

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL EUGÊNIO DA SILVA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPOLÍMERO À BASE DE AMIDO DE
MANDIOCA E RECICLAGEM DE PAPEL**

PATO BRANCO

2023

GABRIEL EUGÊNIO DA SILVA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPOLÍMERO À BASE DE AMIDO DE
MANDIOCA E RECICLAGEM DE PAPEL**

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BIODEGRADABLE POLYMERIC
MATERIAL FROM CASSAVA STARCH AND PAPER RECYCLING**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^a Dr^a Raquel Dalla Costa da Rocha.

PATO BRANCO

2023



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



TERMO DE APROVAÇÃO

Desenvolvimento sustentável: Produção e caracterização de biopolímero à base de amido de mandioca e reciclagem de papel

por

Gabriel Eugênio da Silva

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado(a) em 28 de Novembro de 2023 às 13h50, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Química. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Dr.^a Raquel Dalla Costa da Rocha
Prof.^a Orientadora

Dr.^o Davi Costa Silva
Membro titular

Dr.^o Rodrigo Brackmann
Membro titular

Nota: O Documento original e assinado pela Banca Examinadora encontra-se no SEI processo 23064.057201/2023-34 e documento 3872651.

Dedico este trabalho à minha família, aos amigos que formei na universidade e também aos amigos que consegui ao longo dessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos à minha família, que me deu todo apoio nesse período que estive distante, e em muitos momentos solicitaram minha presença, mas compreenderam os motivos e os sacrifícios que esse sonho necessitava.

A família que eu conquistei em Pato Branco, especialmente a Dona Rosa, que me deu grande ajuda desde o momento que vim para a cidade sem conhecer ninguém. Estendo também a seus parentes, que me acolheram como um membro interino da família.

Aos amigos que obtive ao longo desse período, como o Solano, que é um irmão pra mim e que esteve comigo em muitos momentos importantes. E a todos os outros com quem eu tive o prazer de cruzar o caminho que, sem dúvidas, trouxeram um pouco de si para a minha evolução pessoal.

Gostaria de agradecer grandemente a minha Orientadora Prof.^a Dr.^a Raquel Dalla Costa da Rocha, que abraçou o tema do trabalho instantaneamente, não medindo esforços para me auxiliar em todo o desenvolvimento do trabalho. Muito obrigado por suas orientações e conselhos, mas principalmente pela paciência que teve comigo. Obrigado também ao professor Edilson que me trouxe ensinamentos valiosos.

Ao técnico de laboratório Everton, que sempre esteve disposto a me ajudar com equipamentos e materiais quando preciso.

À Central de Análises da UTFPR campus Pato Branco, por executar as análises desse projeto e principalmente a técnica do laboratório Bruna, que sempre se prontificou a ajudar.

Obrigado também a todos os professores da UTFPR, pela inspiração e conhecimentos compartilhados ao longo desta jornada acadêmica.

Por fim, expresso minha gratidão e meu muito obrigado a todos que fizeram parte desta trajetória da minha vida.

RESUMO

Este estudo investigou a utilização de materiais renováveis, como amido e resíduos de papel, na produção de biopolímeros, visando alternativas sustentáveis aos polímeros derivados de petróleo em resposta à crescente preocupação com a poluição causada por plásticos convencionais. Os compostos termoplásticos de amido foram destacados por suas propriedades específicas, representando uma alternativa biodegradável que pode reduzir custos e minimizar impactos ambientais a longo prazo. O trabalho abordou aspectos dos biopolímeros, enfatizando o papel central do amido e explorando sua combinação promissora com a celulose. Apesar de ainda não alcançarem a eficácia total dos plásticos convencionais, os biopolímeros oferecem uma perspectiva única e inspirada para inovações futuras. O processo de caracterização do biopolímero compreende análises físico-químicas e térmicas, através de ensaios como Análise Termogravimétrica (TGA), Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Princípio de Arquímedes e Teste de Degradação. Apesar da identificação de uma distribuição não uniforme do material, a TGA destacou as faixas de degradação do amido e da maioria dos compostos orgânicos. Por sua vez, o FTIR trouxe à tona características específicas relacionadas à presença de amido, celulose e glicerina. O teste de biodegradabilidade, prolongado por meio do enterro das amostras no solo, confirmou a capacidade da degradação do biopolímero ao longo de um período de 40 dias, evidenciando sua resposta ao ambiente. Conclui-se que a metodologia proposta apresentou resultados promissores sobre as propriedades do material, indicando um produto inovador com potencial para diversas aplicações e uma demanda crescente em aplicações ecologicamente corretas.

Palavras-chave: Biopolímeros; Compósitos de Amido; Celulose e Caracterização

ABSTRACT

This study investigated the use of renewable materials, such as starch and paper waste, in the production of biopolymers, aiming for sustainable alternatives to petroleum-derived polymers in response to growing concerns about pollution caused by conventional plastics. Thermoplastic starch compounds have been highlighted for their specific properties, representing a biodegradable alternative that can reduce costs and minimize long-term environmental impacts. The work addressed aspects of biopolymers, emphasizing the central role of starch and exploring its promising combination with cellulose. Although they do not yet reach the full effectiveness of conventional plastics, biopolymers offer a unique and inspired perspective for future innovations. The biopolymer characterization process comprises physical-chemical and thermal analyses, through tests such as Thermogravimetric Analysis (TGA), Fourier Transform Infrared (FTIR), Archimedes Principle and Degradation Test. Despite identifying a non-uniform distribution of the material, the TGA highlighted the degradation ranges of starch and most organic compounds. In turn, FTIR brought to light specific characteristics related to the presence of starch, cellulose and glycerin. The biodegradability test, prolonged by burying the samples in the soil, confirmed the biopolymer's ability to degrade over a period of 40 days, demonstrating its response to the environment. It is concluded that the proposed methodology presented promising results on the properties of the material, indicating an innovative product with potential for diverse applications and a growing demand for environmentally friendly applications.

Keywords: Biopolymers; Starch Composites; Cellulose and Characterization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Geral.....	10
2.2 Específicos.....	10
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
3.1 Polímeros	11
3.2 Biopolímeros.....	12
3.3 Polímeros Biodegradáveis	14
3.4 Amido	16
3.5 Papel.....	18
3.6 Celulose	18
3.7 Aplicações de celulose como compósito em diferentes biopolímeros de amido	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 Delineamento experimental.....	21
4.2 Preparo do bioplímero	22
4.3 Caracterização da Amostra.....	23
4.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA)	23
4.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR).....	24
4.3.3 Teste de Arquimedes	24
4.3.4 Teste de Degradação	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 Avaliação do planejamento estatístico	26
5.2 Análise de processamento do Bioplímero.....	27
5.3 Caracterização dos compostos	27
5.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA)	27
5.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR).....	29
5.3.3 Teste de Arquimedes	31
5.3.4 Teste de Biodegradação.....	41
6 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	47
APÊNDICE	51

1 INTRODUÇÃO

O plástico se tornou uma evidente maneira de aperfeiçoar a sustentabilidade da vida humana na Terra por meio de seus benefícios, embora ao longo dos anos o impacto negativo que ele pode causar começou a ser compreendido. A maior parte dos produtos plásticos são compostos de polímeros de origem fóssil e sua produção global é cerca de 350 milhões de toneladas por ano (WALKER; ROTHMAN, 2020).

Segundo Karan et al (2019), a demanda crescente por plásticos e o fato de que alguns tipos demoram por estimativa mais de 100 anos para sofrer total degradação, destacam a importância de reduzir o uso de plástico, ou substituir os plásticos não degradáveis por bioplásticos degradáveis produzidos de forma sustentável. Ressaltam ainda, que plásticos de base biológica, como uma forma de expansão de uma bioeconomia circular, torna possível projetos de materiais que sejam totalmente biodegradáveis, ou seja, convertidos em CO₂ em poucos meses ou anos.

De acordo com Brito et al (2011), pesquisadores e as indústrias vêm juntando esforços para o desenvolvimento de biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes como alternativa para os produtos fabricados com plásticos. Atualmente no mercado, já existem alguns biopolímeros com grande potencial, para determinadas aplicações, dentre eles estão o amido, a celulose, o poli(ácido láctico) PLA, o polihidroxibutirato PHB, entre outros. Porém são identificadas algumas limitações técnicas que dificultam a processabilidade desses materiais e também seu uso como produto final. Para isso são estudados blendas, compósitos e nanocompósitos com o intuito de melhorar suas propriedades, como processabilidade, resistência térmica e taxa de degradação.

No Brasil a diversidade de matérias-primas de fontes renováveis, unido ao clima favorável, e ao alto nível de produção de plantas e raízes, abre uma gama enorme para a produção de materiais biodegradáveis, que acaba se tornando uma alternativa viável e atraente para substituição dos polímeros sintéticos tradicionais.

Desta maneira, o presente trabalho tem a intenção de trazer uma opção de material que possa ser biodegradável, tendo, como matéria-prima, amido de mandioca, que possui um custo relativamente baixo, e papel pós-consumo, como uma maneira de reutilizar um material que seria descartado, afim de diminuir a geração de resíduos sólidos presentes no meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo desse trabalho é produzir e caracterizar um material polimérico biodegradável à base de fontes renováveis e abundantes como o amido de mandioca e papel pós consumo, analisando suas propriedades e possíveis aplicações a fim de obter um material de baixo custo com possibilidade de substituir os presentes materiais de origem fóssil.

2.2 Específicos

- Sintetizar um material polimérico à base de amido, celulose e glicerol.
- Investigar a influência da combinação do amido e celulose na formação do biopolímero.
- Avaliar as propriedades físico-químicas do biopolímero, utilizando técnicas como análise termogravimétrica (TGA) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), além de densidade e porosidade aparente por meio do princípio de Arquimedes.
- Realizar testes de biodegradabilidade em solo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Polímeros

Os polímeros são substâncias compostas por moléculas de cadeias longas e elevada massa molecular. Sua estrutura compreende a repetição de moléculas menores chamadas de monômeros. Seu nome vem do grego “*polis*” que significa muitos e “*meros*” que significa partes, introduzida em meados de 1830 por Jöns Jacob Berzelius. Um monômero é uma molécula que pode sofrer polimerização, que adiciona unidades estruturais à estrutura básica de uma macromolécula, que é o processo de transformação de um monômero ou uma mistura de monômeros em um polímero (MANO, 2004).

O caráter físico e químico dessas macromoléculas é estabelecido por sua estrutura química, interações inter e intramoleculares e seu tamanho. Suas unidades químicas interagem por ligações covalentes, repetidas e de forma regular ao longo da cadeia, através dos chamados meros e o número de meros da cadeia polimérica é denominado de grau de polimerização, desta forma, todos os polímeros são macromoléculas, mas nem todas as macromoléculas são necessariamente polímeros (MANO, 2004).

Os polímeros se dividem em duas categorias principais: sintéticos e naturais (biopolímeros). Os polímeros sintéticos, como polipropileno (PP), poli (tereftalato de etileno) (PET) e polietileno (PE), são geralmente derivados do petróleo. Já os polímeros naturais são compostos produzidos a partir de organismos vivos presentes na natureza. Exemplos de polímeros naturais compreendem o amido, a celulose, a quitina, a borracha natural, entre outros. Além disso, os polímeros podem ser classificados como termofixos, termoplásticos e elastômeros. Tanto os termofixos quanto os termoplásticos são sólidos à temperatura ambiente, mas os termoplásticos têm a capacidade de serem moldados de maneira reversível quando aquecidos. Os termorrígidos, por outro lado, possuem ligações químicas primárias entre as cadeias formadas por um processo irreversível chamado de cura ou reticulação, que formam ligações cruzadas em sua estrutura. Os elastômeros, por sua vez, são materiais que podem ser deformados e retornam à sua forma original elasticamente (CALLISTER, 2012).

Após Hermann Staundinger postular a existência de polímeros em 1920, houve uma grande mudança no mundo dos materiais. “Plástico” tornou-se um termo universal para os mais variados polímeros existentes, com diferentes propriedades, inúmeros métodos de fabricação, matérias-primas e uma gama de composições químicas possíveis. Cerca de 8,3

bilhões de toneladas de plástico foram produzidas desde 1950, além da inserção dessa classe de materiais no cotidiano das pessoas e sua utilidade dificilmente incontestável (WALKER; ROTHMAN, 2020).

Quase todos os plásticos fabricados que se encontram em circulação são polímeros de origem fóssil, o que significa que os materiais, em sua maioria, são derivados de fontes de petróleo. Com o passar dos anos, esses resíduos foram responsáveis por gerar danos ambientais e ecológicos que começaram a ter significativa relevância. Como uma alternativa de resolver as preocupações advindas de produtos que utilizam recursos não renováveis, muitos estudos recentes vêm sendo desenvolvidos para substituir a matéria-prima fóssil dos polímeros por produtos de origem biológica. Esses materiais surgiram como uma maneira ecologicamente correta de substituição dos polímeros tradicionais, embora sua produção não seja um processo trivial (WALKER; ROTHMAN, 2020).

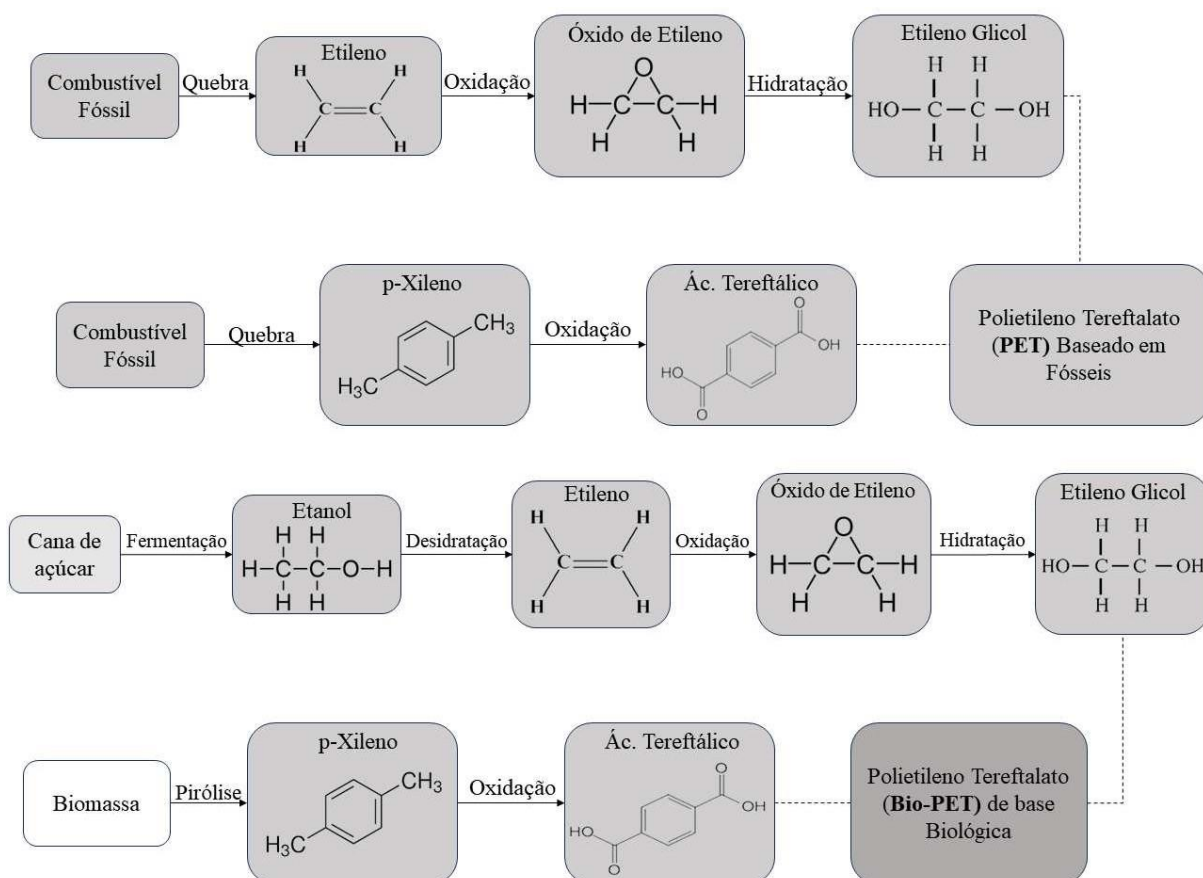
3.2 Biopolímeros

Os polímeros de base biológica são chamados de biopolímeros, polímeros verdes, ou biodegradáveis. Alguns desses polímeros são quimicamente idênticos aos de origem fóssil e são conhecidos como *'drop-ins'*, enquanto os demais são totalmente diferentes. Dentre os biopolímeros mais comuns conhecidos comercialmente estão o ácido polilático (PLA), que surge como opção ao poliestireno e ao poliestireno expandido, o polibutileno succinato de base biológica (Bio-PBS), que tem características muito parecidas ao polipropileno, e o substituto direto do PET de origem fóssil, que é o tereftalato de polietileno de base biológica (Bio-PET) (WALKER; ROTHMAN, 2020).

Além das diversas substâncias responsáveis pela fabricação de polímeros, o etileno é um dos precursores de uma gama de produtos químicos, como cloreto de vinila que leva à produção de PVC, etilbenzeno, óxido de etileno, PET ou até mesmo etanol. Embora sua obtenção convencional seja através do craqueamento químico derivado de combustíveis fósseis, este processo pode ser realizado por meio da fermentação da cana-de-açúcar. O Bio-PET, por exemplo, pode ser feito pela oxidação do p-xileno da biomassa lignocelulósica da cana para produzir ácido tereftálico e obtenção do etilenoglicol da desidratação do etanol, como mostra a Figura 1, processo que pode ser realizado em grande escala e sem barreiras tecnológicas (BELBOOM; LÉONARD, 2015).

Para fabricar uma determinada quantidade de polímero de base biológica foi criada em uma escala de tempo muito mais curta. Isso significa que os polímeros de base biológica podem ser considerados como tendo uma emissão de carbono de matéria-prima mais baixas do que as alternativas baseadas em fósseis (WALKER; ROTHMAN, 2020).

Figura 1. Exemplos de etapas do processo de fabricação de PET de base fóssil (em cima) e de base biológica (em baixo)



Fonte: Adaptado de Walker, Rothman, (2020, p. 03)

Existe uma preocupação em substituir e usar materiais ecologicamente corretos. Exercer o consumo consciente como reduzir, reutilizar e reciclar é uma saída para ações mais sustentáveis, mas quando não for possível, a substituição por materiais biodegradáveis pode ser uma solução.

3.3 Polímeros Biodegradáveis

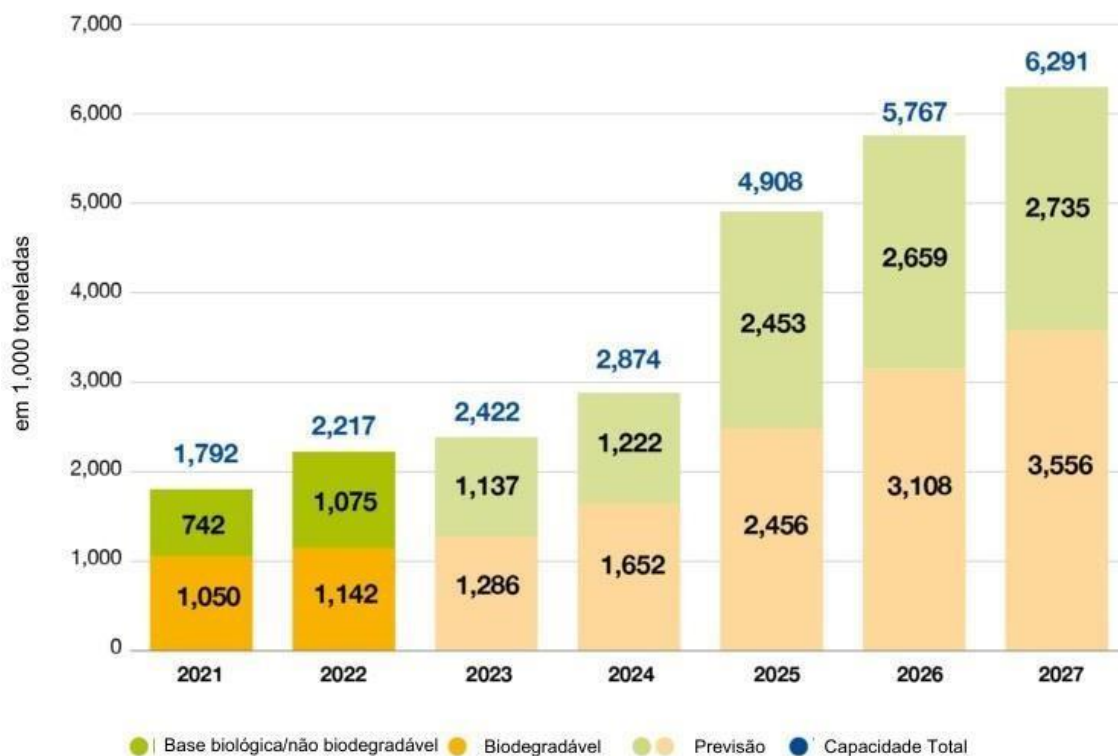
Os polímeros biodegradáveis adquiriram particular importância em diversas aplicações. Nos últimos anos, a pesquisa sobre esses polímeros estão emergindo como uma área frutífera que abre novas oportunidades para um desenvolvimento sustentável e seguro. Desta maneira, obter uma variedade de biopolímeros com amplas propriedades físico-químicas e funcionalidades pode vir a fazer mudanças ambientalmente positivas (CHILOECHES et al., 2022).

De acordo com o "*American Standard for Testing and Methods*" (ASTM-D-833), polímeros biodegradáveis são materiais que podem sofrer um processo de modificação física ou química por microrganismos como bactérias, fungos, algas, entre outros. Através de enzimas excretadas por esses microrganismos, as propriedades físicas e químicas desses materiais sofrem alteração e fragmentam as cadeias poliméricas por clivagem de ligações, sendo assim, os microrganismos assimilam essas moléculas menores, realizando a mineralização dos metabólitos produzindo CO₂, H₂O e biomassa (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

A substituição de plásticos produzidos a partir de fontes não renováveis por polímeros totalmente ou parcialmente biodegradáveis tem sido estudada em diversas aplicações como forma sustentável de gerenciamento de resíduos sólidos. De fato, tal qual demonstra a Figura 2, estima-se que a capacidade de produção de biopolímeros aumente de 1,80 milhão de toneladas em 2021 para 6,30 milhões de toneladas em 2027 (European Bioplastics, nova-Institute, 2022).

Figura 2. Capacidade de produção Global de Bioplástico.

Capacidades Globais de Produção de Bioplásticos



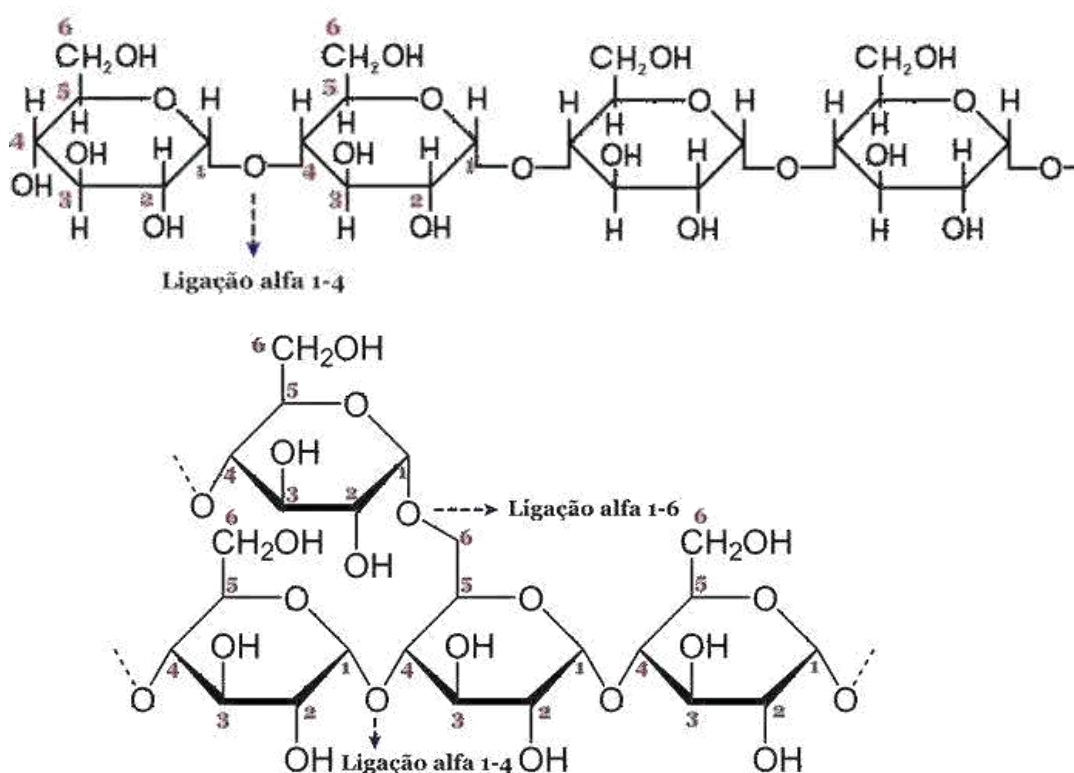
Fonte: Adaptado de European Bioplastics, nova-institute (2022).

Dentre os principais polímeros biodegradáveis, há os polímeros da classe dos naturais, em que se encontram o amido, celulose, quitina, proteína de soja, e os polímeros sintéticos, bem como o ácido polilático (PLA), e o polihidroxialcanoatos (PHAS), considerados os polímeros biodegradáveis derivados de recursos renováveis, enquanto o poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT), advindo de recursos fósseis também ganhou importância por ser biodegradável e por possuir excelentes propriedades como alta ductibilidade e baixo módulo de elasticidade (CHILOECHES et al., 2022).

3.4 Amido

Como um dos recursos renováveis mais abundantes, o amido é um polissacarídeo totalmente biodegradável e biosintetizado por diversas plantas. Pode ser encontrado em milho, batata, trigo, raízes de mandioca, etc. O amido possui, em sua composição, carbono, hidrogênio e oxigênio, pertence à classe de compostos orgânicos de carboidratos e é considerado um polímero natural com ligações glicosídicas entre as unidades de glicose, entre elas estão, a amilose linear e a amilopectina ramificada como demonstrado na Figura 3 (JIAN et al., 2020).

Figura 3. Estrutura da amilose e da amilopectina.



Fonte: Batista (2023).

A amilose é uma molécula de α -D-(1-4) glucano, enquanto a amilopectina é um α -D-(1-4) glucano altamente ramificado, com ligações α -D-(1-6) nos pontos de ramificação. De modo geral, o amido é composto por 20 a 25% de amilose e 75 a 80% de amilopectina, entretanto essa quantidade pode variar dependendo da origem dos vegetais, além de lipídeos e proteínas, que também estão presentes na molécula, porém em menores quantidades. O amido com cristalinidade entre 20 e 40% é denominado de semicristalino e sua região amorfa é formada por amilose e os pontos de ramificação da amilopectina (JIAN et al., 2020).

O amido nativo exibe uma baixa capacidade de processamento térmico, resultando em um elevado ponto de fusão e menor temperatura de decomposição térmica. Isso é atribuído às fortes ligações de hidrogênio e intermoleculares presentes nas cadeias das macromoléculas de amilose e amilopectina. No entanto, essa condição pode ser modificada por meio da conversão do amido nativo em amido termoplástico (TPS). Essa conversão geralmente ocorre pela inserção de plastificantes sob condições ideais de temperatura e cisalhamento. No entanto, essa adição requer certos requisitos, como a necessidade de possuir uma molécula semelhante às unidades de D-glucanas do amido, ter um ponto de ebulição suficientemente alto para evitar a evaporação do material durante o processamento e a secagem, e ser adicionado em quantidade mínima necessária. A água e o glicerol são considerados plastificantes altamente eficazes devido ao seu tamanho reduzido e facilidade de inserção (JIAN et al., 2020).

O amido é considerado um dos materiais sustentáveis mais promissores devido ao seu alto desempenho e excelente biodegradabilidade. A versatilidade das propriedades de embalagem e opções de processamento, favorece o desenvolvimento de biocompósitos à base de amido para diversas aplicações químicas como, aglutinantes, adsorventes, floculadores, retardadores de chama e emulsificantes, bem como a liberação controlada de medicamentos e curativos médicos. O Quadro 1 mostra exemplos de materiais que usam este biopolímero (WANG et al., 2023).

Quadro 1. Aplicações de biopolímeros à base de amido

Misturas	Aplicações
Amido/Plastificante	<ul style="list-style-type: none"> • Embalagem biodegradável • Material de filme à base de amido • Talheres descartáveis
Amido/PVA	<ul style="list-style-type: none"> • Sacos de lavanderias solúveis em água • Área biomédica e clínica • Substituição de poliestireno
Amido/PLA	<ul style="list-style-type: none"> • Bandeja biodegradável • Dispositivos eletrônicos, farmacêuticos
Amido/PBS	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de embalagem, pesca, automotivo
Amido/Fibra natural	<ul style="list-style-type: none"> • Embalagens de alimentos • Material biodegradável

Fonte: Adaptado de Diyana et al., (2021)

Em materiais à base de amido, como aglutinante de revestimento e adesivo de superfície, tornou-se um material importante na indústria papelreira. A indústria de papel é a maior responsável pela aplicação não alimentícia do amido, sua maior proporção é representada pela aplicação em superfície com o intuito de melhorar a eficiência do revestimento, e ao mesmo tempo reduzir custos e impactos ambientais (LI et al., 2019).

3.5 Papel

A forma do ser humano de se expressar sofreu diversas modificações ao longo da história. Como uma maneira de representar pensamentos, acontecimentos e até mesmo a comunicação, o homem empregou os mais diferentes tipos de materiais que a natureza ofertava, tais como, paredes rochosas, ossos, madeiras e folhas de algumas plantas, nessa atividade intimamente ligada ao raciocínio. Paralelamente ao desenvolvimento da inteligência humana e do domínio dos instrumentos, os humanos desenvolveram técnicas que lhes permitiram criar materiais mais adequados à expressão, surgindo assim a necessidade de criação de suporte para escrita o que mais pra frente deu origem ao papel como temos hoje (TEIXEIRA et al., 2017).

A madeira, que é a principal fonte de celulose, essencial para a fabricação do papel, é reconhecida como um dos materiais mais versáteis. Além da celulose, a madeira também contém outros compostos, como hemicelulose, lignina e extratos de madeira. A abundância desse polímero em árvores, especialmente em pinheiros e eucaliptos, é vantajosa para a produção de papel devido às características desejadas para as fibras, como alto teor, baixo custo e facilidade de obtenção. Por essas razões, o Brasil emergiu como um dos maiores produtores mundiais de papel e celulose, impulsionado pelo clima favorável e pela expansão das plantações, uma vez que toda a matéria-prima utilizada provém de recursos renováveis (TEIXEIRA et al., 2017).

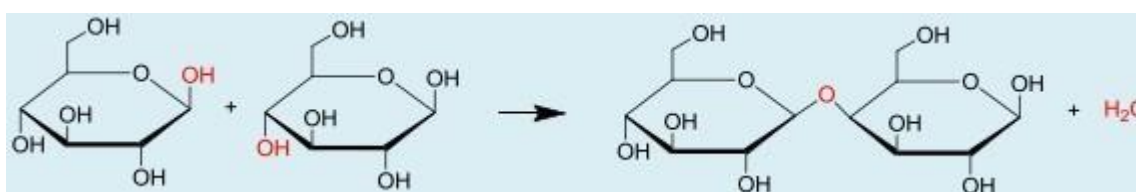
3.6 Celulose

A celulose é um polímero natural considerado um dos polímeros mais abundantes na Terra por ser um componente essencial da maior parte da biomassa vegetal. Devido ao seu pequeno diâmetro e formato alongado, é frequentemente descrita como uma fibra. Os

polissacarídeos, incluindo a celulose, consistem em mais de dez monossacarídeos que formam polímeros (TEIXEIRA et al., 2017).

A celulose é constituída pelo monossacarídeo β -D-glicose, que se une por uma reação contínua de condensação entre os grupos hidroxila dos carbonos 1 e 4, que vêm de açúcares lineares, formando grupos éter e liberando moléculas de água, como mostra a figura 4. A fórmula geral torna-se então $(C_6H_{10}O_5)_n$, onde a letra n representa o grau de polimerização da celulose (TEIXEIRA et al., 2017).

Figura 4 – Formação da celulose pela condensação de glicose.



Fonte: Teixeira et al., (2017, p. 1369)

3.7 Aplicações de celulose como compósito em diferentes biopolímeros de amido

O álcool polivinílico (PVA) pode ser combinado com amido para criar um material mais econômico e biodegradável. Os filmes de PVA contendo amido possuem alta taxa de deterioração em comparação com o PVA puro, porém, as propriedades mecânicas do amido limitam seu uso. A adição de nanocristais de celulose (CNC) aos compostos PVA/amido pode melhorar suas propriedades, como a resistência mecânica e a barreira à água. A proteína de nanocelulose a partir de resíduos de papel é uma opção viável para preparar filmes compostos, o que pode torná-los potenciais materiais de embalagem de alimentos (IRFAN et al., 2023).

A alta biodegradabilidade, renovabilidade e disponibilidade tornam o amido e as nanofibras de celulose excelentes materiais para filmes. Esses compostos podem passar por diferentes procedimentos de modificação devido aos grupos hidroxila presentes nas unidades de anidro glicose, que são monômeros unidos por ligações nas quais o oxigênio glicosídico ocupa sempre uma posição equatorial em relação ao plano do anel. A combinação desses materiais pode ser aplicada em diversas áreas, aproveitando suas vantagens.

Avaliando suas propriedades físicas, mecânicas, de barreira, óticas e biodegradabilidade no solo, foi realizado um estudo sobre a atividade biológica no solo e foi acompanhado durante 40 dias. As amostras dos filmes foram enterradas em solo úmido por diferentes períodos de tempo, para testar e sua biodegradabilidade. Após 30 dias, o filme

controle perdeu 79,5% de seu peso, e após 40 dias, não foi possível recuperar fragmentos do mesmo. Todos os filmes apresentaram uma perda de peso superior a 81% após 40 dias, com a amostra já se desintegrando aos 30 dias. Estima-se que, após 60 dias, os filmes tenham se degradado completamente no solo (MALEKZADEH et al., 2023).

A substituição dos canudos de plástico descartáveis por canudos biodegradáveis foi um assunto muito debatido como forma de proteger o meio ambiente. Atualmente, os canudos de papel e os de ácido polilático se tornaram uma alternativa, mas os canudos de papel são facilmente danificados pela água e têm odor característico, enquanto os de ácido polilático são caros. O uso de canudos de amido termoplástico, feitos a partir de extrusão de palha de amido, é uma opção mais acessível, biodegradável e transparente. Adicionar celulose aos canudos de amido proporciona maior resistência mecânica e à água. A incorporação de nanocristais de celulose nesses biocompósitos de amido melhora ainda mais suas propriedades (WEI et al., 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada, como matéria-prima, amido de mandioca para tapioca da marca Geriba, enquanto o glicerol utilizado foi uma glicerina bidestilada da marca Needs, encontrada em farmácias. Quanto à celulose, foi obtido a partir de papel sulfite A4 branco pós-consumo de impressora, mantendo-se a tinta no papel de impressões anteriores.

4.1 Delineamento Experimental

A produção dos biopolímeros à base de amido e celulose empregou um método de delineamento experimental, um processo que visa planejar e executar o experimento de maneira a controlar as variáveis que impactam os resultados, possibilitando conclusões válidas sobre as relações entre essas variáveis.

No desenvolvimento do experimento, foram definidas as variáveis dependentes, representadas pelos resultados das análises físico-químicas e de degradação, e as variáveis independentes, que consistiram nas quantidades de matéria-prima na formulação. Também foi estabelecido um controle das variáveis não relevantes, mantendo-as constantes por meio da seleção cuidadosa de unidades experimentais e padronização das condições experimentais. Entre os diversos tipos de delineamentos, optou-se pelo Delineamento Inteiramente Casualizado, considerado o tipo mais simples, no qual os tratamentos são atribuídos às unidades experimentais de forma aleatória.

A Tabela 1 apresentam a definição das variáveis, estabelecendo valores máximo e mínimo para cada material, um valor médio das quantidades e quantidades intermediárias (-1,0000 e 1,0000) obtidas por interpolação.

Após a definição das variáveis, conforme mostrado na Tabela 2, os resultados das análises foram processados no software Statistical e posteriormente discutidos, utilizando as informações obtidas como meio de identificar a adequação do método e a confiabilidade dos dados.

Tabela 1. Quantidade de matéria para o preparo das formulações.

Variáveis	-1,6818	-1,0000	0,0000	1,0000	1,6818
Amido (g)	4,0000	5,6216	8,0000	10,3784	12,0000
Glicerina (mL)	2,0000	5,6486	11,0000	16,3514	20,0000
Papel (g)	4,0000	5,2162	7,0000	8,7838	10,0000

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 2. Variação das matérias-primas na formulação para a produção do Biopolímero.

Experimento	Amido	Glicerina	Papel
1	8,0001	11,00	10,0049
2	8,0003	11,00	4,0003
3	5,6226	5,600	8,7833
4	8,0027	11,00	7,0024
5	10,373	16,00	8,7850
6	5,6236	11,00	8,7813
7	8,0000	2,00	7,0015
8	8,0095	20,00	7,0054
9	5,6213	5,60	5,2170
10	10,3781	5,60	5,2171
11	5,6226	16,00	8,7823
12	8,0006	11,00	7,0033
13	4,0016	11,00	7,004
14	10,3783	5,50	8,7835
15	12,0005	11,00	7,0000
16	10,3807	16,00	5,2167

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2 Preparo do Biopolímero

Para a obtenção da polpa, as folhas de sulfite foram separadas e cortadas em pedaços menores usando uma tesoura. Em seguida, a massa foi pesada em um béquer de 250 mL e 200 mL de água destilada foram acrescentados. O papel foi deixado por 5 minutos para absorver a água. Em seguida, o papel foi triturado em um liquidificador até obter uma consistência semelhante a uma massa. Posteriormente, a mistura foi coada usando uma peneira para remover a água e, em seguida, pressionada com as mãos para extrair todo o excesso.

A massa de amido foi pesada e foram adicionados 20 mL de água destilada para dissolver. A solução de amido foi aquecida em uma placa de aquecimento, controlando a temperatura com o auxílio de um termômetro analógico em torno de 60 °C, que é o ponto de gelatinização do amido. Durante esse processo, a solução foi agitada constantemente com um bastão de vidro. Após alcançar uma maior viscosidade, o amido foi retirado do aquecimento e adicionado à celulose do papel enquanto ainda estava quente, misturando bem os componentes formando uma polpa.

A polpa foi deixada resfriada e, em seguida, a glicerina foi adicionada e misturada cuidadosamente. Por fim, com a polpa já fria, foi vertida em placas de Petri e espalhada com

uma espátula. As placas foram então colocadas em uma estufa a 60 °C por 8 horas e posteriormente armazenadas em um dessecador, como ilustrado no fluxograma da Figura 5 (ANJOS, 2005).

Figura 5 – Fluxograma do processo de síntese.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3 Caracterização da amostra

4.3.1 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica foi realizada em um analisador (TGA-DTA-DSC) (modelo SDT Q600, TA Instruments), em atmosfera de ar sintético com vazão de 50 mL/min. As amostras foram aquecidas de 25 a 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

4.3.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

As amostras foram secas em estufa microprocessada com circulação e renovação de ar (Sterilifer) a 40 °C por 4h. Realizaram-se os espectros de FT-IR em espectrofotômetro de

infravermelho modelo *Frontier, Perkin Elmer*. As análises foram realizadas na região do infravermelho médio com transformada de Fourier utilizando reflectância total atenuada (*Attenuated total reflectance*) abrangendo a faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 64 varreduras para cada amostra.

4.3.3 Teste de Arquimedes

O princípio de Arquimedes foi aplicado para determinar a densidade, o volume de poros e a porosidade do material fabricado. Neste experimento, utilizou-se uma balança analítica (Urano) modelo *UA220*, um béquer de 100 mL contendo água destilada, linha de costura e um suporte universal. As amostras foram recortadas em quadrados com dimensões aproximadas de 1,5 cm x 1,5 cm e submersas no béquer contendo água. A densidade da água foi estabelecida a uma temperatura ambiente de 25° C como sendo 0,997 g/cm^3 .

Conforme o princípio de Arquimedes, quando um corpo está imerso em um fluido, ele sofre a ação de uma força igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo (empuxo). Isso implica que o volume do fluido deslocado é igual ao volume da parte do corpo imersa no fluido, conforme explicado por MARTINS et al. (2015).

Sendo assim, é possível determinar a densidade do biopolímero por meio da Equação 1:

$$\rho_s = \rho \cdot \frac{m_s}{m_L} \quad (\text{Equação 1})$$

que é a equação da densidade do sólido em função da sua massa e da massa do líquido deslocado. Na qual ρ_s = densidade do sólido, ρ_L = densidade do líquido, m_s = massa do sólido seca e m_L = massa do líquido deslocado.

Com o auxílio de um paquímetro, as amostras foram medidas com maior precisão para determinar o volume da peça por meio da Equação 2:

$$v_{real} = L_1 \cdot L_2 \cdot h \quad (\text{Equação 2})$$

Em que, o v_{real} = volume aparente, L_1 e L_2 = comprimento lateral e h = altura do biopolímero.

Para determinar a porosidade do corpo, foi necessário calcular o volume de poros (v_{poros}) presente no material utilizando a Equação 3:

$$v_{poros} = v_{real} - \frac{m_s}{\rho_s} \quad (\text{Equação 3})$$

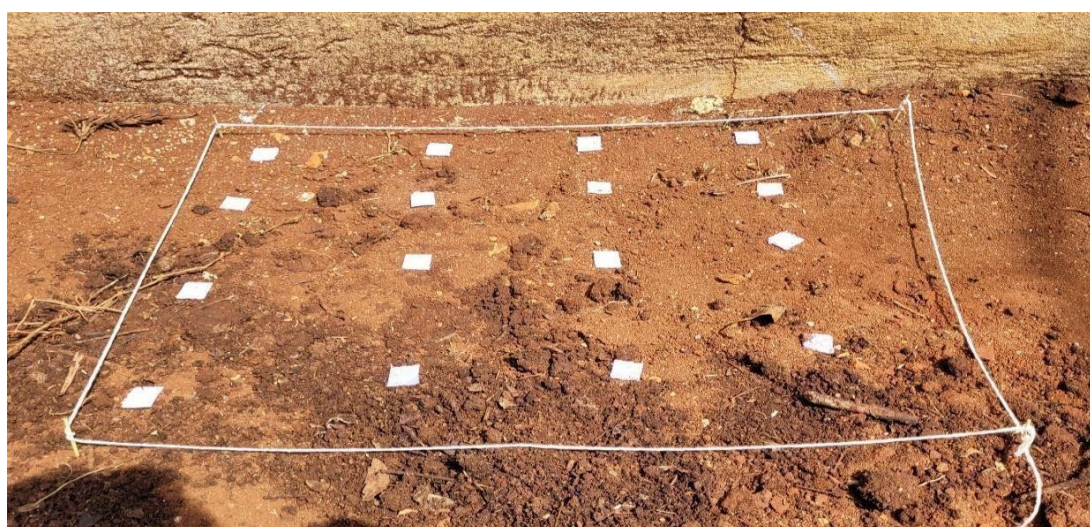
Por fim, determinada a porosidade aparente do biopolímero, por meio da Equação 4, que fornece a porcentagem de porosidade presente nas amostras:

$$Porosidade = \frac{v_{poros}}{v_{real}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 4})$$

4.3.4 Teste de degradação

O teste de degradação foi avaliado com base na porcentagem de massa perdida pelo material fabricado. Para isso, foram cortadas amostras de aproximadamente 2 cm² e as massas dessas amostras foram pesadas. Em seguida, foram distribuídas no solo em uma das estufas do Departamento de Agronomia da UTFPR-PB, que não possuía cobertura, expondo assim as amostras às diversas condições climáticas, como mostrado na Figura 6. O objetivo era obter um resultado mais representativo do descarte do objeto no meio ambiente. Embora as chuvas possam ter uma grande influência no resultado final, foram monitoradas as precipitações durante o período em que o material estava exposto ao clima.

Figura 6 – Amostras do material polimérico distribuídas no solo.



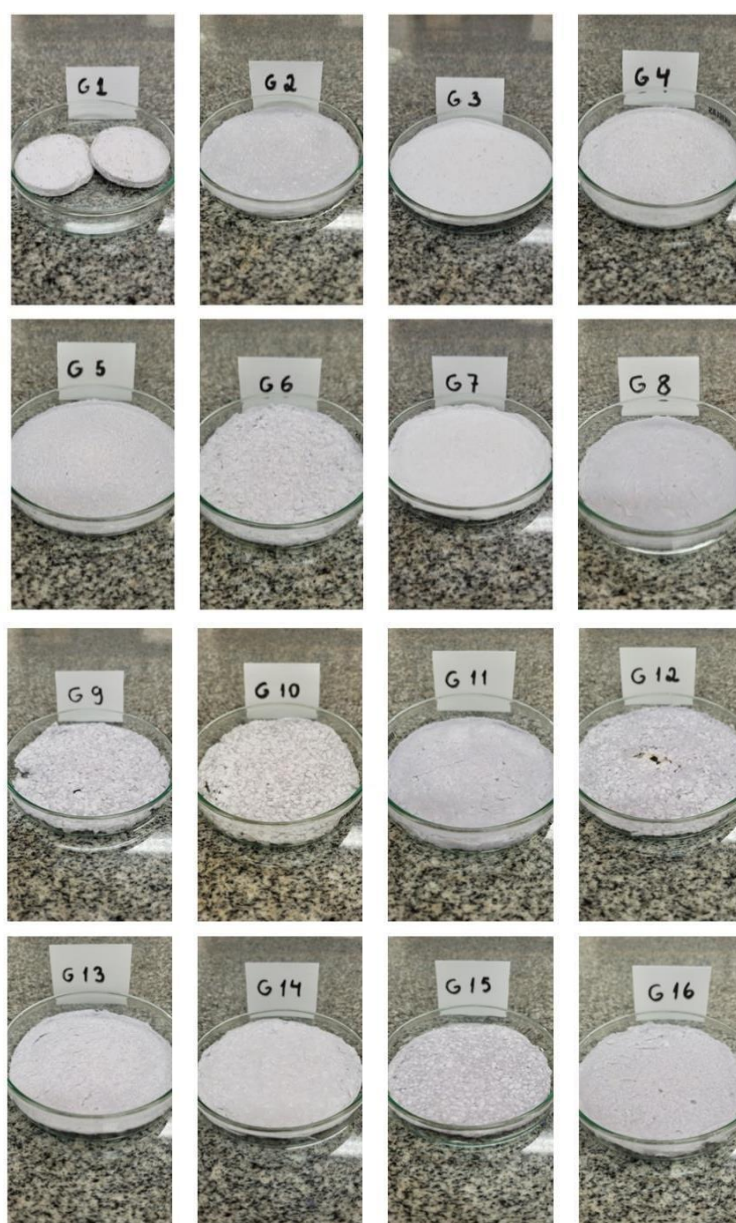
Fonte: Autoria própria, 2023.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do planejamento estatístico

Durante o processo de síntese, as amostras exibiram variações notáveis na textura, coloração e homogeneidade, evidenciando a influência direta das diferentes formulações, conforme ilustrado na Figura 7. A análise dessas variações fornece informações importantes para o ajuste preciso das formulações em busca de um produto otimizado em termos de características físicas e químicas.

Figura 7 – Amostras do biopolímero correspondente ao planejamento experimental.



Fonte: Autoria própria, 2023.

5.2 Análise de processamento do Biopolímero

Com a introdução de variações na fórmula de cada material, os biopolímeros manifestaram uma gama diversificada de características. Alguns apresentaram uma notável uniformidade nos compostos, destacando-se pela homogeneidade alcançada durante a produção. Por outro lado, em outras amostras, a inclusão da celulose resultou na presença de grânulos perceptíveis.

O procedimento experimental foi conduzido de maneira consistente para todas as amostras. Em determinados casos, a adição de celulose ao amido permitiu uma completa miscibilidade dos componentes. Entretanto, ao incorporar o glicerol, um plastificante polar e hidrofílico, à mistura a massa acabou por se dispersar, dando origem a diferentes fases no material. Esse fenômeno pode ser atribuído à interação resultante entre o glicerol e as moléculas do amido (MENDES, 2009).

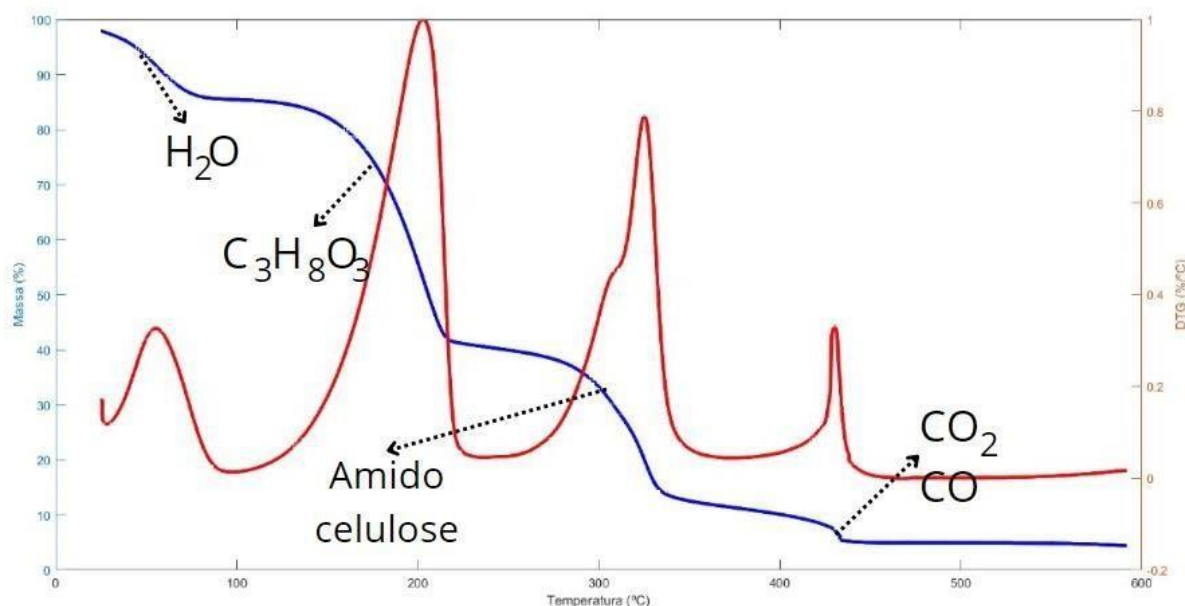
Além disso, os materiais poliméricos produzidos exibiram características físicas notáveis por meio da observação visual. Estas incluíram variações na rigidez, friabilidade, higroscopia e maleabilidade, resultantes das diferentes quantidades utilizadas na formulação. Por exemplo, a amostra G1 apresentou boa rigidez e uniformidade, mas esfarelava facilmente. Já as amostras G3 e G7 demonstraram uniformidade nos componentes, boa rigidez e resistência ao corte, embora possuíssem uma superfície fosca e seca. As amostras G2, G4 e G5 mantiveram uma boa uniformidade, embora uma análise detalhada revelasse alguns grânulos incorporados ao material, ao contrário das amostras G8, G11 e G16, que exibiram características hidrocópicas. Estas últimas apresentaram facilidade em absorver água do ar, resultando em uma aparência molhada, uma pequena porosidade aparente na superfície do material e uma maior maleabilidade em comparação com as demais.

5.3 Caracterização dos compostos

5.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

A TGA (Análise Termogravimétrica) é uma técnica empregada para avaliar alterações químicas, físicas e estruturais em um material devido a variações de temperatura, acompanhando as reações que ocorrem durante o processo de aquecimento (NURAZZI et al., 2021). Essa abordagem permite detectar mudanças na massa em relação à temperatura e ao tempo, incluindo a destruição carbonizada, fornecendo informações cruciais sobre a estabilidade térmica, a oxidação e a combustão de compostos.

Figura 8 – Curva de TGA e DTG da amostra G1 do biopolímero.



Fonte: Autoria própria, 2023

A TGA e o DTG revelaram uma perda de massa em quatro eventos decorrentes do aumento de temperatura, conforme ilustrado na Figura 8. A primeira etapa, ocorrendo aproximadamente entre 50 e 100 °C, é direcionada à eliminação de água devido à alta absorção de umidade pelo amido, resultante das ligações de hidrogênio formadas pelas hidroxilas das unidades de glicose em sua cadeia (WEI et al., 2022). O segundo estágio, caracterizado por uma notável perda de massa, ocorre em torno de 210 °C devido à volatilização do glicerol (SCHLEMMER, SALES, RESCK, 2010). O terceiro estágio, marcado por outro pico intenso, representa a etapa máxima de decomposição do amido, ocorrendo aproximadamente a 329 °C. Nessa etapa, ocorre a eliminação de grupos polihidroxílicos, decomposição e despolimerização das cadeias, afetando os componentes amilose e amilopectina, conforme descrito por Schlemmer et al, (2013). A manipulação em temperaturas elevadas induz a quebra de ligações C-C de moléculas orgânicas, impactando as cadeias moleculares e/ou poliméricas desses compostos, como no caso da celulose, cuja degradação ocorre entre 342 e 347 °C (MANIGLIA, 2017; QUEIROZ, 2018). E temperaturas acima disso entre 400 - 600 °C, geralmente ocorre a liberação de dióxido de carbono, monóxido de carbono e pequenas quantidades de hidrocarbonetos (WEI et al., 2022).

Na análise termogravimétrica, a temperatura do pico e de perda de massa em cada evento térmico são influenciadas pelos componentes e pela estrutura cristalina do amido, dessa forma, é possível chegar a conclusões sobre a estabilidade térmica da amostra, a composição, a estabilidade dos compostos e, por fim, do produto final (DENARI,

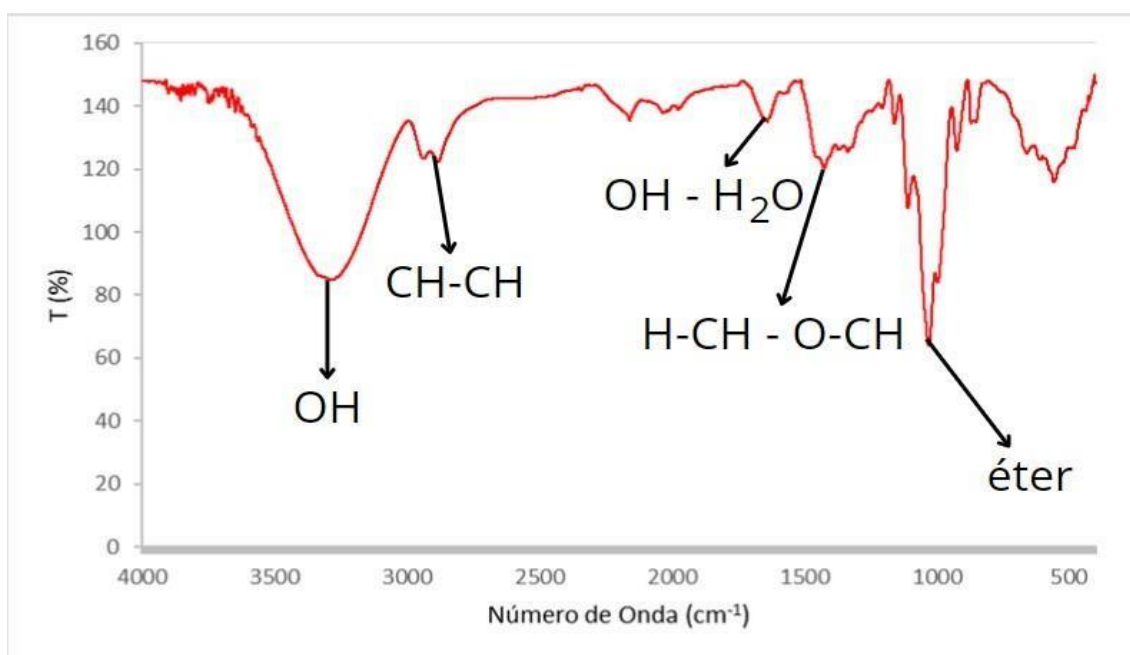
CAVALHEIRO, 2012). Nesse estudo, a análise termogravimétrica pode mostrar que a perda de massa em relação aos elementos que compõe a amostra, como umidade, amido, glicerina e celulose, processou-se até aproximadamente 600 °C, melhorando assim as propriedades térmicas do amido modificado, ao contrário do amido puro, cujas temperaturas de transição vítrea (T_g), e de fusão (T_m) são superiores à sua temperatura de decomposição (BRITO et al., 2011).

Como as demais amostras do material polimérico apresentavam um perfil termogravimétrico muito semelhante, optou-se por apresentar apenas a amostra G1, enquanto as demais estão disponíveis no anexo 1.

5.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

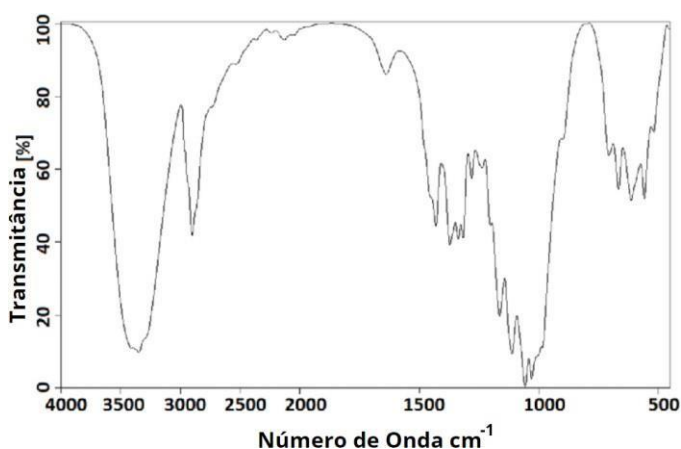
O espectro de infravermelho fornece informações sobre os grupos funcionais e a conformação do material analisado. Na Figura 9, apresenta-se o espectro de FT-IR da amostra G1 do biopolímero produzido, conforme Sousa et al. (2023), o espectro de materiais poliméricos revela características típicas, por possuir bandas largas devido à elevada massa molar das cadeias poliméricas.

Figura 9 – Espectroscopia na região do infravermelho da amostra G1 do biopolímero.



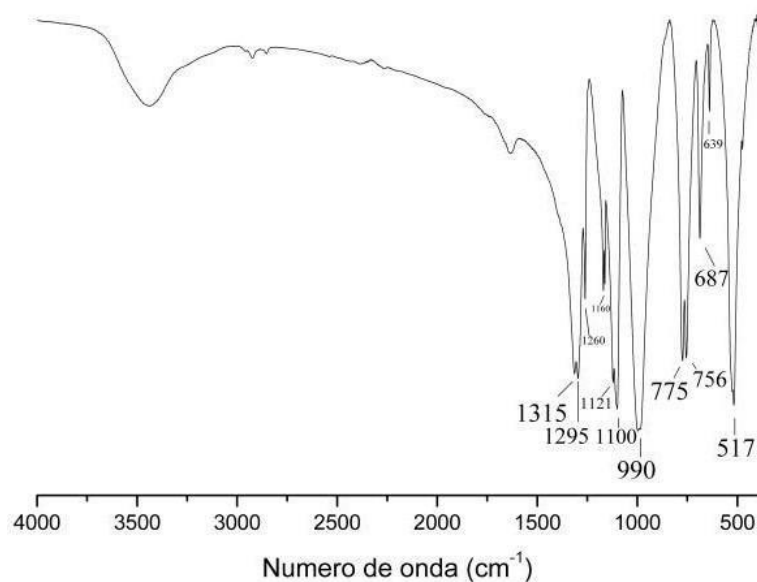
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 10 - Espectroscopia na região do infravermelho da celulose.



Fonte: Adaptado de Szpilyk e Lubczak, 2021.

Figura 11 - Espectroscopia na região do infravermelho do amido puro.



Fonte: Iurckevicz, Marques e Lima (2017)

De acordo com Vigneshwaran et al. (2011), na análise FTIR, a semelhança na natureza química do amido e da celulose resulta na sobreposição de muitos picos característicos, dificultando a distinção entre eles, pode-se fazer a comparação por meio das Figuras 10 e 11. Analisando o espectro da amostra G1, foram identificadas essas principais bandas. Uma banda característica é centrada em aproximadamente 3280 cm^{-1} , é atribuída ao estiramento das ligações O-H. A faixa entre 2930 e 2880 cm^{-1} refere-se às ligações CH-CH comuns em toda a molécula, conforme referência de Souza et al. (2023). A formulação

apresenta uma banda menos intensa em torno de 1640 cm^{-1} , associada à flexão angular do O-H nas moléculas de água, proporcionando interações da água com os componentes das formulações (amido, celulose e glicerol), além das vibrações de dobramento no plano H-CH e O-CH são observadas em 1424 cm^{-1} (Sueiro et al., 2016). Por fim, uma evidente banda centrada em aproximadamente 1025 cm^{-1} , causada pelo que pode ser um estiramento axial da ligação éter, devido à interação do glicerol com o amido, acrescenta Mendes (2009).

Assim, podemos concluir que, embora os polissacarídeos de glicose na formação das cadeias poliméricas possam apresentar certa semelhança entre si, o espectro de FTIR fornece informações sobre a interação entre os componentes amido, celulose e glicerol presentes na amostra, por meio das diferentes ligações de hidrogênio. Contudo, ao comparar os espectros de todas as amostras e observar pequenas diferenças na forma e intensidade de algumas bandas, optou por apresentar apenas o espectro da primeira amostra (G1), deixando as demais disponível no anexo 1.

5.3.3 Teste de Arquimedes

Determinar a densidade e porosidade aparente de um material é fundamental, pois fornece informações valiosas sobre seu comportamento em diferentes aplicações e revela como o processo de fabricação influenciou o resultado final.

No presente estudo, não houve variação na temperatura, embora as amostras tenham sido secas em estufas a aproximadamente 60° C por 8 horas.

Na Tabela 3 estão os resultados obtidos por meio das equações apresentadas anteriormente, e a partir desses dados foi realizada a análise estatística em relação aos parâmetros analisados.

Tabela 3. Resultados obtidos por meio das equações de densidade, volume real, volume de poros e porosidade.

Amostra	Densidade do biopolímero (g/cm ³)	V real (cm ³)	V poros (cm ³)	Porosidade (%)
G1	1,054	0,9959	0,4380	43,98
G2	1,175	0,4243	0,0272	6,41
G3	1,009	0,3896	0,1287	33,03
G4	1,215	0,3773	0,0501	13,27
G5	1,078	0,3952	0,0392	9,92
G6	1,042	0,5851	0,1993	34,07
G7	1,162	0,2505	0,1101	43,95
G8	1,193	0,4031	0,0277	6,86
G9	1,044	0,2938	0,0287	9,77
G10	1,055	0,4080	0,1228	30,10
G11	1,198	0,5144	0,1024	19,90
G12	1,084	0,4142	0,0980	23,65
G13	1,059	0,4120	0,0242	5,88
G14	1,053	0,5022	0,1910	38,03
G15	1,086	0,4528	0,0146	3,23
G16	1,158	0,6581	0,0042	0,633

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 4. Resultados da regressão linear relacionada à densidade aparente.

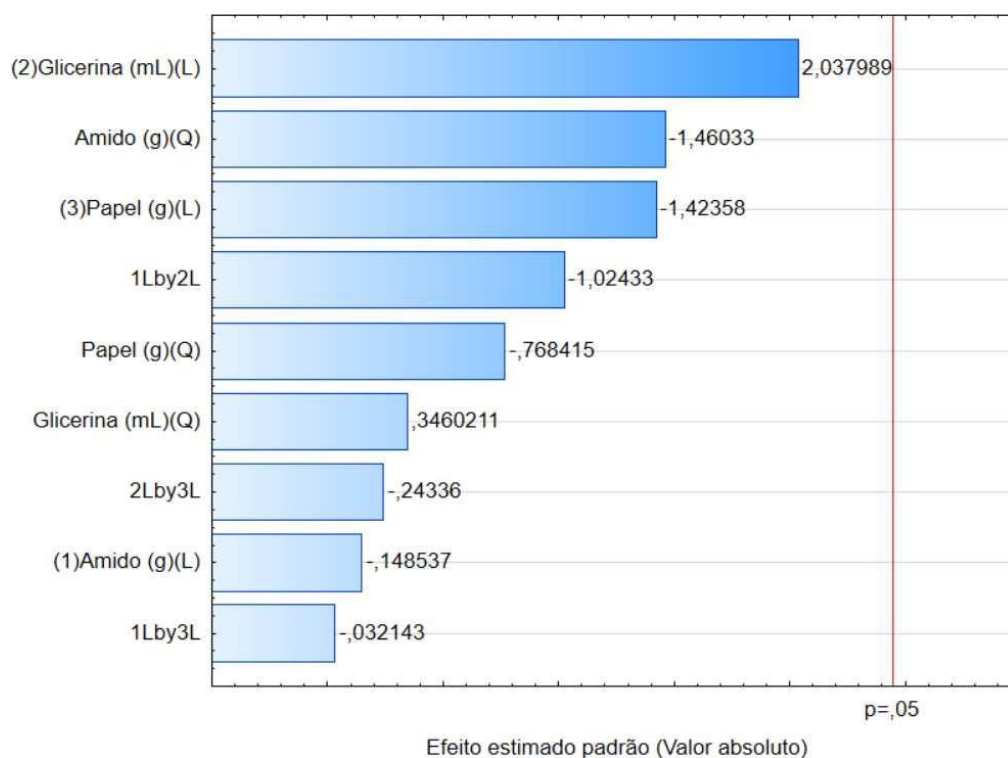
$$R^2 = 0,63361$$

Fator	Efeito	Std. Err	t(6)	P
Significado/ Interc.	1,147328	0,044617	25,71521	0,000000
(1)Amido (g)(L)	-0,009522	0,064108	-0,14854	0,886786
Amido (g)(Q)	-0,176926	0,121155	-1,46033	0,194498
(2)Glicerina (mL)(L)	0,133309	0,065412	2,03799	0,087688
Glicerina (mL)(Q)	0,041205	0,119083	0,34602	0,741137
(3)Papel (g)(L)	-0,08959	0,062933	-1,42358	0,204427
Papel (g)(Q)	-0,093115	0,121178	-0,76842	0,471393
1L por 2L	-0,156804	0,153079	-1,02433	0,345191
1L por 3L	-0,004593	0,14289	-0,03214	0,9754
2L por 3L	-0,037267	0,153135	-0,24336	0,815834

Fonte: Autoria própria, 2023.

Ao examinar a Tabela 4, que apresenta o p-valor tem por objetivo determinar se a composição da prova é significativa para o parâmetro previsto, ou seja, a densidade aparente das amostras, observa-se que os valores obtidos não possuem significância estatística.

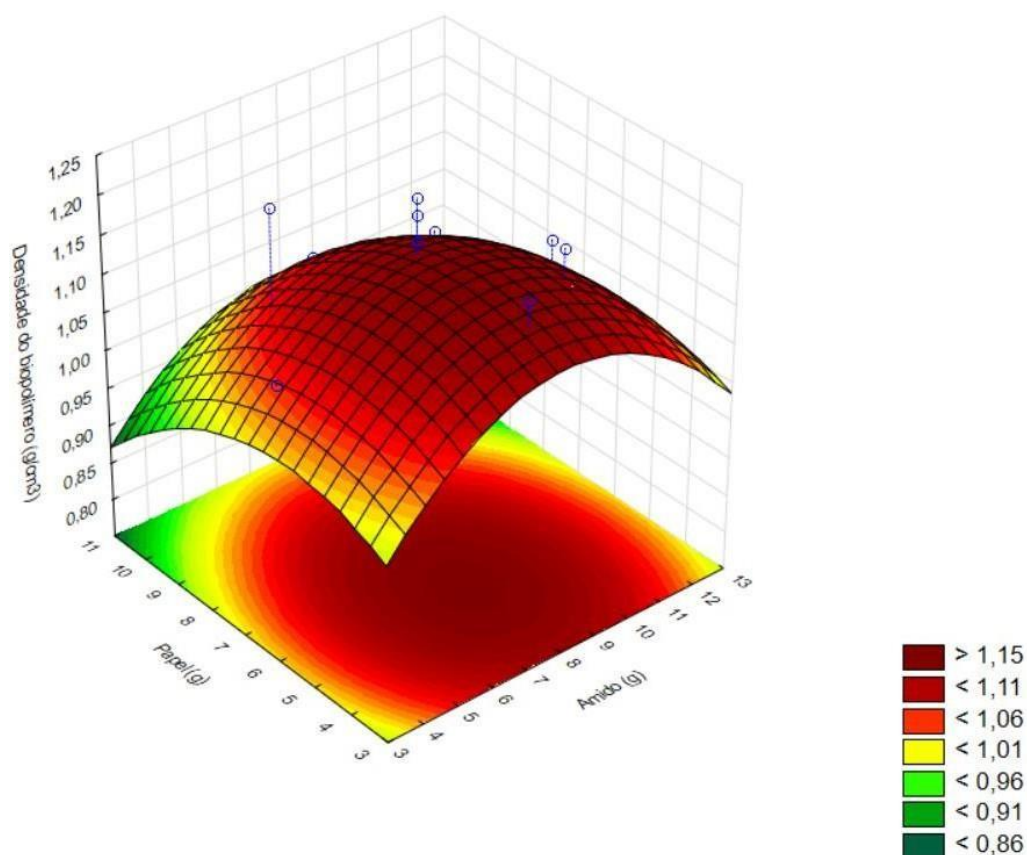
Figura 12. Gráfico de determinação da variável significativa relacionada a densidade aparente.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na figura 12, o gráfico para determinação da variável significativa indica que através dos resultados obtidos pela equação da densidade aparente, nenhum dos valores obtidos através do método diferem estatisticamente.

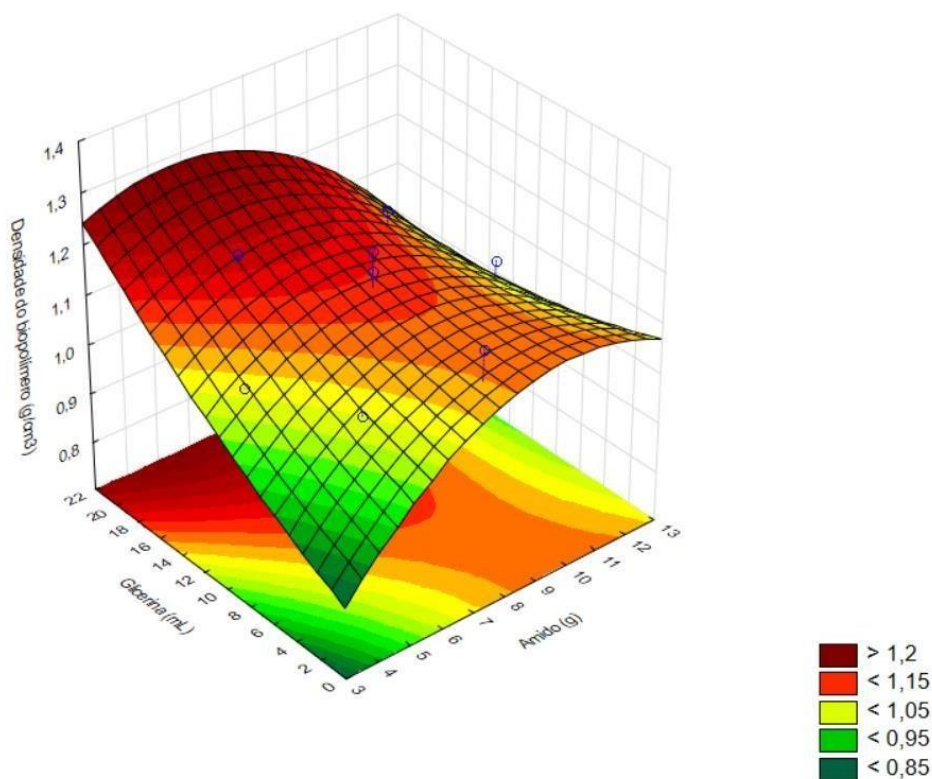
Figura 13. Gráfico da influência do papel e do amido na densidade aparente da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Analisando o gráfico da Figura 13, correspondente à densidade aparente do produto em relação à variação de papel e amido, podemos perceber que os maiores valores de densidade consistem nos valores médios de composição, onde possui as quantidades de amido e papel se encontram próximas, embora percebe-se que a quantidade de amido deva ser superior ao do papel, para se obter um material mais compacto e rígido. Isso pode ser atribuído ao fato de que uma quantidade adequada de celulose apresenta maior adesão com a superfície do amido, mas o seu conteúdo excessivo, pode levar à aglomeração de celulose e uma má interação interfacial entre a celulose e o amido, aumentando os espaços entre as moléculas (BALAKRISHNAN et al., 2017).

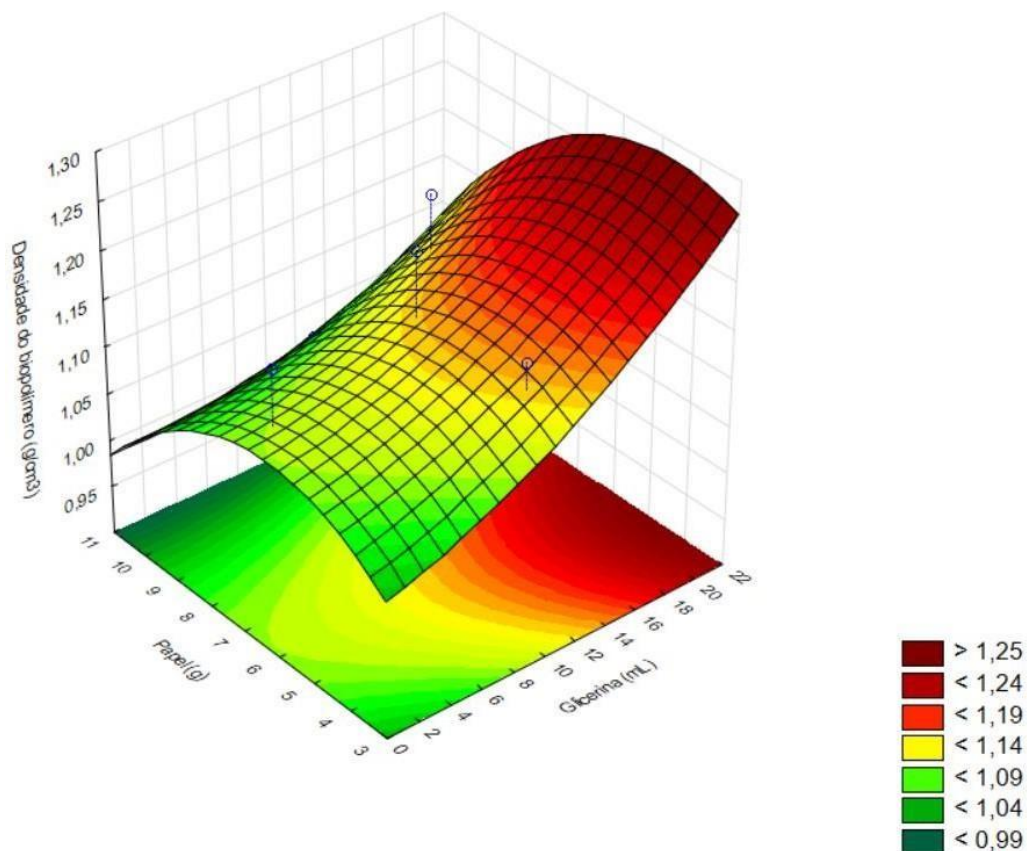
Figura 14. Gráfico da influência da glicerina e do amido na densidade aparente da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 14, o gráfico da densidade aparente agora está em relação à variação da glicerina e do amido, podemos observar que a glicerina é uma grande influenciador no aumento da densidade das amostras analisadas, embora o amido começa a ser relevante a partir 9 e 10 g, ele ainda mantém uma densidade intermediária. O fato de a glicerina obter maior relevância na densidade aparente se dá pelas ligações de hidrogênio causadas por esse composto, além de proporcionar um aumento na hidrofiliicidade da amostra.

Figura 15. Gráfico da influência do papel e da glicerina na densidade aparente da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 15, agora comparando a influência da variação do papel e da glicerina no material polimérico, observa-se novamente o quanto a glicerina interfere nesse parâmetro, mas olhando para o papel, se tem a informação de que ele não modifica em quase nada na densidade aparente da amostra, pois a glicerina possui a maior interação com as moléculas de amido, devido sua polaridade e efeito plastificante.

Tabela 5. Resultados da regressão linear relacionada à porosidade das amostras produzidas.

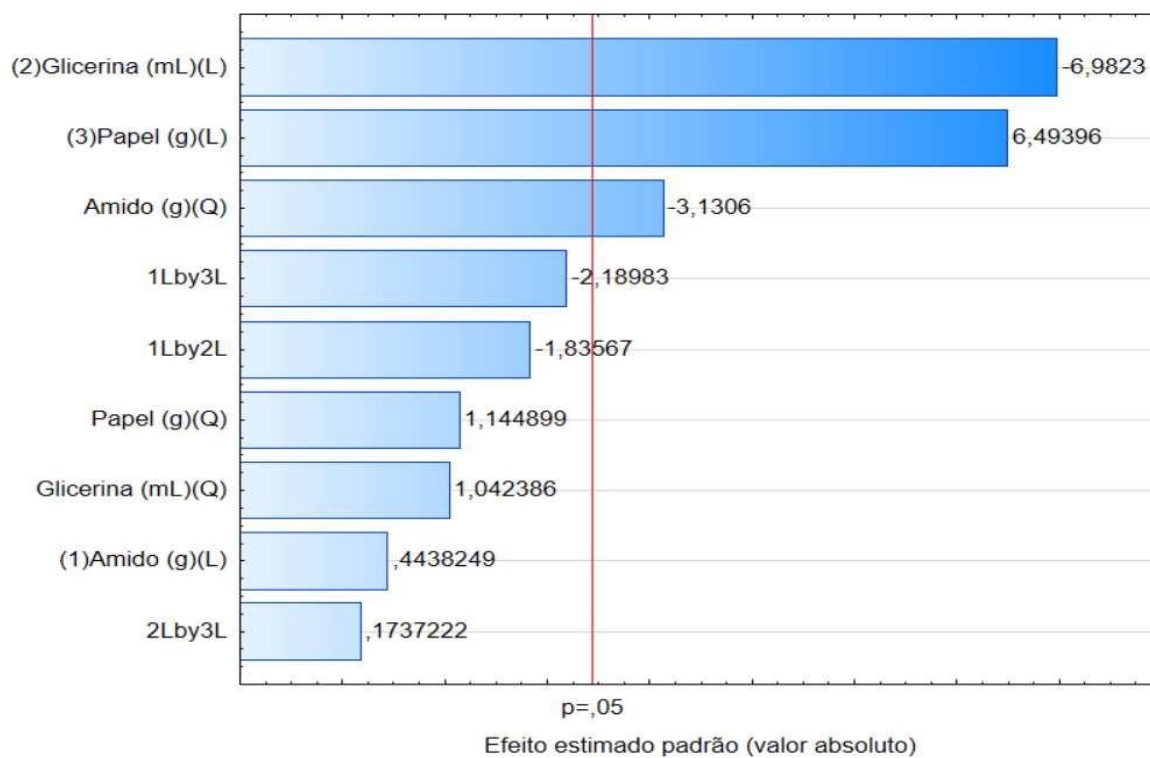
$$R^2 = 0,95386$$

Fator	Efeito	Std. Err	t(6)	P
Significado/ Interc.	19,3149	3,55693	5,43023	0,001617
(1)Amido (g)(L)	2,2683	5,1108	0,44382	0,672727
Amido (g)(Q)	-30,2376	9,65873	-3,1306	0,020309
(2)Glicerina (mL)(L)	-36,4112	5,21479	-6,9823	0,000429
Glicerina (mL)(Q)	9,8959	9,49349	1,04239	0,337401
(3)Papel (g)(L)	32,5809	5,0171	6,49396	0,000634
Papel (g)(Q)	11,0603	9,66055	1,1449	0,295858
1L por 2L	-22,4021	12,20378	-1,83567	0,116072
1L por 3L	-24,9453	11,39143	-2,18983	0,071091
2L por 3L	2,1208	12,20818	0,17372	0,867797

Fonte: Autoria própria, 2023.

Ao examinar a Tabela 5, que aborda a significância das variáveis na composição do material polimérico, observa-se que três fatores demonstraram ter uma relevância significativa no resultado do parâmetro analisado, que é a porosidade. Esses fatores incluem a presença de amido nas condições aplicadas, a quantidade de glicerina e a contribuição do papel na função quadrática de suas composições.

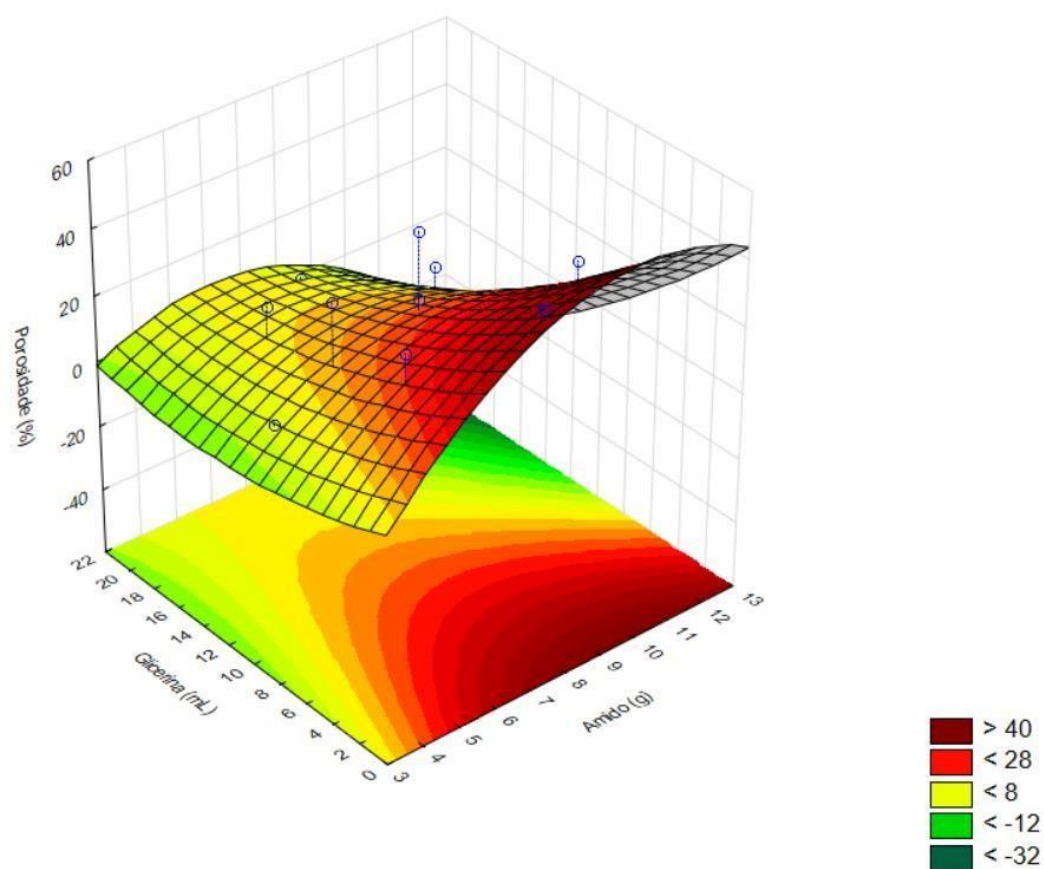
Figura 16. Gráfico de determinação da variável significativa relacionada à porosidade das amostras produzidas.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 16, com o gráfico configura o resultado, no qual as três variáveis possuem valor acima do p-valor, confirmando a significância estatística dessas composições no parâmetro de porosidade analisado.

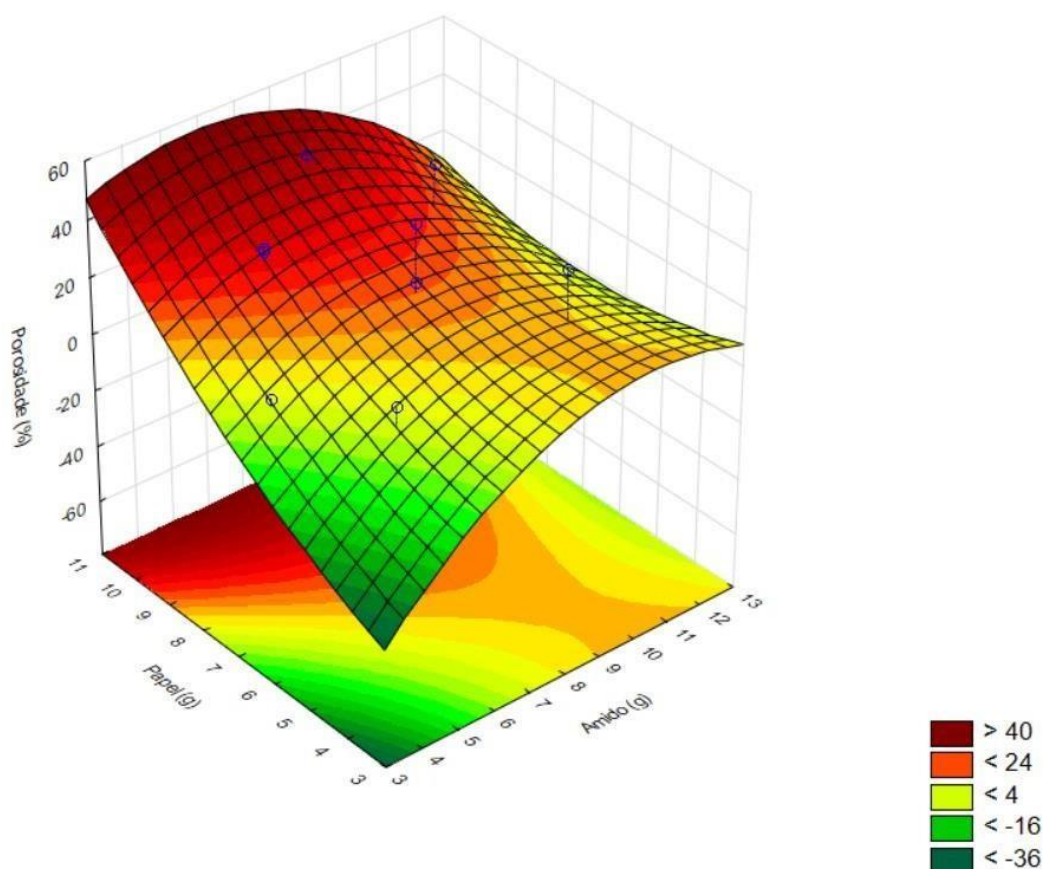
Figura 17. Gráfico da influência da glicerina e do amido na porosidade aparente da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 17 relaciona a porosidade da amostra com a variação da glicerina e do amido, o gráfico nos trás informações de que o amido é o composto mais determinante em relação à porosidade da amostra, embora maiores taxas de porosidade estejam relacionadas às composições que variam de acima de 6g. Também mostra que e a glicerina não apresenta muita atuação nesse parâmetro, podendo-se concluir que a menor quantidade de glicerina favorece o aumento da porosidade aparente da amostra, pois a glicerina atua como o plastificante no material.

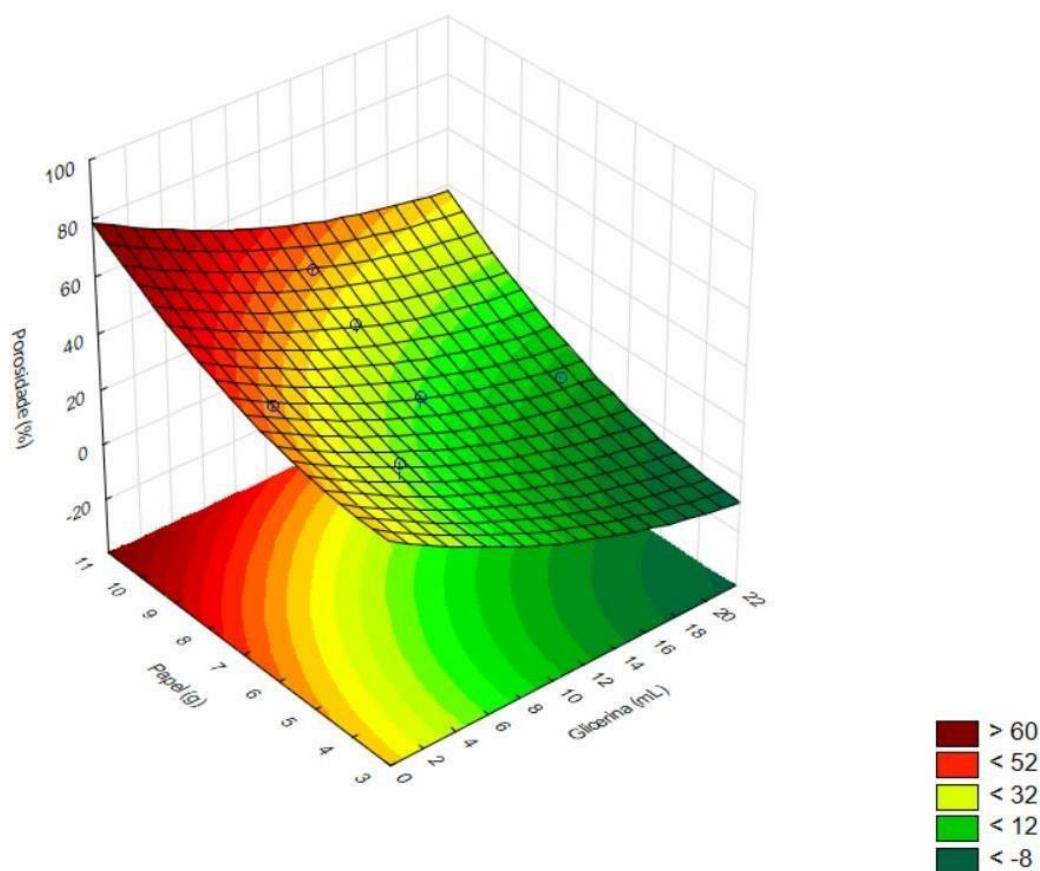
Figura 18. Gráfico da influência do papel e do amido na porosidade aparente da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

No caso da Figura 18, onde a relação da porosidade está ligada à variação do papel e do amido, podemos observar que essa relação é inversamente proporcional e que a variação na quantidade de amido não possui muita influência na porosidade, embora ao contrário quantidade de papel consegue definir o aumento da porosidade aparente do material. De acordo com Nasrabadi et al (2014), isso pode ser atribuído ao fato de que o aumento do teor de celulose leva à separação de fases, má distribuição de partículas e formação de aglomerados maiores favorecendo um aumento no volume de poros que consequentemente aumenta a porosidade do material.

Figura 19. Gráfico da influência do papel e da glicerina na porosidade aparente da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Conforme ilustrado na Figura 19, que correlaciona a alternância da composição do papel e da glicerina, fica evidente novamente a predominância do papel ao aumento da porosidade, mas olhando pelo composto da glicerina, conforme vai aumentando a sua quantidade menos poroso o material final vai se tornando.

5.3.4 Teste de biodegradação

A biodegradabilidade desempenha um papel crucial na avaliação de biopolímeros, sendo um índice fundamental na avaliação dos compósitos formados por biomassa. Essa característica refere-se à capacidade do material de se decompor em componentes mais simples sob condições ambientais. Esse processo ocorre através de enzimas, fungos e bactérias presentes na natureza, descompondo compostos biodegradáveis em CO_2 e H_2O em condições aeróbicas, e em H_2 e CH_4 em condições anaeróbicas (JINDAL, MAHAJAN, 2019).

A biodegradabilidade envolve uma avaliação da perda de massa ao longo do tempo sob condições climáticas naturais. O material produzido neste estudo permaneceu no solo por um período de 40 dias, durante uma das maiores precipitações registradas no mês de outubro em Pato Branco, no qual totalizou-se aproximadamente 652,8 mm de chuva na região. Deste montante, 174,2 mm foram registrados em um único dia (Fonte: IDR-Paraná e Simepar, 2023).

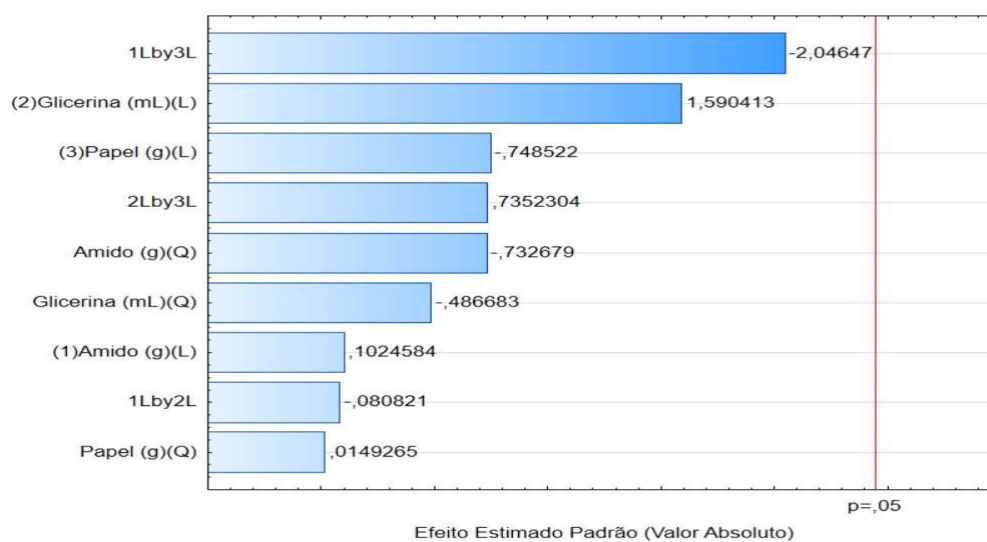
Tabela 6. Resultados da regressão linear relacionada à variação de perda de massa por decomposição das amostras produzidas. $R^2 = 0,64127$

Fator	Efeito	Std. Err	t(6)	P
Significado/ Interc.	81,9817	13,98072	5,86391	0,001088
(1)Amido (g)(L)	2,0582	20,08831	0,10246	0,921731
Amido (g)(Q)	-27,8156	37,96424	-0,73268	0,491374
(2)Glicerina (mL)(L)	32,5988	20,49705	1,59041	0,162845
Glicerina (mL)(Q)	-18,1605	37,31477	-0,48668	0,643749
(3)Papel (g)(L)	-14,7609	19,72004	-0,74852	0,482445
Papel (g)(Q)	0,5668	37,97139	0,01493	0,988575
1L por 2L	-3,8768	47,96772	-0,08082	0,938213
1L por 3L	-91,6301	44,77473	-2,04647	0,086665
2L por 3L	35,28	47,985	0,73523	0,489928

Fonte: Autoria própria, 2023.

Verificando os resultados da tabela 6, não há nenhum valor relativo à composição que seja determinante na análise estatística que corrobore com significativa variável do parâmetro de decomposição estudado.

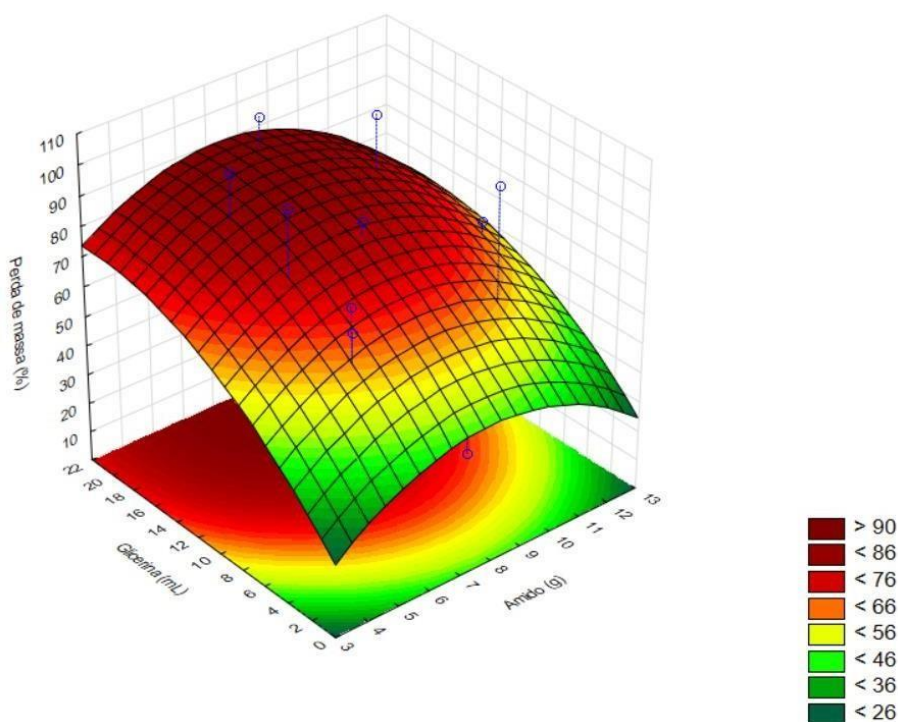
Figura 20. Gráfico de determinação da variável significativa relacionada à perda de massa por decomposição das amostras produzidas.



Fonte: Autoria própria, 2023.

As Figuras 21, 22 e 23 mostram o gráfico formado por meio do planejamento estatístico, no qual mostra a influência da variação dos componentes do biopolímero na degradabilidade da amostra.

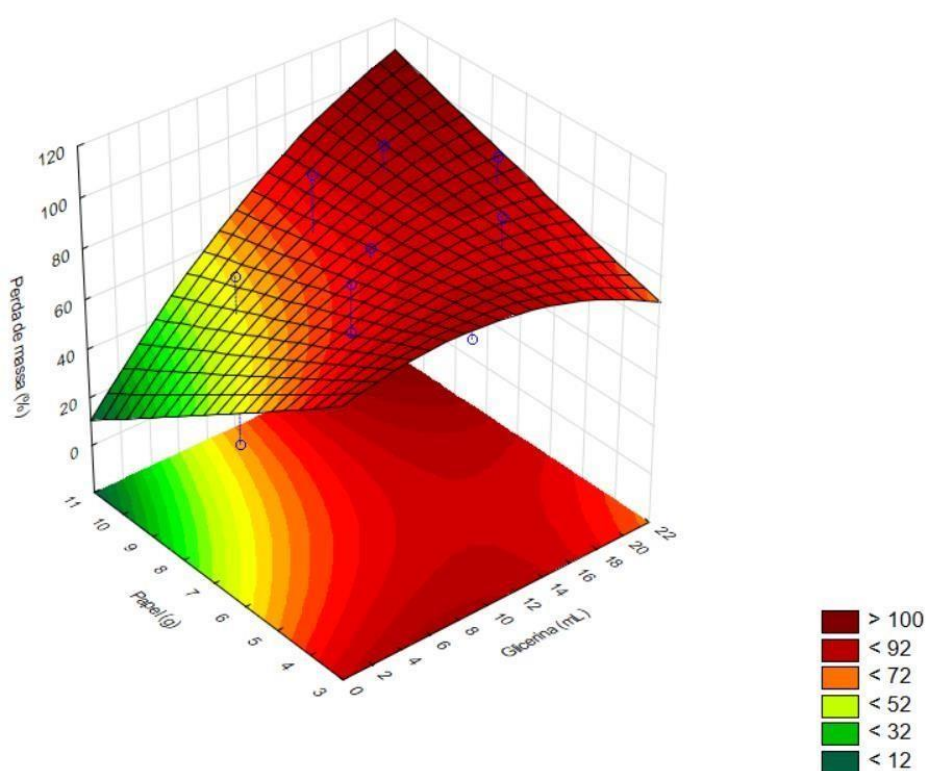
Figura 21. Gráfico da influência da glicerina e do amido na degradação da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 21, podemos identificar a faixa mais escura, indicativa de maior degradação da amostra. Ao analisar o gráfico em relação às quantidades de amido e glicerina, observa-se que a glicerina desempenha um papel determinante nas taxas de degradação. Em outras palavras, as amostras que continham maiores quantidades de glicerina em sua composição apresentavam a maior perda de massa. Essa observação pode ser direcionada à absorção de água pelos filmes de material polimérico, promovendo a aderência de microrganismos, como fungos e bactérias, cujo crescimento se inicia na superfície, conforme destacado por Jindal e Mahajan (2019). Vale ressaltar que a glicerina é um componente crucial no sistema metabólico de diversos microrganismos, sendo um precursor para a síntese de triacilgliceróis e fosfolípídeos (BASTOS, 2012).

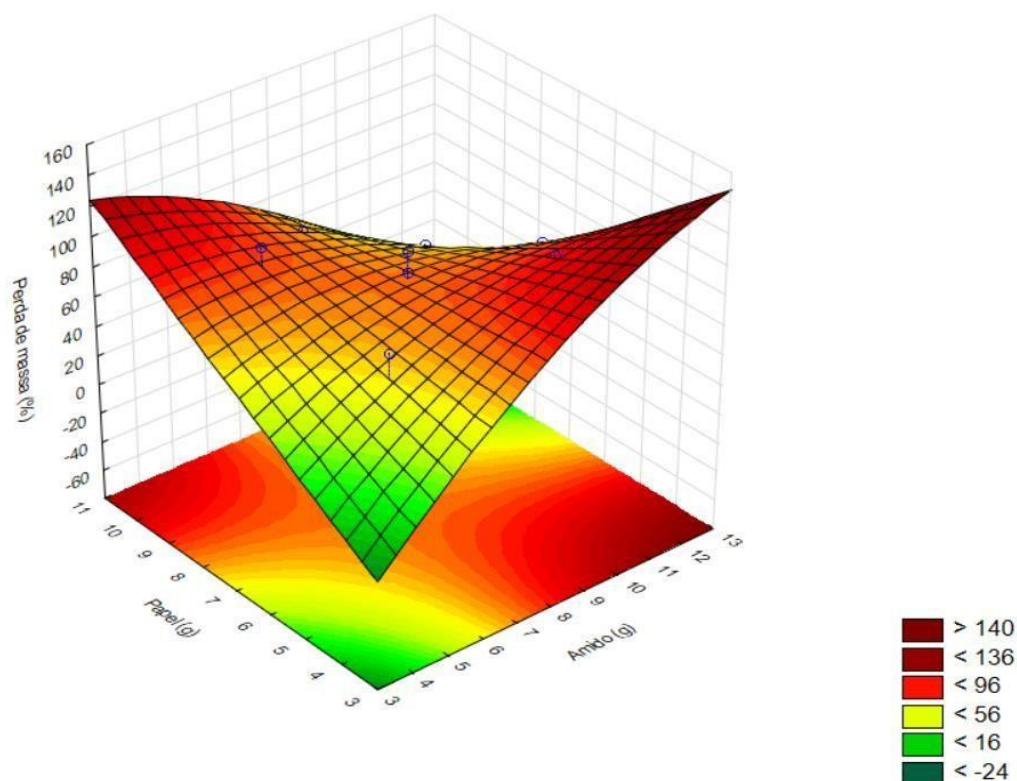
Figura 22. Gráfico da influência do papel e da glicerina na degradação da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 22, o gráfico evidencia a relação entre a composição do papel e a presença de glicerina nas amostras produzidas. Observamos mais uma vez que a maior degradação da amostra está intimamente ligada à maior quantidade de glicerina, corroborando com resultado apresentados anteriormente na Figura 18. No entanto, o gráfico também revela que essa taxa de degradação diminui à medida que aumenta a quantidade de papel no produto.

Figura 23. Gráfico da Influência do papel e do amido na degradação da amostra.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 23, o gráfico correspondente à variação da taxa de degradação em comparação as quantidades de papel e amido, apresentou um perfil um pouco distinto. Os dados indicam uma relação inversamente proporcional entre as quantidades de amido e papel e sua influência na taxa de degradação. Essa observação pode ser explicada pela presença de grupos hidrofílicos nas estruturas químicas do amido, que interagem tanto com as moléculas de água quanto entre si por meio de ligações de hidrogênio (MENDES, 2009). No entanto, ao formar o biopolímero pela interação com as moléculas de celulose do papel, que possui uma característica mais hidrofóbica, essa interação também ocorre por ligações de hidrogênio, reduzindo assim a absorção de água, consequentemente atribui uma maior resistência do material explicando a diminuição na porcentagem de degradabilidade (WEI et al., 2022).

6 CONCLUSÃO

Este estudo foi essencial para abrir perspectivas na criação de novos materiais poliméricos biodegradáveis, aproveitando recursos simples e abundantes, como amido, celulose e glicerol. Ele representa uma oportunidade significativa para aprimorar as soluções em relação aos plásticos convencionais, apresentando uma alternativa que pode contribuir para lidar com um dos maiores desafios da sociedade moderna: o descarte de resíduos sólidos.

O material obtido apresentou resultados positivos nas análises realizadas. As análises de FTIR confirmaram a aderência das moléculas de amido, celulose e glicerol, assim como a melhoria nas propriedades térmicas, confirmada pela análise de TGA. Embora não tenha sido possível realizar a análise em todas as amostras devido a problemas no laboratório destinado às análises, as cinco primeiras amostras apresentaram semelhanças no perfil termogravimétrico, confirmando a progressão das propriedades térmicas, além da confirmação de sua biodegradabilidade.

O método escolhido foi o delineamento experimental, com o objetivo de identificar uma formulação mais próxima de um material rígido. Embora as variáveis estatísticas não tenham atingido um valor significativo, a análise dos gráficos permitiu identificar possíveis melhorias para obter um material polimérico mais adequado às características desejadas. Isso inclui a busca por um material rígido, conseqüentemente mais denso, não apenas para a fabricação de filmes, como amplamente estudado, mas algo que, de fato, possa substituir os plásticos convencionais, apresentando propriedades hidrofóbicas e uma boa taxa de decomposição no ambiente natural. Os resultados indicam que, apesar de não ter atingido o ideal desejado, o trabalho fornece insights importantes para pesquisas futuras na busca por um biopolímero mais adequado.

Sugere-se, para trabalhos futuros, estender o tempo de secagem em estufa e realizar análises adicionais, como microscopia eletrônica de varredura, a fim de compreender melhor a conformação do material e propor melhorias. Além disso, recomenda-se a realização de análises de resistência mecânica e resistência à água. Seria interessante estudar a possibilidade de substituir o plastificante glicerol por óleo, considerando sua viabilidade econômica como alternativa. Essas abordagens podem enriquecer ainda mais a compreensão e aprimoramento do material em questão.

REFERÊNCIAS

ANJOS, Adilson dos. **PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS I**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. 98 p. Disponível em:
<https://docs.ufpr.br/~aanjos/CE213/apostila.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2023.

BABAEI, Mehran; JONOBI, Mehdi; HAMZEH, Yahya; ASHORI, Alireza. **Biodegradability and mechanical properties of reinforced starch nanocomposites using cellulose nanofibers**. *Carbohydrate Polymers*, [S.L.], v. 132, p. 1-8, nov. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.043>.

BALAKRISHNAN, Preetha; GOPI, Sreerag; S, Sreekala M; THOMAS, Sabu. **UV resistant transparent bionanocomposite films based on potato starch/cellulose for sustainable packaging**. *Starch - Stärke*, [S.L.], v. 70, n. 1-2, 24 out. 2017. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1002/star.201700139>.

BANGAR, Sneha Punia; WHITESIDE, William Scott. **Nano-cellulose reinforced starch bio composite films- A review on green composites**. *International Journal Of Biological Macromolecules*, [S.L.], v. 185, p. 849-860, ago. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.017>.

BASTOS, Cleide dos Anjos. **Obtenção de nanocompósitos a base de bentonita, amido e quitosana**. 2012. 89 f. Tese (Dissertação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BATISTA, Carolina. **Amido**. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em:
<https://www.todamateria.com.br/amido/>. Acesso em: 3 dez. 2023

BELBOOM, Sandra; LÉONARD, Angélique. **Does biobased polymer achieve better environmental impacts than fossil polymer? Comparison of fossil HDPE and biobased HDPE produced from sugar beet and wheat**. *Biomass And Bioenergy*, [S.L.], v. 85, p. 159-167, 22 dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.014>.

BRITO, Gustavo de Figueiredo, et al. **“Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes”**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, vol. 6, nº 2, set. 2011, p. 127–139, disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/222/204>>. Acesso em: 17 maio de 2023.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8ª Edição, 2012.

CHILOECHES, A. et al. **Antibacterial and compostable polymers derived from biobased itaconic acid as environmentally friendly additives for biopolymers**. *Polymer Testing*, Madri, v. 109, p. 107541, mar. 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107541>.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**. 2012. 48 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em:
https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado_Anexo.pdf. Acesso em: 19 nov. 2023.

DIAYANA, Z. N. et al. **Physical Properties of Thermoplastic Starch Derived from Natural Resources and Its Blends: a review**. *Polymers*, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 1396, 26 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13091396>.

DOMINICI, Franco; GIGLI, Matteo; ARMENTANO, Ilaria; GENOVESE, Laura; LUZI, Francesca; TORRE, Luigi; MUNARI, Andrea; LOTTI, Nadia. **Improving the flexibility and compostability of starch/poly(butylene cyclohexanedicarboxylate)-based blends**. *Carbohydrate Polymers*, [S.L.], v. 246, p. 116631, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116631>.

European Bioplastics: Bioplastics market data. 2022. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org/market/>. Acesso em: 31 maio 2023.

FERRO, Daniel Cabral Ribeiro. **Produção e Caracterização de Embalagem à Base de Papel Pós-Consumo e Componentes de Fonte Renovável**. Monografia. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, ago. 2015. Disponível em <https://metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/projeto-de-graduacao/2015-1/142--133/file>. Acesso em: 04 abril 2023.

FRANCHETTI, Sandra Mara Martins; MARCONATO, José Carlos. **Polímeros biodegradáveis - uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos**. *Química Nova*, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 811-816, jul. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000400031>.

Idr-Paraná. Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR-EMATER. **Boletim Agrometeorológico do IDR-Paraná de outubro marcado por excesso de chuvas no Paraná**. 2023. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Noticia/Boletim-agrometeorologico-do-IDR-Parana-de-outubro-marcado-por-excesso-de-chuvas-no-Parana>. Acesso em: 11 nov. 2023.

IRFAN T.N. Mohammed, et al. **Waste paper as a viable sustainable source for cellulosic extraction by chlorine free bleaching and acid hydrolysis method for the production of PVA-starch/cellulose based biocomposites**. *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.805>.

IURCKEVICZ, Genice; MARQUES, Patricia T.; LIMA, Vanderlei Aparecido de. **Chemical and Chemometric Analysis of Modified Starch Matrices for Sodium Trimetaphosphate**. *Revista Virtual de Química*, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 1462-1480, 14 nov. 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170085>.

JIAN, Jiao; XIANGBIN, Zeng; XIANBO, Huang. **An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT**. *Advanced Industrial And Engineering Polymer Research*, Guangzhou, v. 3, n. 1, p. 19-26, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>.

KARAN, Hakan, et al. **“Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy”**. *Trends in Plant Science*, vol. 24, nº 3, março de 2019, p. 237–249. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010>.

KAUR, Kuljit; JINDAL, Rajeev; MAITI, Mithu; MAHAJAN, Shreya. **Studies on the properties and biodegradability of PVA/Trapa natans starch (N-st) composite films and PVA/N-st-g-poly (EMA) composite films**. *International Journal Of Biological Macromo-*

lecules, [S.L.], v. 123, p. 826-836, fev. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.134>.

LI, Haiming et al. **Starch and its derivatives for paper coatings: a review. Progress In Organic Coatings**, [S.L.], v. 135, p. 213-227, out. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.015>.

MANIGLIA B. C. (2017). **Aproveitamento de resíduos agroindustriais para elaboração de filmes biodegradáveis**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, SP.

MANO, Eloisa Biasotto. Introdução. In: MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. Cap. 1. p. 1-4.

MALEKZADEH, Elham et al. **Preparation, characteristics, and soil-biodegradable analysis of corn starch/nanofibrillated cellulose (CS/NFC) and corn starch/nanofibrillated lignocellulose (CS/NFLC) films. Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 309, p. 120699, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120699>.

MARTINS, Thaís Frutuoso et al. **Princípio de Arquimedes: Do Treinamento Virtual a Execução Experimental**. Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI, Seropédica, v. 11, n. 21, p. 199-205, out. 2015. Disponível em: <https://encurtador.com.br/eIP57>. Acesso em: 08 nov.

MENDES, Fernanda Miranda. **Produção e Caracterização de Bioplásticos a partir de Amido de Batata**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.75.2009.tde-11032010-104107>. Acesso em: 11 nov. 2023.

NURAZZI N. M., ASYRAF M. R. M., RAYUNG M., NORRRAHIM M. N. F., SHAZLEEN S. S., RANIM. S. A., ABDANK K. (2021). **Thermogravimetric analysis Properties of cellulosic natural fiber polymer composites: a review on influence of chemical treatments. Polymers**, 13 (16), 2710.

QUEIROZ L. H. S. **Preparação e caracterização de um novo filme a partir do amido de babaçu usando o sorbitol como plastificante**. (2018). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Maranhão, Imperatriz, Brasil.

SCHLEMMER, Daniela; SALES, Maria J. A.; RESCK, Inês S.. **Preparação, caracterização e degradação de blendas PS/TPS usando glicerol e óleo de buriti como plastificantes. Polímeros**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 6-13, 5 fev. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282010005000002>.

SCHLEMMER, Daniela; SILVA, Tamillis M. da; SALES, Maria J. A. **Análise térmica de nanocompósitos de amido termoplástico e montmorilonita**. 2013. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/638.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2023.

SOUZA, Marcus Vinicius de Carvalho; SANTOS JÚNIOR, José Ribeiro dos; SILVA, Ron-denelly Brandão da; SANTOS, Lisiane Pires Martins dos; ANDRADE, Izane Luisa Xavier Carvalho; FREIRE, Silvana de Oliveira; MELO, Suely Moura. **Desempenho físico-químico, térmico e mecânico de biopolímero à base do amido do mesocarpo do coco babaçu**. Research, Society And Development, [S.L.], v. 12, n. 7, 23 jul. 2023. Research, Society and De-

velopment. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i7.42604>. Acesso em: 06 nov. 2023.

SZPIŃYK, Marzena; LUBCZAK, Renata; LUBCZAK, Jacek. **The biodegradable cellulose-derived polyol and polyurethane foam**. *Polymer Testing*, [S.L.], v. 100, n. 8, p. 107250-107263, 02 jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107250>.

SUEIRO, Ana Claudia; FARIA-TISCHER, Paula C. S.; LONNI, Audrey A. S. G.; MALI, Suzana. **BIODEGRADABLE FILMS OF CASSAVA STARCH, PULLULAN AND BACTERIAL CELLULOSE**. *Química Nova*, [S.L.], v. 39, n. 9, p. 1059-1064, 2016. GN1 Sistemas e Publicacoes Ltd.. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20160118>.

TEIXEIRA, Maria Betânia D'Henri et al. **O Papel: Uma Breve Revisão Histórica, Descrição da Tecnologia Industrial de Produção e Experimentos para Obtenção de Folhas Artesanais**. *Revista Virtual de Química*, Brasília, v. 9, n. 3, p. 1364-1380, 20 jul. 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170079>.

VIEIRA, M.G.A.; ROCHA, S.C.s.. **Drying conditions influence on physical properties of recycled paper**. *Chemical Engineering And Processing - Process Intensification*, [S.L.], v. 46, n. 10, p. 955-963, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2007.06.006>.

VIGNESHWARAN, Nadanathangam; AMMAYAPPAN, L.; HUANG, Qingrong. **Effect of Gum arabic on distribution behavior of nanocellulose fillers in starch film**. *Applied Nanoscience*, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 137-142, 24 ago. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13204-011-0020-5>.

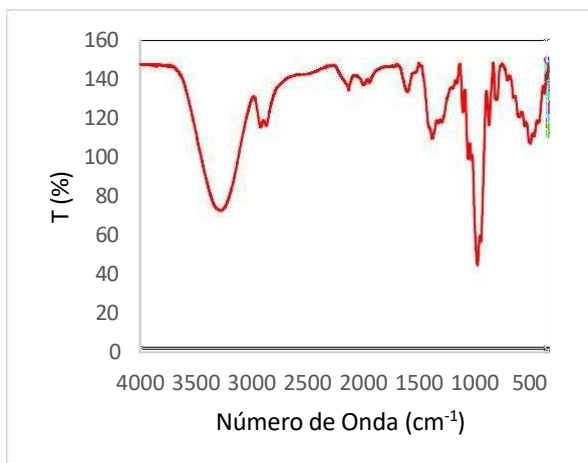
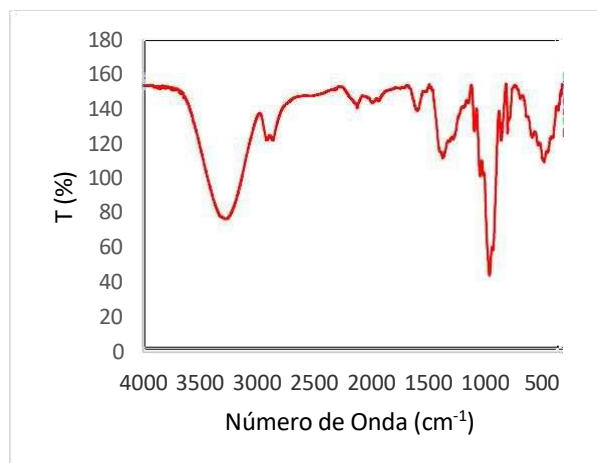
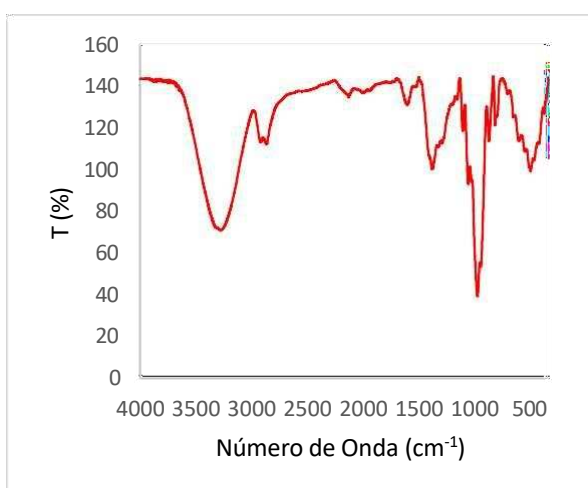
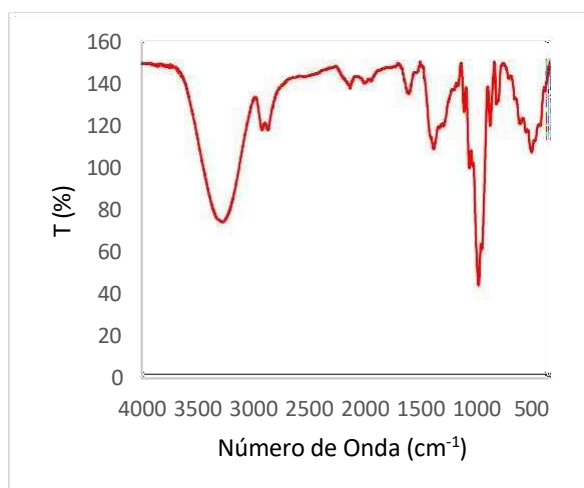
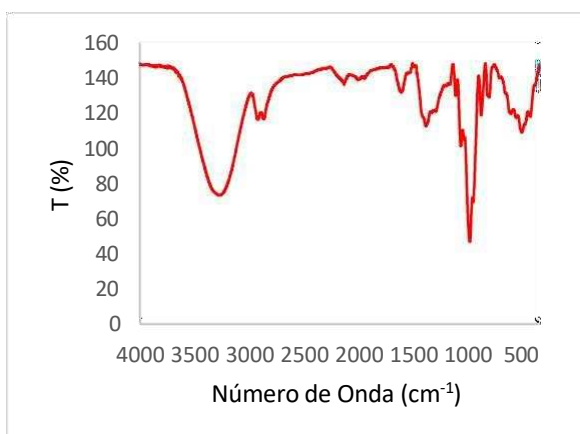
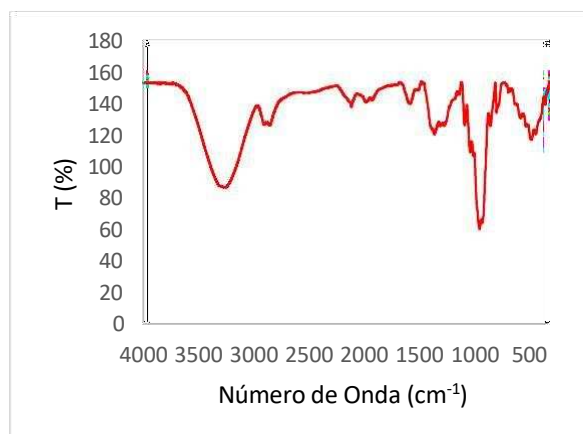
WALKER, S.; ROTHMAN, R.. **Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: a review**. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 261, p. 121158, 23 mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>.

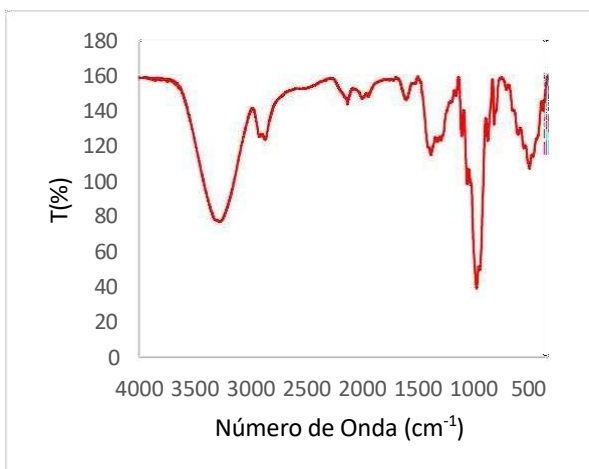
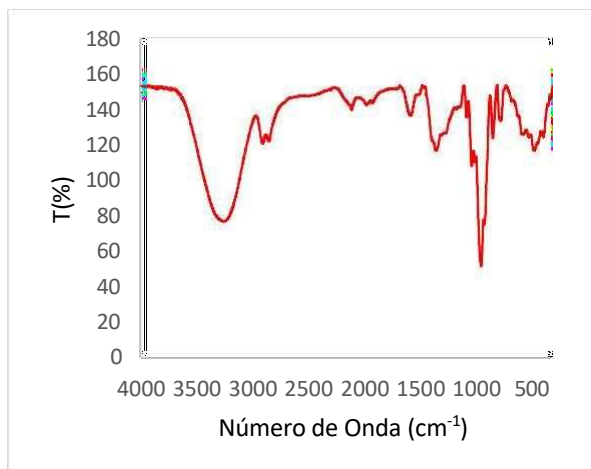
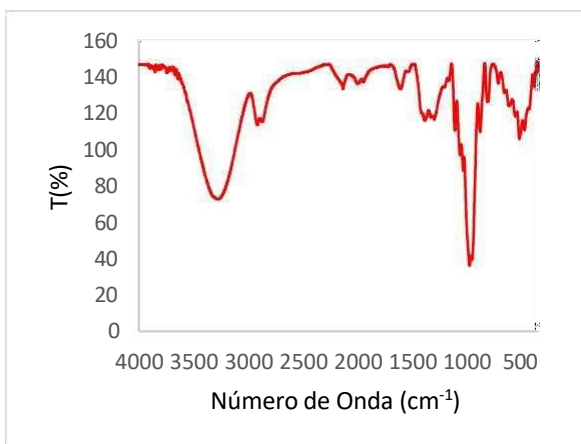
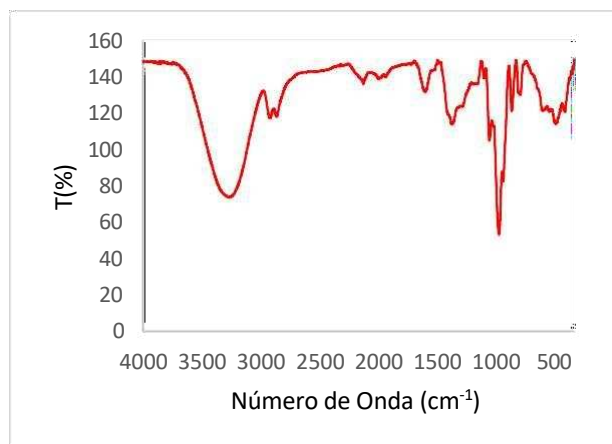
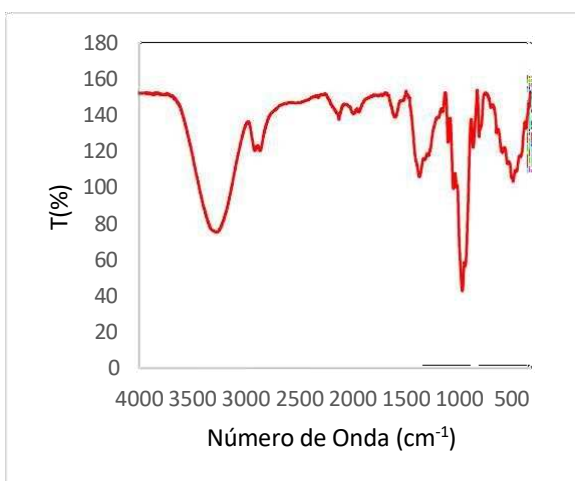
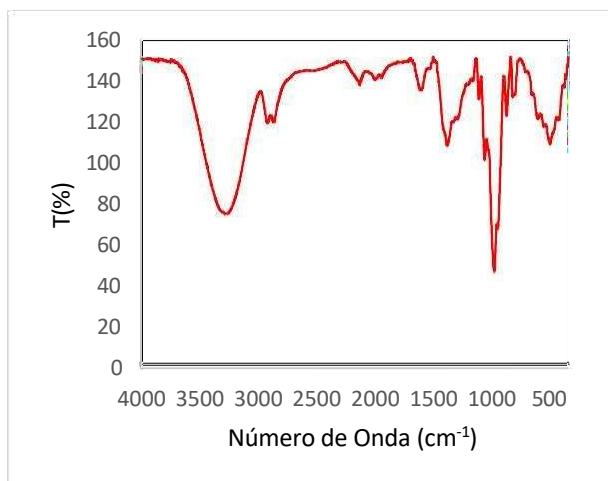
WANG, Shen et al. **Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications**. *Carbohydrate Polymers*, [S.L.], v. 307, p. 120627, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120627>.

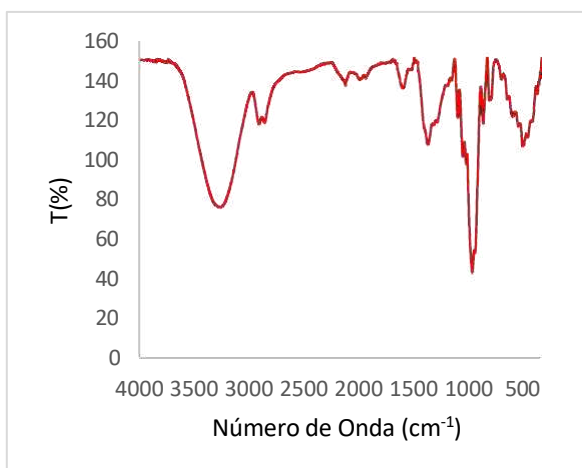
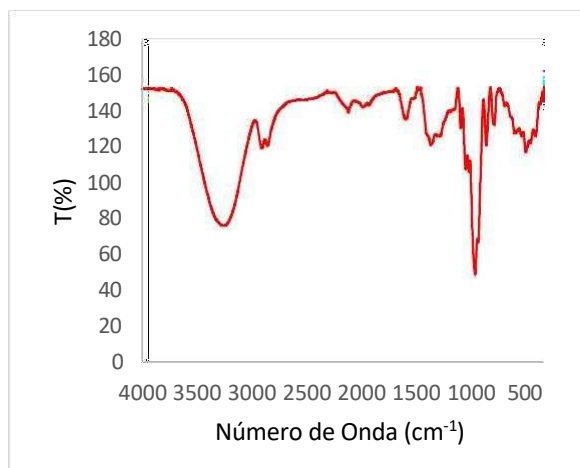
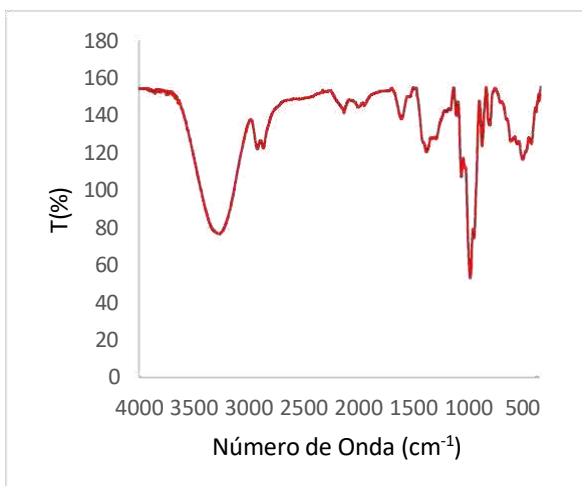
WEI, Xinyang et al. **Correlation between interfacial adhesion and functional properties of corn stalk cellulose-reinforced corn starch-based biodegradable straws**. *Industrial Crops And Products*, [S.L.], v. 189, p. 115881, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115881>.

APÊNDICE

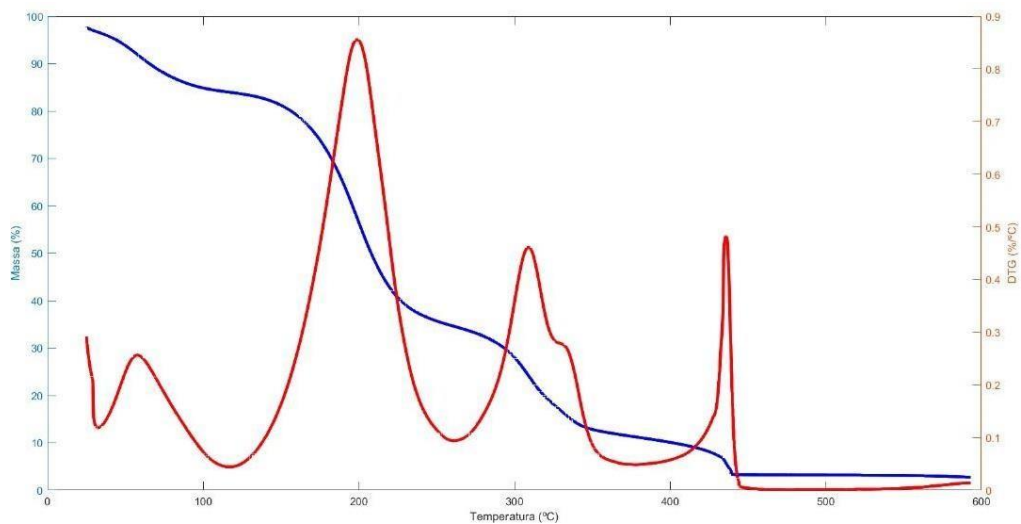
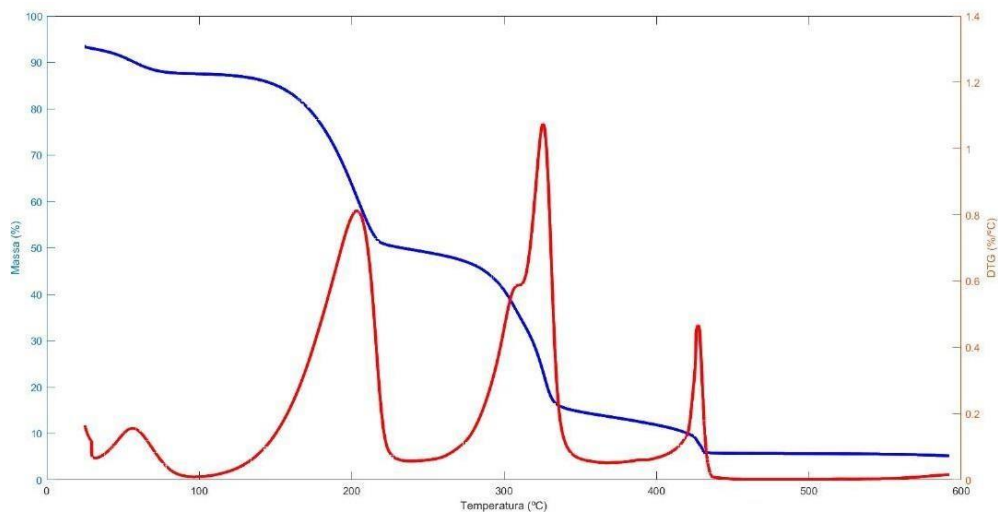
Espectros de infravermelho das demais amostras do biopolímero

G2**G3****G4****G5****G6****G7**

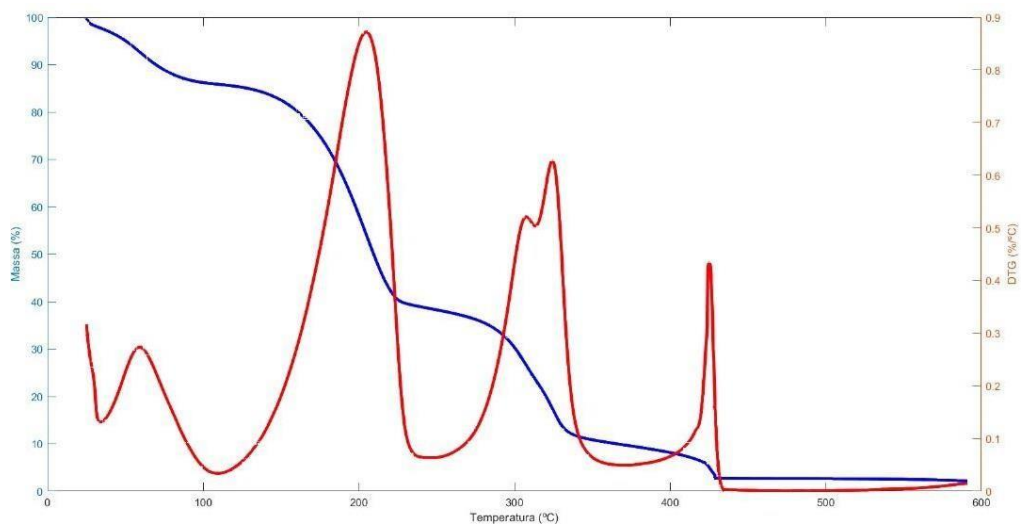
G8**G9****G10****G11****G12****G13**

G14**G15****G16**

TGA e DTD das 5 primeiras amostras do biopolímero

G2**G3**

G4



G5

