditions of the reaction medium, contributing to an increased enzyme half-life and enhancing their reuse potential. Polymeric materials, also considered to have high potential for adsorption and catalysis due to their surface properties, high purity, and ease of morphological modification, are excellent candidates for porous supports. This report presents the initial studies related to the production of porous polymeric parts from poly-lactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) using the FDM (fused deposition modeling) technique. This involved stages from the creation and development of the 3D porous models, characterization of the polymers for subsequent 3D printing of the parts under optimized conditions, and evaluation of the obtained porous parts. The results were extremely satisfactory; so much so that the research is being continued by expanding the range of polymers investigated, in addition to the production and characterization of ceramic/polymer composites, seeking a synergy of properties in the porous parts for enzyme immobilization and the future production of nutraceutical sugars .

Keywords: FDM; modeling; nutraceutical sugars; FOS; biotechnology.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	8
2.1	OBJETIVO GERAL	8
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS	8
3	JUSTIFICATIVA	9
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1	FRUTOOLIGOSSACARÍDEOS	10
4.2	ENZIMA FRUTOSILTRANSFERASE	10
4.3	POLÍMEROS	11
4.4	TÉCNICAS DE IMPRESSÃO 3D	12
4.4.1	Modelagem por Deposição Fundida	13
4.4.2	Estereolitografia	14
4.4.3	Sinterização Seletiva a Laser	16
5	MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1	PRODUÇÃO DO MODELO DAS PEÇAS POROSAS POLIMÉRICAS	18
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO PLA	19
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO ABS	20
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO PLA	22
6.2	CARACTERIZAÇÃO DO ABS	24
6.3	IMPRESSÃO DE PEÇAS POROSAS	27
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento da demanda por adoçantes naturais, alimentos prebióticos e produtos com benefícios à saúde, os frutooligossacarídeos (FOS) vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado, movimentando cerca de US\$ 2,82 bilhões em 2023, com previsão de atingir US\$ 7,50 bilhões em 2032. Com essa expansão, torna-se necessário o desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias para a produção desses açúcares saudáveis em escala industrial (Dias *et al.*, 2025).

A produção de FOS pode ocorrer a partir da extração direta de vegetais que contêm o açúcar, mas essa rota é pouco empregada industrialmente devido ao alto custo e baixo rendimento. Outros métodos incluem a hidrólise enzimática da inulina e, por fim, a síntese através da transfrutossilacção da sacarose realizada pela enzima frutossiltransferase (FTase) (Araújo; Macedo; Vimercati, 2020).

O processo de produção torna-se viável quando o custo operacional é otimizado. Uma alternativa eficiente para a redução desses custos é a imobilização da biomassa contendo FTase. Esse processo gera maior estabilidade, confere resistência a condições operacionais adversas e possibilita a recuperação e reutilização da biomassa, diminuindo significativamente os gastos produtivos (Liu *et al.*, 2022).

Para que ocorra uma imobilização eficiente, o processo não depende apenas da deposição da biomassa no suporte, mas também das características do material utilizado. Fatores como a composição do material, a porosidade, a área superficial e a rugosidade são determinantes para o sucesso da imobilização. A impressão 3D é uma técnica de conformação de matérias que possibilita a construção de peças com estruturas com porosidade controlada, tamanho e formatos diversos, possibilitando um controle rigorosos nas características do suporte (Fanis, 2025).

Dado o exposto anterior, essa pesquisa abrangeu o desenvolvimento e a produção de suportes porosos poliméricos (de poli-ácido láctico) - PLA e de acrilonitrila butadieno estireno -ABS) obtidos por meio de técnicas de impressão 3D. O intuito do desenvolvimento desses suportes é o de aprimorar o processo biotecnológico de produção de FOS por meio da imobilização de células fúngicas íntegras, buscando-se um biocatalisador robusto que apresente alta atividade, seletividade e especificidade, além de grande estabilidade térmica e operacional, de forma a ser aplicado em diferentes configurações de reatores para a síntese de FOS.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa teve como objetivo investigar a produção e o uso potencial de suportes poliméricos (termoplásticos) porosos de poli-ácido láctico (PLA) e de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), obtidos por FDM (*Fused Deposition Modeling*), para a imobilização de biomassa contendo células fúngicas íntegras, de *Aspergillus oryzae* IPT-301 para a produção de FOS.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, foi necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Estudar e desenvolver o design de peças porosas e por meio de duas rotas distintas: a rota direta, modelando com base em espumas comerciais; e rota indireta, utilizando imagens de microscopia ótica de fatias da espuma;
- Caracterizar as propriedades térmicas e químicas dos polímeros PLA e ABS antes da impressão 3D, utilizando técnicas como Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Análise Termogravimétrica (TGA) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para posterior utilização dos dados no processo de impressão 3D;
- Produzir suportes porosos utilizando uma impressora 3D por meio de tecnologia FDM;
- Ajustar as condições de produção e otimização da geometria e características dos poros para a seleção do melhor suporte; capaz de relacionar os melhores resultados em ensaios de imobilização.

3 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho justifica-se pela crescente demanda da indústria alimentícia por ingredientes funcionais, especificamente os frutooligossacarídeos (FOS), cuja produção industrial ainda enfrenta desafios relacionados à viabilidade econômica e otimização de processos. Embora promissora, a tecnologia de produção de FOS encontra-se em fase de desenvolvimento de rotas que maximizem a eficiência produtiva (Liu *et al.*, 2022).

Neste cenário, a pesquisa propõe uma abordagem inovadora ao investigar a imobilização de células fúngicas íntegras em suportes poliméricos porosos obtidos via Manufatura Aditiva. A escolha da técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), ou Fabricação por Fusão de Filamento (FFF), fundamenta-se em seu baixo custo operacional, alta reprodutibilidade e acessibilidade, representando uma alternativa tecnológica viável para a conformação de materiais em bioprocessos (Fanis, 2025).

A seleção dos materiais — Poli-ácido Lático (PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) — é estratégica. O PLA destaca-se por ser ecologicamente sustentável, atóxico e de fácil processabilidade, sendo amplamente aceito em aplicações médicas e alimentícias (Sepahi *et al.*, 2021; Rajesh *et al.*, 2023). Em contrapartida, o ABS é investigado por sua robustez mecânica e durabilidade sob carga, embora sua aplicação exija uma avaliação crítica quanto à toxicidade (Sepahi *et al.*, 2021). Dessa forma, o estudo busca validar o potencial desses termoplásticos como matrizes de suporte, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de biorreação mais eficientes e sustentáveis.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FRUTOOLIGOSSACARÍDEOS

Os frutooligossacarídeos, comumente nomeados como FOS, são açúcares não convencionais, não metabolizados pelo organismo humano e não calóricos (Park; Passos, 2003). Por se tratarem de açúcares mais saudáveis se comparados aos açúcares amplamente comercializados (tendo em vista o seu baixo valor calórico, sua segurança de consumo aos diabéticos e sua atuação como prebiótico) e por apresentarem diversos benefícios à saúde e nutrição humana, os FOS estão se tornando alvo de interesse nas indústrias farmacêutica e alimentícia, com destaque na atuação como substitutos aos edulcorantes convencionais, o que torna necessário o desenvolvimento de processos em escala industrial que permitam a produção desses componentes.

Os FOS são oligômeros de frutose formados por unidades frutossil e que podem ser encontrados naturalmente, embora em pequenas quantidades, em alguns vegetais e frutas. Esses açúcares também podem ser obtidos pela ação catalítica de enzimas que exibem atividade de transfrutossilacção, utilizando sacarose como substrato (Gonçalves, 2019). Dessa forma, a produção de FOS em escala industrial ocorre mediante reação de transfrutossilacção enzimática da sacarose.

4.2 ENZIMA FRUTOSILTRANSFERASE

A produção de FOS em escala industrial ocorre mediante reação de transfrutossilacção enzimática da sacarose. As enzimas capazes de realizar tal ação de transfrutossilacção são, principalmente, as frutossiltransferases e as -frutofuranosidases. No entanto, as frutossiltransferases (FTase, E.C. 2.4.1.9) ganham ainda mais destaque na produção dos FOS em decorrência da sua ação catalítica, exibindo altas atividades de transfrutossilacção. (Park; Passos, 2003)

A reação de transfrutossilacção ocorre quando a FTase se conecta na posição (2→1) da molécula de sacarose, clivando-a e separando o grupo frutossil do grupo glicosil. Em seguida, o grupo frutossil se conecta a uma molécula aceptora apropriada, como a sacarose ou outras moléculas de FOS, produzindo um oligômero de frutose e liberando glicose no meio reacional (Rocha *et al.*, 2021).

O fungo que se destaca na produção da FTase é o *Aspergillus oryzae*, possuindo o status de GRAS (Generally Recognized As Safe), devido a sua baixa toxicidade na produção de alimentos. Com isso, diversas pesquisas vêm demonstrando a grande capacidade de produção da frutossiltransferase por este fungo devido à elevada atividade de transfrutossililação exibida pela enzima microbiana (Fernandez *et al.*, 2007).

Na produção de FOS, para que célula fúngica que contém a enzima FTase apresente maior atividade, é necessário que ela passe pelo processo de imobilização. Este procedimento melhora suas condições de operação, conferindo à enzima uma atividade catalítica prolongada e maior estabilidade frente a variações de pH e temperatura. Além disso, possibilita sua operação contínua e reutilização. Para realizar a imobilização enzimática, pode utilizar suportes porosos devido à sua alta superfície específica, facilitando sua fixação (Liu *et al.*, 2022).

4.3 POLÍMEROS

Os polímeros são uma categoria de materiais utilizada pela humanidade há milhares de anos. Inicialmente, eram empregados apenas polímeros naturais, como algodão, madeira, borracha e amido. Com o passar do tempo e o avanço tecnológico, foram desenvolvidos e utilizados também os polímeros sintéticos e semissintéticos (Canevarolo, 2006).

Ao longo da história, é possível destacar marcos importantes no uso desses materiais. Na Roma e no Egito antigos, por exemplo, resinas e graxas já eram utilizadas. A descoberta das Américas pelos europeus introduziu a borracha natural na Europa, e, posteriormente, o período industrial foi crucial para a área, no qual foram desenvolvidas técnicas de tratamento e produção. Dentre os avanços, destacam-se a vulcanização, desenvolvida por Charles Goodyear; a produção da nitrocelulose, o primeiro polímero semissintético; e o desenvolvimento dos poliésteres e das poliamidas (como o náilon), que revolucionou a indústria e o mercado da moda (Canevarolo, 2006).

Foi o cientista Hermann Staudinger, ganhador do Prêmio Nobel, quem propôs a teoria das macromoléculas, que definiu o que é um polímero. Segundo sua definição, um polímero é uma macromolécula que apresenta em sua estrutura unidades de repetição bem definidas (os monômeros) (Canevarolo, 2006). Os polímeros podem ser classificados em três classes: termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos são aqueles que, quando aquecidos, po-

dem ser moldados novamente. Já os termofixos, após sua cura, não podem ter a forma alterada. Por fim, os elastômeros são aqueles que possuem elasticidade elevada, com uma deformação cerca de 3 vezes o seu tamanho original (Natarelli *et al.*, 2019).

Dentre os principais aspectos positivos dos polímeros destacam-se a leveza e a fácil conformação, permitindo a construção de geometrias complexas e aplicações que vão desde utensílios domésticos até partes de aeronaves. Entretanto, os polímeros apresentam elevada sensibilidade ao calor e, comparativamente aos metais e cerâmicas, alta sensibilidade às intempéries, limitando seu uso em ambientes com temperaturas extremas e ambientes agressivos do ponto de vista químico (Natarelli *et al.*, 2019). Assim, para a aplicação de um polímero, é necessário conhecer previamente o ambiente e as condições de operação (do ponto de vista industrial) e as características/propriedades do polímero, para correta seleção e uso.

O PLA e o ABS figuram entre os materiais mais utilizados na impressão 3D por modelagem de deposição fundida (FDM), devido à sua excelente processabilidade. O poliácido láctico (PLA) é um polímero termoplástico semicristalino que apresenta boas propriedades termomecânicas, como elevada resistência à tração e baixo coeficiente de expansão térmica, características que o tornam um dos materiais mais estáveis para a manufatura aditiva. Trata-se de um polímero biodegradável, sintetizado a partir de fontes renováveis como milho, batata ou cana-de-açúcar. Já o ABS é um polímero termoplástico amorfo que apresenta propriedades como alta tenacidade, boa estabilidade térmica e notável resistência a ataques químicos. Diferentemente do PLA, o ABS não é biodegradável e requer temperaturas de processamento mais elevadas (Algarni; Ghazali, 2021; Oliveira *et al.*, 2016; Santana *et al.*, 2018).

4.4 TÉCNICAS DE IMPRESSÃO 3D

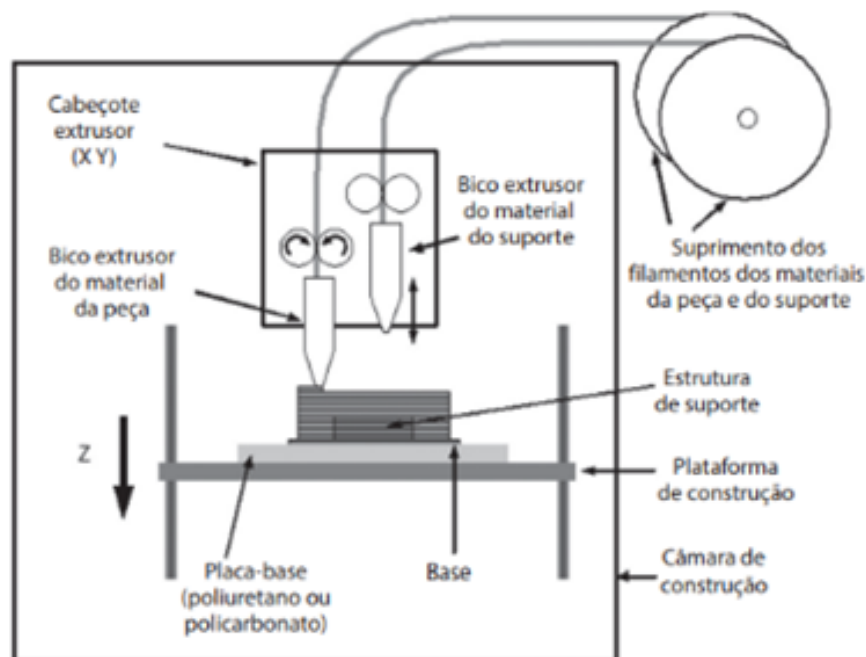
A tecnologia de impressão 3D tem sido cada vez mais empregada em diversas indústrias, como a automotiva, aeroespacial e médica. Essa expansão se dá devido às suas vantagens, que incluem a capacidade de criar peças leves com alta resistência mecânica, construir geometrias complexas e garantir uma fabricação rápida (Gibson *et al.*, 2021). A impressão 3D é uma técnica de manufatura no qual uma peça modelada previamente em um software de CAD (Computer Aided Design) e construída a partir de deposições consecutivas de material. Para a ser imprimida em 3D pode ser realizada gama de materiais, como metais, cerâmicas, polímeros

e compósitos, por meio de diversas técnicas. As técnicas mais comuns de impressão 3D são: Modelagem por Deposição Fundida (FDM), Estereolitografia (SLA) e Sinterização seletiva a laser (SLS) (Gibson *et al.*, 2021., 2024).

4.4.1 Modelagem por Deposição Fundida

A Modelagem por Deposição Fundida (FDM) notabiliza-se como uma das principais tecnologias de produção 3D, permitindo a fabricação de peças com geometrias que vão de simples a altamente complexas. Sua popularidade também se deve ao baixo custo, uma vez que emprega termoplásticos amplamente disponíveis, como o Ácido Polilático (PLA) e o Acrilnitrila Butadieno Estireno (ABS) (Mania *et al.*, 2019). A impressão 3D por FDM é um processo no qual um material é extrudado através de um bico calibrado que se movimenta em um plano X-Y, depositando o material sobre uma mesa de impressão que se movimenta para cima e para baixo no eixo Z Figura 1. A modelagem por deposição pode ser realizada com qualquer material que possa atingir o estado pastoso e depois se endureça (Volpato, 2017).

Figura 1 – Modelagem por Deposição Fundida



Fonte: Volpato (2017,p.150).

4.4.2 Estereolitografia

A manufatura por estereolitografia foi a primeira técnica de impressão 3D desenvolvida, começando na década de 1980 com a tentativa malsucedida de patente, do japonês doutor Hi-deo Kodama, de uma tecnologia de cura polimérica através de raios UV, no entanto, foi um tempo depois com o trabalho engenheiro Charles Hull que surge a patente de cura de resina fotossensível camada por camada com luz UV, chamada de estereolitografia (SLA) (Huang *et al.*, 2020).

O processo de impressão por estereolitografia pode ser dividido em quatro grandes gerações de inovação da tecnologia. Essas inovações foram desenvolvidas por cientistas com o intuito de melhorar a técnica e conseguir imprimir peças cada vez mais sofisticadas. As quatro gerações da estereolitografia são:

a) Estereolitografia por Varredura a Laser: esta é a primeira geração da tecnologia e funciona solidificando a resina líquida (curando-a) ao direcionar um feixe de laser focado sobre sua superfície. Para controlar o movimento do laser e a formação das camadas, existem diferentes arquiteturas mecânicas. Uma delas é o sistema com galvanômetros, que utiliza um laser fixo apontando para espelhos galvanométricos; esses espelhos direcionam o feixe rapidamente pelo plano X-Y para “desenhar” a camada, enquanto um estágio motorizado (elevador) move a plataforma de impressão no eixo Z. Outra arquitetura é o sistema de estágios móveis (Mesa X-Y-Z), no qual o laser permanece fixo e a própria plataforma de impressão (ou a cuba de resina) se move nos eixos X, Y e Z por meio de estágios motorizados. Por fim, a polimerização por absorção de dois fótons, onde se utiliza pulsos de laser ultrarrápidos e de baixa energia, possibilitando uma resolução de impressão muito alta, pois possui uma superfície de polimerização muito pequena (Huang *et al.*, 2020).

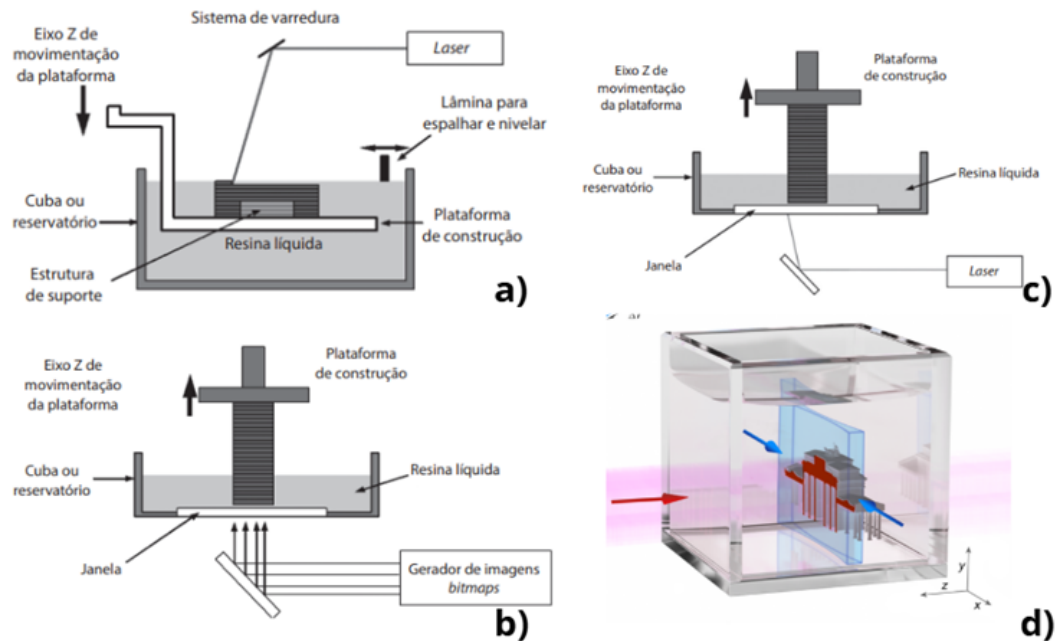
b) Estereolitografia de projeção: é o processo de segunda geração, no qual a impressão de uma camada é realizada de uma única vez através da projeção de uma imagem 2D, referente a uma camada, na superfície da resina. A projeção da camada pode ser feita utilizando um Display de Cristal Líquido (LCD) ou um Dispositivo de Micro espelhos Digitais (DMD). Ao comparar os dois tipos de projeção o LCD vai apresentar desvantagens como os pixels grandes, baixo contraste e baixa transmissão de luz UV, já o DMD devido grande quantidade de espelhos

microscópicos, geram projeções com maior contrastes e transmissão de luz UV (Huang *et al.*, 2020).

c) Estereolitografia contínua: a terceira geração desta tecnologia se destaca por transformar o processo em um movimento ininterrupto. A grande inovação é a eliminação das etapas cíclicas de descolamento da peça do fundo da cuba e do subsequente reposicionamento da plataforma. Isso é alcançado através de uma “zona morta” na base da cuba: trata-se de uma janela especial (muitas vezes permeável ao oxigênio) que inibe a cura da resina em uma fina camada líquida. Como a peça recém-solidificada não adere à janela, a plataforma de impressão pode subir continuamente no eixo Z, resultando em velocidades de fabricação drasticamente maiores (Huang *et al.*, 2020).

d) Estereolitografia volumétrica: Por fim, o desenvolvimento mais radical e recente do processo é a Estereolitografia Volumétrica. Esta técnica se difere fundamentalmente das gerações anteriores por produzir objetos 3D inteiros em uma única operação, em vez de construí-los camada por camada. A abordagem mais comum para isso é baseada em tomografia: um recipiente de resina fotossensível gira enquanto padrões de luz 2D (como “fatias” vistas de diferentes ângulos) são projetados através dele. A resina é formulada para que a luz de uma única projeção não seja suficiente para causar a solidificação. No entanto, onde os múltiplos feixes de luz se “somam” e acumulam energia acima de um certo limiar, o objeto inteiro se solidifica simultaneamente dentro do volume líquido (Huang *et al.*, 2020).

Figura 2 – Estereolitografia



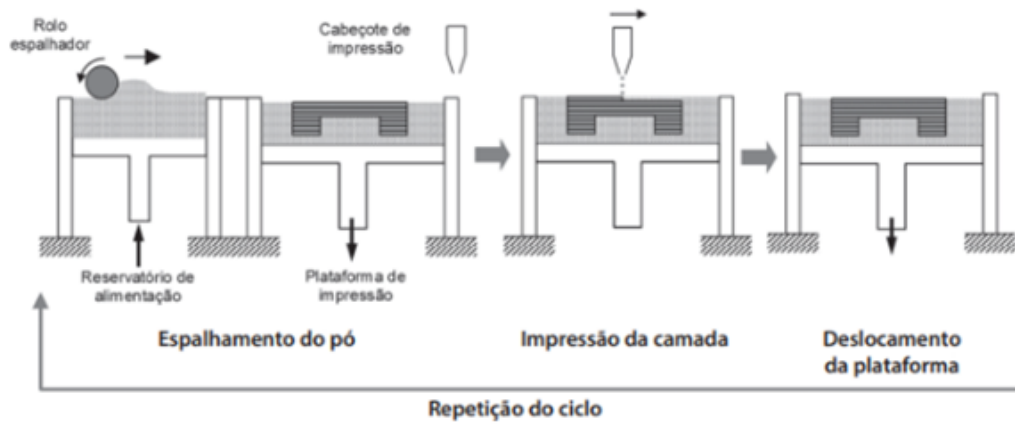
Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

Legenda: (a) Estereolitografia por Varredura a Laser;
 (b) Estereolitografia de projeção;
 (c) Estereolitografia contínua;
 (d) Estereolitografia volumétrica.

4.4.3 Sinterização Seletiva a Laser

O processo de manufatura aditiva por meio da Sinterização Seletiva a Laser é construído a partir da sinterização de finas camadas de pó através de um laser de dióxido de carbono de alta energia. Durante produção da peça, o pó do material desejado é espalhado uniformemente na bandeja de impressão, em seguida o laser começa a incidir sobre a superfície do pó sinterizando uma camada de material, após a sinterização da camada, ela é deslocada para baixo uma distância equivalente à de uma camada e a próxima começa a ser impressa, e essa sequência se repete até que a peça esteja pronta Figura 3. A SLS é útil para prototipagem rápida e para fabricação de componentes que utilizam pó metálico ou polimérico que necessite formas complexas e de alta precisão e com boas propriedades mecânicas. No entanto, as peças produzidas por SLS apresentam uma rugosidade superficial alta devido a fusão parcial do pó, características do pó e parâmetros de fabricação (Yehia *et al.*, 2024).

Figura 3 – Sinterização Seletiva a Laser



Fonte: Volpato (2017,p.195).

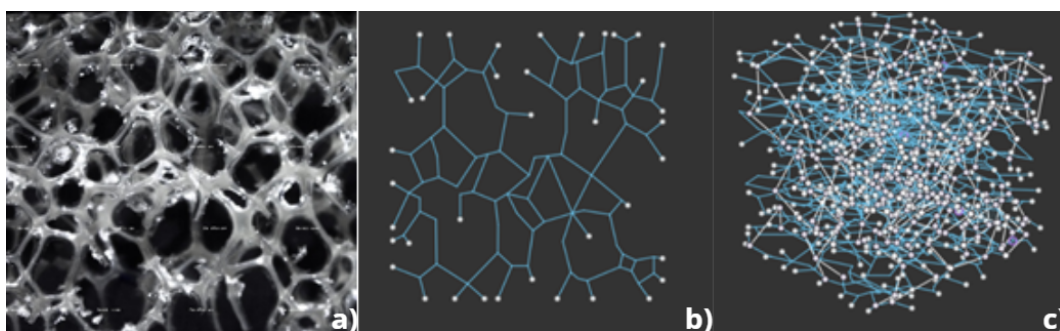
5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 PRODUÇÃO DO MODELO DAS PEÇAS POROSAS POLIMÉRICAS

A produção inicial do modelo das peças foi realizada por meio de imagens fotográficas de um cubo de esponja de PU (a mesma utilizada na produção das peças cerâmicas de acordo com (Santos, 2024)) com aresta de 1 cm. Devido à dificuldade de visualizar o interior da esponja, foram testados métodos alternativos. O primeiro teste envolveu embutir a esponja em resina e, após obter a imagem da superfície, desbastá-la gradualmente, mas a reação entre a esponja e a resina causou deformação, tornando o método inviável.

Outro teste consistiu em cortar a esponja em fatias finas e capturar imagens de cada lado dela utilizando um microscópio óptico (M.O.), junto ao software AxioVision. Os cortes em duas esponjas resultaram em 5 e 8 fatias, respectivamente. A esponja cortada em fatias mais finas Figura 4(a) permitiu uma modelagem mais precisa, facilitando a visualização de seu interior Figura 4(b). O modelo foi então construído no software CAD Fusion 360, por meio de esboços criados camada por camada, que foram conectados e espessados para replicar a esponja real Figura 4 (c). Esse modelo foi utilizado para impressão dos suportes porosos via Modelagem por Deposição Fundida (FDM).

Figura 4 – Imagem da esponja de PU utilizada para a criação do modelo dos suportes porosos



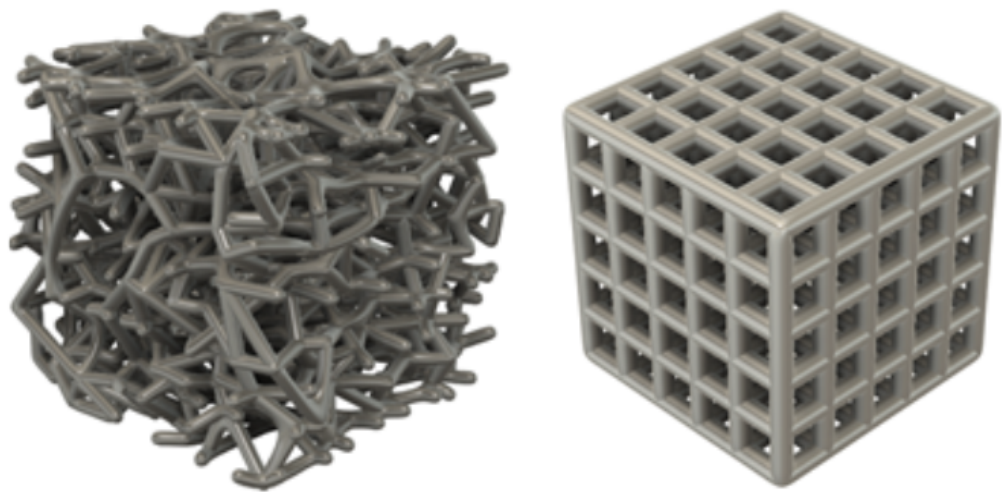
Fonte: Autor (2025).

Legenda: (a) Esponja real, imagem obtida por microscopia ótica;
 (b) modelagem de fatia da esponja
 (c) geração do modelo 3D

A Figura 5 mostra dois modelos de suportes desenvolvidos para impressão 3D, onde o primeiro não apresenta estruturação nas arestas e o segundo estruturação nas arestas.

Os modelos obtidos são realistas, com alta porosidade e grande área de superfície específica, além de possuírem uma porosidade controlada – características cruciais para a imobilização de biomassa. O próximo passo desta pesquisa foi a impressão dos modelos utilizando a técnica de Modelagem por Deposição Fundida (FDM).

Figura 5 – Imagem do suporte poroso desenvolvido sem estruturação na aresta (à esquerda) e com estruturação (à direita)



Fonte: Autor (2025).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO PLA

A Tabela 1 a seguir indica as principais propriedades do PLA (em forma de filamento) utilizado para impressão 3D. Para se obter informações mais detalhadas do material (além daquelas fornecidas por meio de literatura), foram feitos os ensaios descritos a seguir.

Tabela 1 – Propriedades do PLA aplicado na tecnologia FDM.

Propriedades	Valor
Densidade (g/cm ³)	1,25
Resistência à tração (MPa)	65
Resistência à flexão (MPa)	97
Temperatura de extrusão (°C)	190 - 210
Reciclabilidade	Sim
Biodegradabilidade	Sim
Toxicidade	Baixa

Fonte: Adaptado de Rajesh et al. (2023).

Calorimetria exploratória diferencial (DSC) utilizando-se equipamento da TA Instruments, modelo Q2000, com nitrogênio como gás de arraste, em fluxo constante de 50 ml/min foi realizada para a caracterização do PLA. A seguinte programação experimental foi utilizada:

- a) Aquecimento a 10°C/min, de 30°C até 200°C;
- b) Isoterma de 5 min, a 200°C, para eliminação do histórico térmico das amostras;
- c) Resfriamento a 10°C/min, de 200°C a 30°C;
- d) Aquecimento a 10°C/min, de 30°C até 200°C.

A estabilidade térmica do PLA foi avaliada através de análise termogravimétrica (TGA) utilizando-se um equipamento da TA Instruments, modelo Q50, sob aquecimento a uma taxa de 20°C/min, a partir de 30°C até 800°C, em atmosfera de nitrogênio.

Os grupos orgânicos presentes no PLA foram determinados pela técnica de espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR); utilizando-se equipamento Agilent Technologies modelo Cary 630 com medida de transmitância entre 4000 cm^{-1} e 750 cm^{-1} .

Para todos os ensaios realizados, foram utilizados fragmentos de filamento de 1,75 cm de espessura da Creality™; esses filamentos são os mesmos utilizados para a impressão das peças em 3D, realizado em impressora também da Creality, modelo K1C.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO ABS

Para a impressão das peças porosas de ABS, cujas características são especificadas na Tabela 2, foram adquiridos filamentos também de 1,75 cm de espessura da Creality™, sendo as peças impressas em 3D em impressora Creality, modelo K1C.

Tabela 2 – Propriedades do ABS aplicado na tecnologia FDM.

Propriedades	Valor
Densidade (g/cm^3)	1,01 a 1,09
Resistência ao impacto Izod (J/m)	144 a 566
Coefficiente de fricção	0,30
Dureza Rockwell	93 a 115
Tensão de ruptura (MPa)	0,1 a 113
Módulo à flexão (MPa)	1650 a 3110
Temperatura de fusão (°C)	175
Temperatura de transição vítrea (°C)	Fase PB: -73; Matriz SAN: 109
Estrutura	Amorfa

Fonte: Adaptado de Hirayama (2015); Pinto (2012); Piramidal (2016); Roda (2014).

As caracterizações por calorimetria exploratória diferencial (DSC) utilizando-se equipamento da TA Instruments, modelo Q2000, com nitrogênio como gás de arraste, em fluxo constante de 50 ml/min; análise termogravimétrica (TGA) utilizando-se equipamento da TA Instruments, modelo Q50, sob aquecimento a uma taxa de 20°C/min, a partir de 30°C até 800°C, em atmosfera de nitrogênio e espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR); utilizando-se equipamento Agilent Technologies modelo Cary 630 com medida de transmitância entre 4000 cm^{-1} e 750 cm^{-1} também foram realizadas para o ABS com a mesma programação realizada para o PLA, anteriormente descrita.

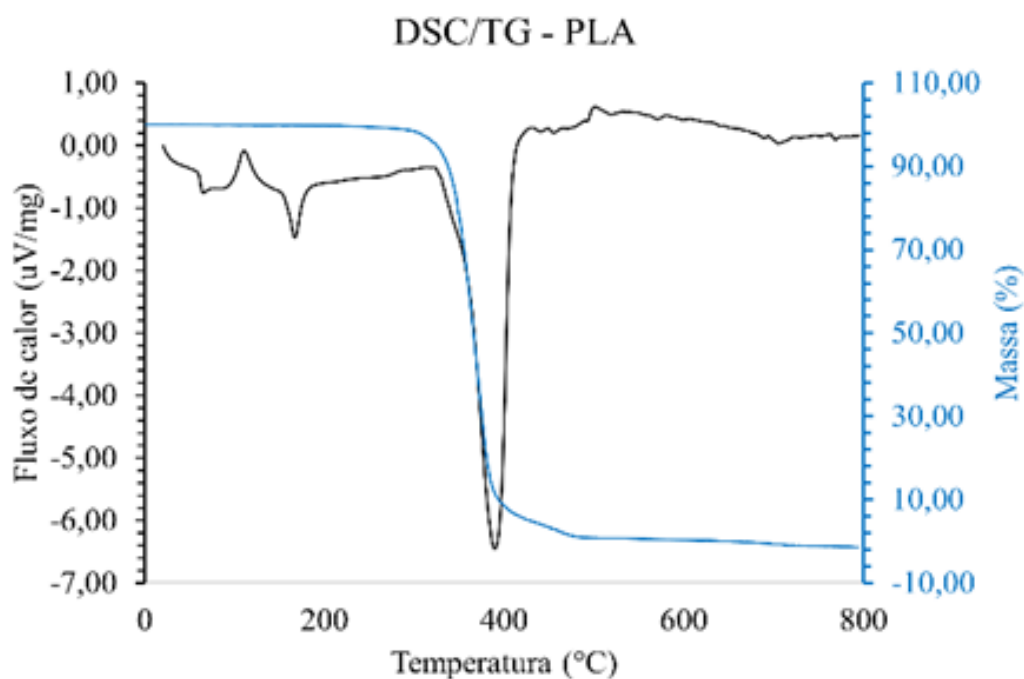
As peças produzidas tanto em PLA como em ABS foram avaliadas principalmente no que tange a reprodutibilidade das características micro/macroestruturais das esponjas comerciais no qual seu design foi baseado e dos suportes obtidos por FDM. Todos os suportes produzidos foram caracterizados fisicamente, para estudo do tamanho e distribuição de poros, além de conectividade e comparação com as esponjas comerciais.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO PLA

A Figura 6 mostra o resultado obtido a partir do ensaio de DSC/TG para o PLA; as Tabelas 3 e 4 apresentam uma síntese desses resultados. A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4 foi possível determinar o valor de temperatura de trabalho para o filamento de PLA na impressora, garantido que as peças produzidas na impressora apresentaram uma boa qualidade e garantindo que o polímero não iria se degradar durante a impressão.

Figura 6 – Ensaio de DSC/TG do PLA



Fonte: Autor (2025).

A transição vítrea (em torno de 60°C) se apresenta como o primeiro evento térmico presente na curva DSC. Os demais valores obtidos também são tipicamente encontrados em amostras de PLA como pode ser comparado no trabalho (Araújo; Silva; Oliveira, 2014).

No que se refere ao resultado de TG, o PLA apresenta apenas um estágio de decomposição, que culmina com a liberação de produtos gasosos tais como oligômeros cíclicos, acetaldeído, lactides, monóxido e dióxido de carbono. Com esta liberação, o PLA se decompõe totalmente não exibindo nenhum resíduo em massa, o que indica que o polímero é puro.

Tabela 3 – Dados de temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_m), temperatura de cristalização a frio (T_{cc}), entalpias de fusão e cristalização (H_f e H_c) e grau de cristalinidade obtidos pela análise de DSC para o PLA.

Amostra	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	H_c (J/g)	H_f (J/g)	X_c (%)
PLA	60,11	116,00	150,06	24,47	26,67	2,37

Fonte: Autor (2025).

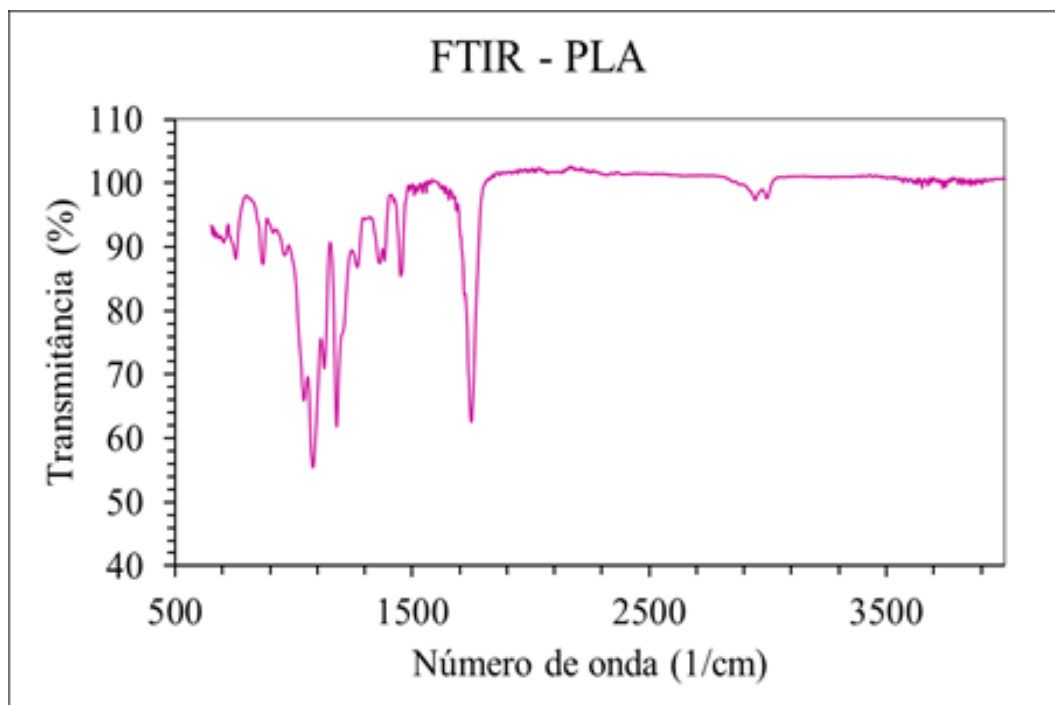
Tabela 4 – Temperatura de início e fim de decomposição (T_{onset} e T_{endset}), Temperatura de pico de decomposição (T_{pico}) e resíduo para o PLA.

Amostra	T_{onset} (C)	T_{pico} (C)	T_{endset} (C)	Resíduo (% massa)
PLA	344,07	370,69	383,50	0

Fonte: Autor (2025).

A Figura 7 mostra os resultados obtidos a partir do ensaio de FTIR para o PLA; a Tabela 5 ilustra os grupos químicos prováveis presentes no PLA, obtida a partir do ensaio, que corrobora a ausência de contaminantes no polímero.

Figura 7 – Análise de FTIR para o PLA



Fonte: Autor (2025).

Tabela 5 – Grupos químicos prováveis presentes no PLA.

Número de onda (cm ⁻¹)	Grupos químicos prováveis
622	C-C alicíclico (alongamento)
684	C-C alicíclico (alongamento)
747	C-C alicíclico (alongamento)
868	O-O alongamento
948	C-O-C alongamento simétrico
1038	C-C alicíclico (alongamento)
1077	C-O-C alongamento assimétrico
1124	C-O-C alongamento simétrico / C-C alicíclico (alongamento)
1178	C-C alicíclico (alongamento)
1262	C-C alicíclico (alongamento)
1375	CH ₃ dobramento
1446	CH ₂ dobramento
1741	C=O / C=C alongamento
2935	C-H alongamento
2991	C-H alongamento

Fonte: Adaptado de Young e Lovell (2011) e Campbell, Pethrick e White (2000).

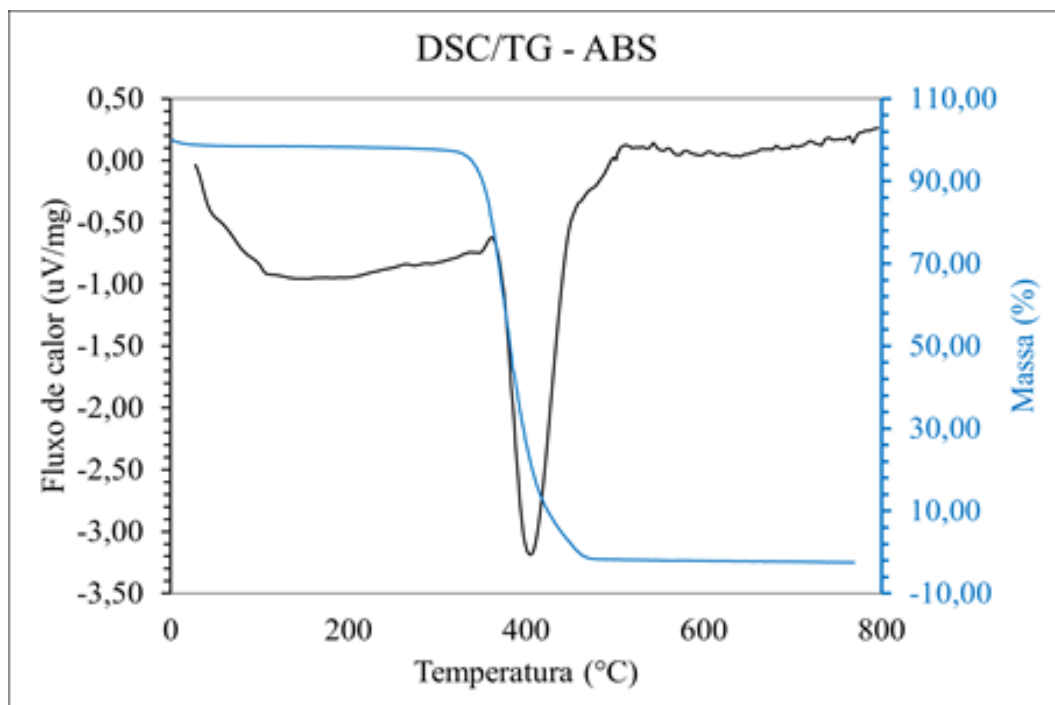
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO ABS

A Figura 8 mostra o resultado obtido a partir do ensaio de DSC/TG para o ABS; a Tabela 6 e 7 apresenta uma síntese desses resultados.

Observa-se que não existem picos exotérmicos de cristalização o que está relacionado ao fato de o ABS não apresentar graus de cristalinidade, pois é um polímero amorfo. Observa-se também uma alteração no fluxo de calor de todas as amostras (abaixo de 110°C) a qual se refere à temperatura de transição vítrea.

Os valores descritos na Tabela 6 para o ABS puro estão de acordo com os valores encontrados na literatura no estudo de (Martins *et al.*, 2014).

Figura 8 – Ensaio de DSC/TG do ABS



Fonte: Autor (2025).

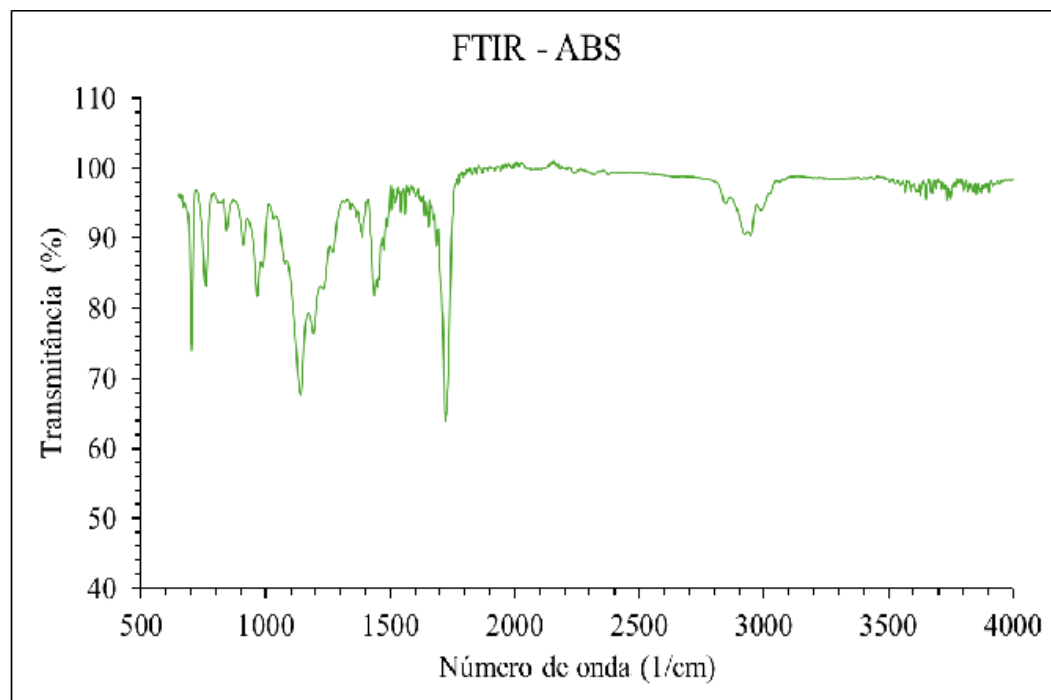
Tabela 6 – Temperatura de início e fim de decomposição (T_{onset} e T_{endset}), Temperatura de pico de decomposição (T_{pico}) e resíduo para o ABS.

Amostra	T_{onset} (°C)	T_{pico} (°C)	T_{endset} (°C)	Resíduo (% massa)
PLA	354,90	401,16	502,36	2,61

Fonte: Autor (2025).

A Figura 9 a seguir mostra os resultados obtidos a partir do ensaio de FTIR para o ABS.

Figura 9 – Análise de FTIR para o ABS



Fonte: Autor (2025).

Os espectros de FTIR obtidos por Bokria e Schlick (2002) definem os picos entre 3200 e 3000 cm^{-1} como sendo alongamentos C–H dos grupos aromáticos e entre 3000 e 2800 cm^{-1} como alongamentos C–H dos grupos alifáticos, similares ao encontrado em 3027 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} . O mesmo autor cita o pico na banda 2237 cm^{-1} como um alongamento CN, sendo este relacionado aos grupos nitrilo do ABS; na presente pesquisa também é visto um pico na mesma região. As bandas espectrais entre 1601 e 1493 cm^{-1} encontradas por esse são causadas pelas duplas ligações dos blocos de estireno, assim como acontece nesse estudo nas bandas de 1560 e 1496 cm^{-1} . O pico em 1450 cm^{-1} é semelhante aos picos 1453 cm^{-1} e 1454 cm^{-1} encontrados por Bokria e Schlick (2002) e Yousefi *et al.* (2011), respectivamente, que de acordo com os autores representa as duplas ligações dos blocos de butadieno.

De acordo Hirayama e Saron (2015) uma das maneiras de identificação do ABS é através dos grupos funcionais nitrilas do Poliacrilonitrila (PAN) que se destacam por apresentarem uma absorção de baixa intensidade entre as bandas 2260 e 2240 cm^{-1} , o que corrobora este estudo que apresentou espectro característico em 2238 cm^{-1} . O referido autor observou uma ligação do tipo C=C entre as bandas de 1600 e 1680 cm^{-1} , similar aos espectros 1636 e 1653 cm^{-1} encontrados neste estudo. Grupos fenila foram observados pelo mesmo autor na faixa de

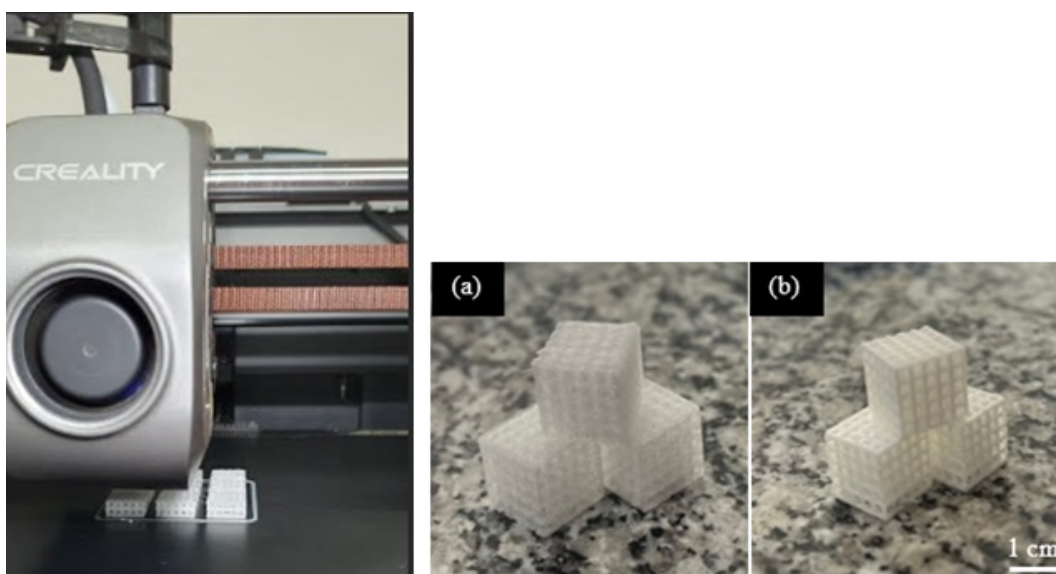
espectro entre 750 e 690 cm^{-1} , similar as bandas em 756 e 699 cm^{-1} encontradas na presente pesquisa.

De acordo com Misra, Mohanty e Vadori, (2016) os extensores de cadeias apresentam picos em 907 e 842 cm^{-1} , os quais representam as vibrações de deformação do anel dos grupos epóxido. Os resultados obtidos indicam picos aproximados aos encontrados pelo autor, com picos em 909 e 846 cm^{-1} .

6.3 IMPRESSÃO DE PEÇAS POROSAS

Concluída a caracterização do PLA e do ABS, procedeu-se à impressão das peças poliméricas porosas. A etapa inicial consistiu na fabricação de cubos com dimensões de 1 cm sem arestas como pode ser visto no modelo da figura 5. No entanto, o processo apresentou desafios relacionados às dimensões reduzidas das peças e à sua sustentação estrutural durante a impressão. Para contornar esses problemas, optou-se por um modelo 3D com arestas Figura 10, que demonstrou maior estabilidade durante a fabricação.

Figura 10 – Peças obtidas por impressão 3D



Fonte: Autor (2025).

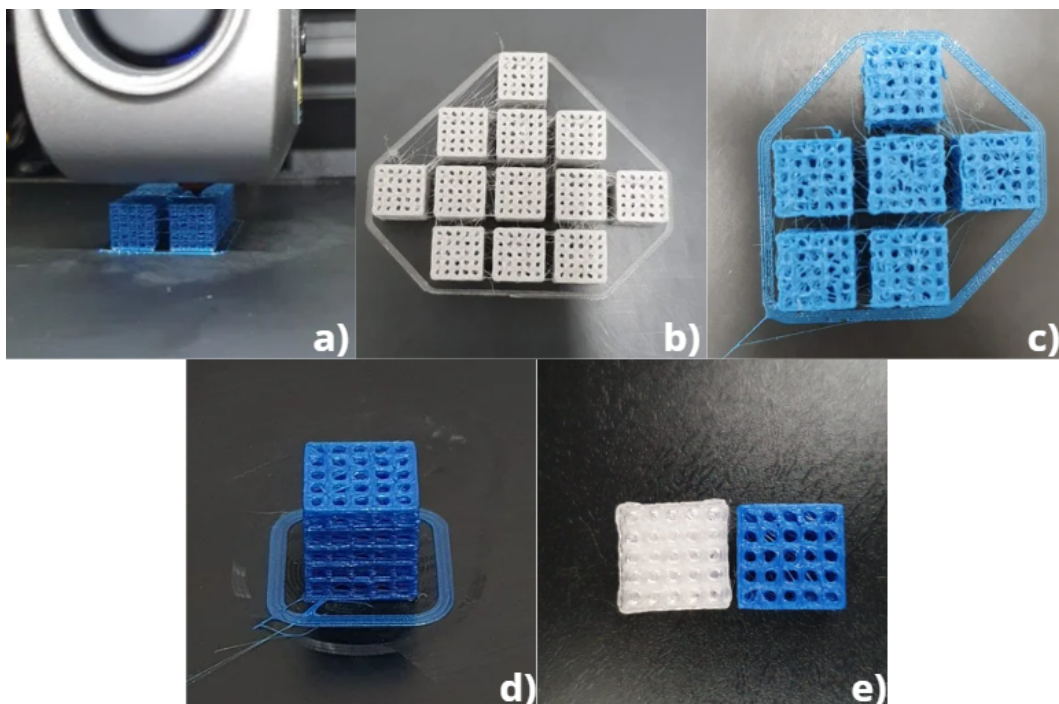
Legenda: (a) Peças de PLA
(b) Peças ABS

A Figura 11 ilustra o processo de impressão e as características da peça final. Durante o processo, surgiram dificuldades operacionais, como o entupimento do bico de impressão e da extrusora, exigindo a desmontagem das peças para limpeza e posterior retomada da impressão.

Outro problema identificado foi a definição incorreta dos parâmetros de impressão, conforme observado na Figura 11(c). Nesse caso, a velocidade e a temperatura inadequadas geraram peças com poros malformados e excesso de rebarbas. Já nas Figuras 11(b) e 11(d), é possível observar peças de PLA e ABS impressas após o ajuste dos parâmetros (redução de temperatura e velocidade), resultando em poros mais definidos. No entanto, a técnica escolhida possui limitações, como a resolução em relação ao tamanho da peça; assim, mesmo com a melhoria na qualidade, os poros ainda podem apresentar imperfeições geométricas.

Por fim, a Figura 11(e) compara peças de PLA e ABS lado a lado, evidenciando que ambas apresentam poros com boa definição e características similares. Isso demonstra que a técnica FDM possibilita boa reprodutibilidade do modelo, independentemente do material utilizado.

Figura 11 – Peças de PLA e ABS cúbica.



Fonte: Autor (2025).

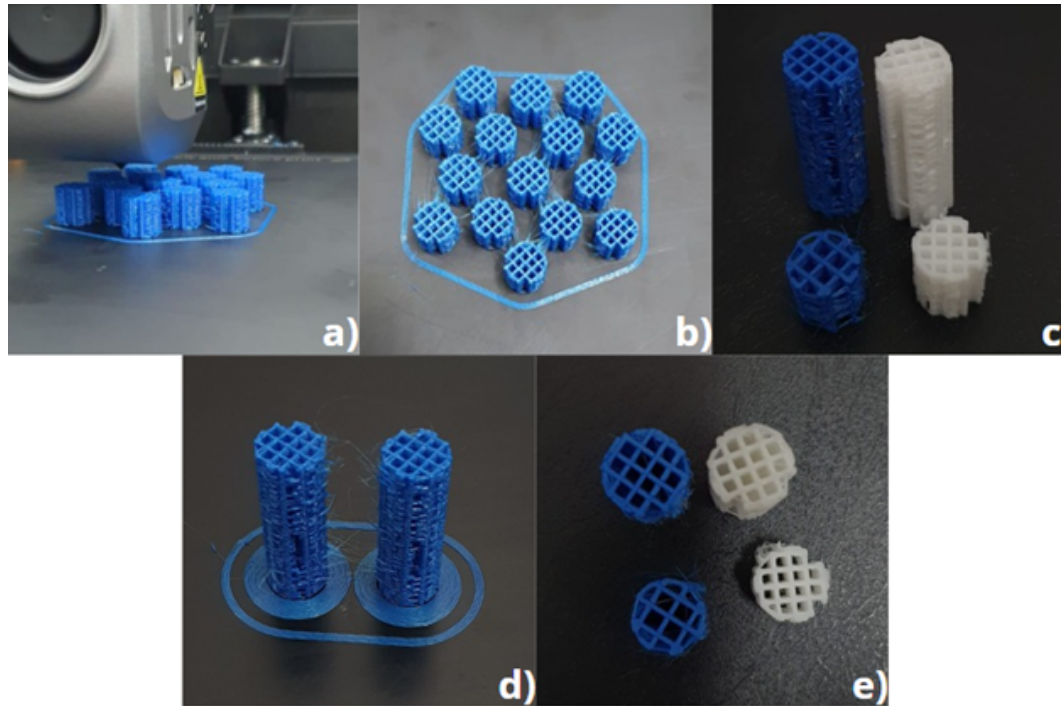
Legenda: (a) Peças de PLA cúbica, sendo impressa;
 (b) Peças de ABS obtidas por FDM;
 (c) Peças de PLA com defeito;
 (d) Peças PLA cúbica;
 (e) Peças PLA e ABS.

Também foram produzidas peças cilíndricas para que fossem utilizadas como recheio de um reator PBR (Packed Bed Reactor). As peças produzidas apresentavam 1cm de diâmetro e variavam em altura e porosidade (definida no momento de construção do modelo), os modelos de peças cilíndricas estão definidos a seguir:

- Modelo 1: 1 cm de altura e 61% de porosidade.
- Modelo 2: 3 cm de altura e 61% de porosidade.
- Modelo 3: 1 cm de altura e 71% de porosidade.

A Figura 12 mostra a produção das peças porosas cilíndricas. As Figuras 12(a) e 12(b) ilustram, respectivamente, as peças durante e após a impressão. Já nas Figuras 12(c) e 12(e), é possível visualizar todos os modelos de peças cilíndricas impressas: na vista superior é possível ver a diferença de porosidade das peças, e na vista frontal, a diferença de altura. Durante a produção das peças cilíndricas mais altas, observou-se o descolamento da peça, ocasionado pela pequena área da base em contato com a mesa de impressão em relação à altura total. Para solucionar o problema, adotaram-se duas estratégias. A primeira consistiu no aumento da superfície de apoio da base através da técnica de brim (borda de adesão), conforme ilustrado na Figura 12(d). A segunda estratégia envolveu a aplicação de cola de PVC na mesa de impressão para promover a aderência e fixação da peça

Figura 12 – Peças de PLA e ABS cilíndrica.



Fonte: Autor (2025).

Legenda: (a) Peças de PLA cilíndrica, sendo impressa;
 (b) Peças de PLA obtidas por FDM;
 (c) Peças de PLA com defeito;
 (d) Peças PLA cúbica;
 (e) Peças PLA e ABS.

Nas peças cilíndricas produzidas é possível observar uma boa definição dos poros, e tbm a boa reprodutibilidade das peças e as mesmas se mostraram boa para a imobilização de bio massa como é possível ver no trabalho Evaluation of the reuse of biocatalysts obtained from the immobilization of fungal cells on 3D supports (Leite, 2025).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A impressão 3D tem se consolidado como uma técnica inovadora na conformação de materiais, motivo pelo qual é cada vez mais utilizada em diversos setores da indústria, incluindo as áreas biológica e alimentícia. Devido à sua flexibilidade e precisão, esta tecnologia foi escolhida para a produção de suportes poliméricos porosos para imobilização enzimática.

Os resultados obtidos demonstraram que a manufatura aditiva via FDM é uma tecnologia viável para a fabricação de suportes de matriz polimérica com diferentes geometrias e porosidades. Verificou-se que foi possível a produção de peças cúbicas e cilíndricas com elevada porosidade e alta superfície específica, apesar dos desafios de impressão devido às suas dimensões reduzidas.

Dessa forma, foi possível verificar por meio dos resultados que a construção dos suportes por impressão 3D é uma estratégia eficaz para a otimização da superfície específica, o que potencializa a eficiência do processo de imobilização enzimática. A capacidade de controlar as características do suporte surge como um caminho para melhorar o desempenho e a estabilidade da enzima em condições operacionais.

Como principal limitação, o estudo enfrentou dificuldades técnicas na impressão de estruturas muito pequenas, o que exigiu a seleção de modelos com arestas bem definidas para garantir a integridade estrutural durante a fabricação.

Como desdobramento natural desta pesquisa, recomenda-se a realização de ensaios de imobilização da enzima FTase nos suportes produzidos para validar experimentalmente sua eficácia. Adicionalmente, o trabalho terá continuidade em um novo projeto de iniciação científica, que explorará o desenvolvimento de compósitos de polímero-cerâmica, buscando aprimorar ainda mais as propriedades mecânicas e a biocompatibilidade dos suportes. A longo prazo, a otimização destes materiais poderá contribuir para processos biotecnológicos mais eficientes e de menor custo.

REFERÊNCIAS

ALGARNI, M.; GHAZALI, S. Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. **Crystals**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. 995, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst11080995>. Acesso em: 08/12/2025.

BOKRIA, J. G.; SCHLICK, S. Spatial effects in the photodegradation of poly(acrylonitrile-butadiene-styrene): a study by ATR-FTIR. **Polymer**, v. 43, n. 11, p. 3239-3246, 2002. DOI: 10.1016/S0032-3861(02)00155-2.

CAMPBELL, D.; PETHRICK, R. A.; WHITE, J. R. **Polymer Characterization: Physical Techniques**. 2. ed. Cheltenham: Nelson Thornes, 2000.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Artliber, 2006.

DIAS, G. S. *et al.* Frutooligossacarídeos: uma revisão abrangente sobre sua origem microbiana, benefícios funcionais, tecnologia de produção e perspectivas de mercado. **Processes**, Basel, v. 13, n. 4, 1252, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr13041252>. Acesso em: 08 dez. 2025.

FANIS, J. B. **Compósitos cerâmica-polímero obtidos por impressão 3D aplicados na imobilização do fungo *Aspergillus oryzae* IPT-301 para a produção de frutooligossacarídeos**. 2025. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

FERNANDEZ, R. C. *et al.* Triagem de microrganismos produtores de β -frutofuranosidase e efeito do pH e da temperatura na taxa enzimática. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [S. l.], v. 75, p. 87–93, maio 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0803-x>. Acesso em: 09 dez. 2025.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent; KHORASANI, Mahyar. **Additive Manufacturing Technologies**. 3. ed. Cham: Springer, 2021.

GONÇALVES, M. C. P. **Imobilização de frutossiltransferase microbiana em gel de alginato e sua caracterização para a produção de frutooligossacarídeos**. 2019. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas - MG, 2019. Disponível em: <https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/1503>. Acesso em: 8 out. 2024.

HIRAYAMA, D.; SARON, C. Estratégias de reciclagem do poli(tereftalato de etileno) - PET. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 10, n. 1, p. 26-34, 2015.

HUANG, J.; QIN, Q.; WANG, J. A Review of stereolithography: processes and systems. **Processes**, v. 8, n. 9, e1138, 2020. DOI: 10.3390/pr8091138.

LEITE, Paula C. *et al.* Evaluation of the reuse of biocatalysts obtained from the immobilization of fungal cells on 3D supports. In: BRAZILIAN POLYMER CONFERENCE, 18., 2025, Campos do Jordão. **Anais [...]**. Campos do Jordão, SP: [s. n.], 2025.

LIU, D. *et al.* Immobilization of Biomass Materials for Removal of Refractory Organic Pollutants from Wastewater. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 19, n. 21, 13830, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph192113830>. Acesso em: 08 dez. 2025.

MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; ARAÚJO, C. da S. Fruto-oligossacarídeos: aspectos nutricionais, tecnológicos e sensoriais. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 23, e2019080, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.08019>. Acesso em: 08 dez. 2025.

MANIA, S. *et al.* The production possibility of the antimicrobial filaments by co-extrusion of the PLA pellet with chitosan powder for FDM 3D printing technology. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1893, nov. 2019. DOI: 10.3390/polym11111893.

MARTINS, Priscila Alves; VALERA, Ticiane Sanches; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Estudo de sistemas retardantes de chama sem bromo para ABS. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 5, p. 572-578, set./out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1422>. Acesso em: 13 dez. 2025.

NATARELLI, C. V. L. *et al.* Introdução aos materiais poliméricos. In: VISCONTE, Leila Lea Yuan; ASSIS, Cristiane Maria de; FARIA, Elen Bezerril de (org.). **Nanocompósitos de borracha: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. cap. 2, p. 21-58.

OLIVERA, S. *et al.* Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. **Journal of Materials Science**, New York, v. 51, p. 3657-3674, 2016.

PASSOS, L. M. L.; PARK, Y. K. Frutooligossacarídeos: implicações na saúde humana e utilização em alimentos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 385-390, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000200034>. Acesso em: 7 out. 2024.

PINTO, F. V. **Reciclagem de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) proveniente de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. 2012. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PIRAMIDAL. **Resinas Termoplásticas: Catálogo de Produtos**. São Paulo, 2016.

RAJESH, K. *et al.* Development of PLA/chitosan/turmeric antimicrobial composite filament for FDM-based 3D printing. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 8, p. 697-708, 2023. DOI: 10.1007/s40964-022-00361-9.

ROCHA, R. J. *et al.* Imobilização de frutossiltransferase microbiana em bagaço de cana e sabugo de milho para a produção de frutooligossacarídeos. In: Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química, 1, 2021, Diamantina (MG). **Anais eletrônicos [...]** Diamantina, 2021, online. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/wendeq2021/345335-imobilizacao-de-frutossiltransferase-microbiana-em-bagaco-de-cana-e-sabugo-de-milho-para-a-producao-de-frutooligos>. Acesso em: 8 out. 2024.

RODA. **Aditivos e Compostos Termoplásticos: Catálogo de Produtos**. São Paulo, 2014.

SANTANA, L. *et al.* Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 04, e-12267, 2018.

SANTOS, E. D. **Imobilização de células de *Aspergillus oryzae* IPT-301 em suportes inorgânicos e sua aplicação como biocatalisadores para a produção de fruto-oligossacarídeos**. 2024. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.

SEPAHI, A. *et al.* A review on the applications of chitosan-based biomaterials in 3D printing for bone tissue engineering. **Carbohydrate Polymers**, v. 273, p. 118599, 1 dez. 2021. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118599.

VADORI, R.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Mechanical, thermal, and morphological properties of recycled high-density polyethylene, polylactic acid, and their blends. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 45, p. 44109, 2016. DOI: 10.1002/app.44109.

VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017

YEHIA, H. M. *et al.* Selective laser sintering of polymers: process parameters, machine learning approaches, and future directions. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, Basel, v. 8, n. 5, art. 197, Sept. 2024.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. A. **Introduction to Polymers**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

YOUSEFI, A. M. *et al.* Graphene based polymer composites. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 11, p. 3800-3806, jun. 2011. DOI: 10.1007/s10853-011-5326-y.