



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA INDUSTRIAL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E SUPERFICIAIS DE
BIOPLÁSTICOS À BASE DE AMIDO E REFORÇADOS COM BAGAÇO DE CANA-
DE-AÇÚCAR E SISAL**

DENNER CUNHA SIQUEIRA

JOÃO PESSOA – PB

2025

DENNER CUNHA SIQUEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Química Industrial da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento aos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Química Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Elson Soares Filho

JOÃO PESSOA – PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S618a Siqueira, Denner Cunha.

Avaliação das propriedades mecânicas e superficiais de bioplásticos à base de amido e reforçados com bagaço de cana-de-açúcar e sisal / Denner Cunha Siqueira. - João Pessoa, 2025.
63 f.

Orientação: José Elson Soares Filho.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Bagaço da cana-de-açúcar. 2. Amido de batata. 3. Sisal. 4. Bioplástico. I. Soares Filho, José Elson. II. Título.

UFPB/CT

CDU 581.19(043.2)

DENNER CUNHA SIQUEIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E SUPERFICIAIS DE
BIOPLÁSTICOS À BASE DE AMIDO E REFORÇADOS COM BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR E SISAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do
Curso de Química Industrial da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento aos requisitos
para obtenção do título de
Bacharel em Química Industrial.
Aprovado em: 13/10/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Elson Soares Filho

Orientador – Departamento de Engenharia Química/CT/UFPB

Profa. Dra. Rebeca Tibau Aguiar Dias

Examinador

William Cesar Livramento Silva, Doutorando - UFPB

Examinador

A todos que acreditaram em mim,

Dedico

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por nos conceder a vida.

Aos meus familiares, em especial aos meus amados pais: Elaine e Davi, por tudo que fizeram por mim.

À minha amada avó, Irene e minha amada tia, Eliud, por todo o apoio.

Aos meus amigos de curso, que me apoiaram quando mais precisei.

Ao programa Apoio Universitário, pela bolsa de estudo concedida.

Ao meu orientador deste trabalho, professor Elson.

À professora Rebeca, pelo suporte na etapa final.

Aos técnicos Ted, Rafael e Chico, pela ajuda nos procedimentos.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar a produção de bioplástico a partir do bagaço da cana-de-açúcar e fibras de sisal. Tais matérias-primas possuem grande abundância no Brasil e, só na Paraíba, milhões de toneladas de bagaço são produzidas por safra. Por causa de toda a problemática ambiental que plásticos convencionais ocasionam ao meio ambiente, este trabalho irá tentar melhorar a forma de produção de um bioplástico usando bagaço da cana e fibras de sisal de uma metodologia previamente escolhida para realização dos experimentos. Tal metodologia aborda a importância de um tratamento alcalino nas fibras no intuito de melhorar suas respostas, isto é, um bioplástico com propriedades semelhantes ao dos plásticos de origem petroquímicas. Um bioplástico deve possuir a vantagem de ser biodegradável, ao contrário dos plásticos convencionais além de boas propriedades mecânicas, por exemplo. Além do tratamento alcalino, foi utilizado fécula de batata como agente para formar o filme bioplástico, uma vez que é um reagente rico em amido e fornecedor de glicose para a reação. Os filmes desenvolvidos foram analisados por ensaios de tração e perfilometria, apresentando sua resistência e rugosidade. Além disso, suas propriedades visuais como cor e disposição das fibras nos filmes foram avaliadas. Os resultados de resistência à tração e rugosidades foram comparados com a literatura e mostraram-se promissores, em especial para as fibras de sisal.

Palavras-chave: bagaço da cana-de-açúcar; sisal; bioplástico; amido de batata.

ABSTRACT

This work aims to study the production of bioplastic from sugarcane bagasse and sisal fibers. These raw materials are abundant in Brazil, and in Paraíba alone, millions of tons of bagasse are produced per harvest. Due to the environmental problems that conventional plastics pose to the environment, this work will attempt to improve the production method of a bioplastic using sugarcane bagasse and sisal fibers using a methodology previously chosen for the experiments. This methodology addresses the importance of alkaline treatment of the fibers to improve their performance—that is, a bioplastic with properties similar to those of petrochemical-based plastics. A bioplastic must have the advantage of being biodegradable, unlike conventional plastics, as well as good mechanical properties, for example. In addition to the alkaline treatment, potato starch was used as the agent to form the bioplastic film, as it is a starch-rich reagent and a glucose supplier for the reaction. The developed films were analyzed using tensile and profilometry tests, demonstrating their strength and roughness. Furthermore, their visual properties, such as color and fiber arrangement, were evaluated. The tensile strength and roughness results were compared with the literature and showed promising results, especially for sisal fibers.

Keywords: sugarcane bagasse; sisal; bioplastic; potato starch.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
3.1 Estudos sobre bioplásticos	5
3.2 Importância dos bioplásticos	8
3.3 Bagaço-de-cana.....	11
3.4 Sisal	12
3.5 Amido de batata	12
4 METODOLOGIA	14
4.1 Escolha da metodologia	14
4.2 Aquisição da matéria-prima	14
4.3 Materiais, equipamentos e laboratórios.	14
4.4 Tratamento das amostras	15
4.5 Caracterização.....	15
4.5.1 Determinação de quantidade de extrativos, celulose, hemicelulose e lignina	15
4.6 Preparação de filmes bioplásticos a partir de BCA, sisal e fécula de batata.	20
4.7 Análise das propriedades mecânicas e superficiais dos filmes bioplásticos.....	26
4.7.1 Resistência à tração	26
4.7.2 Perfilometria.....	27
5 RESULTADOS	29
5.1 Caracterização.....	29
5.2 Análises de resistência à tração	31
5.2.1. Análises de resistência à tração para BCA	31
5.2.2 Análises de resistência à tração para filme bioplástico com sisal	31
5.2.3 Análises de resistência à tração para filme bioplástico com fécula de batata	32
5.3 Análises de perfilometria	33
5.3.1 Análises de perfilometria para filme bioplástico com BCA	33
5.3.2 Análises de perfilometria para filme bioplástico com sisal	34
5.3.3 Análises de perfilometria para filme bioplástico com fécula de batata	35
5.4 Comparações dos resultados.....	36
5.5 Aspectos visuais e sensoriais dos filmes bioplásticos	38
6 CONCLUSÃO.....	39

REFERÊNCIAS	40
APÊNDICE A – Gráficos de resistência à tração para amostras com BCA	44
APÊNDICE B – Gráficos de resistência à tração para amostras com sisal	45
APÊNDICE C – Gráficos de resistência à tração para amostras com fécula de batata.....	46
APÊNDICE D – Imagens da frente de filme com BCA	47
APÊNDICE E – Imagens de perfil para amostrfilme com BCA	48
APÊNDICE F – Imagens do verso de filme com BCA	49
APÊNDICE G – Imagens da frente de filme com sisal	50
APÊNDICE H – Imagens de perfil de filme com sisal	51
APÊNDICE I – Imagens do verso de filme com sisal	52
APÊNDICE J – Imagens da frente de filme com fécula de batata	53
APÊNDICE K – Imagens de perfil de filme com fécula de batata	54

1 INTRODUÇÃO

A crescente produção de plásticos não degradáveis numa sociedade cada vez mais consumidora é uma grande preocupação mundial, tendo em vista seus impactos negativos ao meio ambiente. Só no Brasil, cerca de 10 milhões de toneladas de resíduos plásticos são geradas ao ano. Um número muito alto para ser totalmente reciclado, uma vez que o país não é uma grande referência em reciclagem de plásticos (1, 2).

Em contrapartida, também há uma crescente demanda pela utilização de plásticos biodegradáveis, que são materiais que podem sofrer degradação da microbiota presente no ambiente causando sua eliminação (3). Logo, seria uma alternativa mais sustentável ambientalmente já que diminuiria custos com reciclagem e diminuiria problemas ambientais.

Os bioplásticos, ou plásticos degradáveis, são um tipo de material projetado para não resistir às variáveis do ambiente devido à sua composição molecular ser diferente de um plástico convencional produzido por petróleo, este projetado para não resistir às intempéries do ambiente. Vale ressaltar que plásticos não degradáveis também possuem certas vantagens, pois certos materiais e situações necessitam de algo mais resistente. A biodegradabilidade deve ser escolhida, portanto, com cuidado (4).

Há uma classificação de plásticos degradáveis segundo Schreiner (4), que são: plástico biodegradável, fotodegradável e degradável por oxidação. O biodegradável é o mais comum e pode sofrer degradação de gases, água e compostos inorgânicos. No presente trabalho, será explorado plásticos biodegradáveis produzidos a partir do bagaço da cana-de-açúcar e fibras de sisal com base em amido, justamente por serem matérias-primas abundantes e muito utilizadas no Brasil.

Só na Paraíba, cerca de 7 milhões de toneladas do bagaço da cana-de-açúcar foram produzidas na safra 2022/2023, deixando o estado na terceira colocação de produtores no nordeste (5). Já para o sisal, sua produção no Brasil fica em grande parte concentrada no estado da Bahia, sendo produzida cerca de 140 mil toneladas dessa fibra por ano e com metade dessa quantidade sendo exportada (6). Deste

modo, irá se explorar uma forma de atribuir um novo destino para esses insumos para a produção de bioplásticos.

Além de ser usado como biomassa em caldeiras (7), o bagaço da cana-de-açúcar pode ser usado como reforço para produção de bioplástico, criando mais uma alternativa para essa matéria-prima. Na Paraíba, nove usinas sucroalcooleiras atuam no estado e trabalham com a cana-de-açúcar, são elas: São João, D'Pádua, Agroval, Miriri, Giasa, Monte Alegre, Tabu, Sapé e Japungu (7).

Ademais, o bagaço da cana-de-açúcar não deve conter células medulares, isto é, um baixo teor de celulose. Uma alta concentração de células medulares não é recomendado para a produção de biopolímeros (8). O BCA é uma matéria-prima rica em celulose e hemicelulose, representando cerca de 70% de sua massa. Além dos elementos mencionados, o bagaço também contém lignina, o que o classifica como uma biomassa lignocelulósica. Em estudos relativamente recentes (2015 a 2016), conseguiram-se dar finalidades importantes (transformá-lo em bioplástico) para o BCA por meio de Transesterificação Homogênea (9) e reação usando Anidrido ftálico em líquido iônico (10).

Em outro estudo, conseguiram estudar o comportamento do bagaço-de-cana quando reforçado com amido de batata para melhorar às propriedades estruturais do bioplástico à ser produzido, isto é, em tal estudo foi produzido um material compósito (11). Materiais compósitos nada mais são do que produtos da junção de materiais diferentes com o intuito de melhorar suas propriedades estruturais.

Já, para o sisal, sua composição varia de 60-70% de celulose, 10-20% de hemicelulose e uma quantidade de lignina em torno de 20-30%, esta última pouco menor comparada ao BCA (12). Além disso, é uma matéria-prima com baixo teor de impurezas e com grande capacidade de resistência à tração, uma vez que é usado na preparação, por exemplo, de cordas que podem ser usadas para diversas finalidades (13).

Assim sendo, os problemas ambientais em torno dos plásticos não degradáveis vem aumentando ao longo do tempo e, semelhantemente, alternativas para resolver tal problema. Os bioplásticos são uma alternativa promissora e que podem ganhar espaço no mercado se forem mais estudados e aprimorados. Assim, o presente

trabalho se propõe a abordar o desenvolvimento de um bioplástico que seja menos poluente para o meio ambiente e também de fornecer mais um destino para o bagaço da cana-de-açúcar e fibras de sisal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Desenvolver bioplásticos a partir do bagaço da cana-de-açúcar e fibras de sisal usando amido de batata como forma de reforçar suas propriedades.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as porcentagens de celulose, hemicelulose e lignina das fibras de bagaço cana-de-açúcar e sisal.
- Estudar o comportamento do filme bioplástico com amido de batata quando reforçado com bagaço da cana-de-açúcar e fibras de sisal
- Avaliar a resistência mecânica e rugosidade dos filmes bioplásticos desenvolvidos.
- Propor um destino ambientalmente melhor para o BCA e sisal.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Estudos sobre bioplásticos

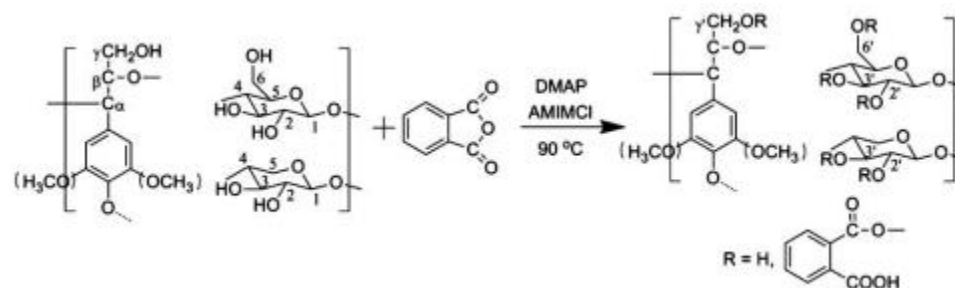
Um bioplástico deve ser um material que possua biodegradabilidade e seja oriundo de uma biomassa. Além disso, suas propriedades físico-químicas são ou podem ser semelhantes aos plásticos convencionais das indústrias petroquímicas (8). Embora, atualmente, seu custo de produção não seja atrativo é um material que apresenta um futuro promissor na indústria por suas vantagens ambientais.

Existem formas de se converter o BCA em bioplástico (ou um filme bioplástico) por Transesterificação Homogênea (9) ou por Modificação Homogênea com Anidrido Ftálico em Líquido iônico (10), por exemplo. Usando outras metodologias, a conversão BCA para bioplástico não é um trabalho fácil.

No estudo feito por (9), foi utilizada uma transesterificação homogênea para produzir um bioplástico produzido a partir de solventes compostos por ésteres, em especial três ésteres vinílicos: acetato de vinila, benzoato de vinila e laurato de vinila. Na prática, foi estudado o comportamento do EmimAc com os ésteres citados avaliando a sua capacidade de converter o BCA em um filme plastificado. No estudo em questão, foi produzido um filme bioplástico com bom desempenho, além de ser um processo que não necessitou de um pré-tratamento no BCA.

Em outro estudo realizado, o uso de Anidrido Ftálico (AF) em Líquido iônico (AMIMCL) mostrou-se uma alternativa eficaz na produção de um filme bioplástico com boas propriedades físicas, isto é, resistência à tração, solubilidade em solventes como DMSO e DMF, além de baixa ruptura (10). Nesse caso uma modificação química foi necessária para melhorar os resultados, isto é, com a esterificação homogênea do BCA em AF usando o composto 1-alil-3-metilimidazólio, conhecido por AMIMCL, houve a preparação de um ftalato de bagaço da cana-de-açúcar que pode ser observado na figura 3.1.

Figura 3.1 - Modificação química do bagaço da cana com AF em AMIMCl.



Fonte: adaptado de (10).

Logo, em tal estudo, explorou-se as capacidades das hidroxilas presentes no bagaço da cana-de-açúcar (conforme representado no composto mais à esquerda da Figura 1) em serem substituídas por grupos éster (esterificação), potencializando as propriedades do BCA em se transformar num bioplástico. Observou-se, para esse caso, as massas do BCA antes e depois da modificação para calcular o ganho de peso percentual (GPP) e estudar o que acontece quando a quantidade de AF varia com a de bagaço.

$$GPP = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad Eq\ 3.1$$

É importante ressaltar que, na prática, a proporção de AF por BCA variou de 1:1 até 5:1 g/g, observando o comportamento do ftalato de bagaço da cana-de-açúcar se era solúvel em solventes como a acetona, por exemplo. Observou-se que a relação de AF/BCA deve ser maior que 3:1 para melhores resultados, conforme tabela 1.

Tabela 3.1 – Bagaço da cana-de-açúcar e sua solubilidade.

Entrada	Dosagem de AF (g/g)	GPP (%)	DMSO	Solúvel +		Insolúvel -
				DMF	Acetona	CHCL3
AF0	0:1	-2,18	-	-	-	-
AF1	1:1	5,58	-	-	-	-
AF2	2:1	9,08	-	-	-	-
AF3	3:1	32,9	+	+	-	-
AF4	4:1	96,1	+	+	-	-
AF5	5:1	126	+	+	-	-

Fonte: Adaptado de (10).

Vale ressaltar que, em ambos os trabalhos (9,10), foram realizados estudos de MEV, FT-IR, TGA, módulo de Young e resistência à tração, justamente para analisar o comportamento do BCA em específico. Tais análises são de extrema importância para analisar às características do bagaço-de-cana e verificar alterações na sua estrutura.

Em um outro estudo, datado de 2018, investigaram a concentração ótima de celulose presente do BCA para produção de filme bioplástico usando quitosana e sorbitol como agente plastificante (14). Estes últimos compostos foram usados para incrementar as propriedades mecânicas do BCA, o qual apenas foi variado a sua quantidade em massa.

Nos estudos citados anteriormente, apenas foram trabalhados com o bagaço-de-cana e mais algum outro solvente na produção do filme bioplástico. Pode-se dizer que, por ser mais simples trabalhar apenas com dois fatores (BCA e solvente), seja mais vantajoso. Entretanto, a incorporação de um novo material numa biomassa como o bagaço-de-cana pode ter grandes resultados e ser uma nova rota para produção de plásticos sustentáveis. Logo, é crucial o estudo de bioplásticos feitos a partir da junção de novas matérias-primas.

Assim, foi explorado a capacidade de certos materiais de se unirem para formar um produto com propriedades únicas, isto é, um material compósito (11). O compósito em questão foi preparado da união do bagaço-de-cana com amido de batata no intuito de desenvolver um bioplástico mais reforçado e apto para atender certas necessidades. Além disso, também foi avaliado um tratamento químico alcalino nas fibras de BCA para avaliar suas propriedades e a potencialização dos resultados.

Observou-se que o tratamento alcalino foi responsável por modificar grande parte da superfície do bagaço-de-cana comparado com as fibras de BCA não tratadas alcalinicamente. A análise de MEV foi crucial para verificar tal impacto, pois foi comprovado que a superfície das fibras tratadas com NaOH estavam com certas rupturas, indicando uma remoção do teor de lignina, hemicelulose e ceras. Estas últimas, se tratando de sua remoção, foram ainda mais comprovadas nas análises seguintes.

Uma vez observado que o tratamento alcalino foi responsável por modificar a estrutura do BCA, logo, se o sisal possui baixo teor de lignina, por exemplo, resultados melhores podem ser esperados já que a superfície do sisal seria modificada positivamente e, conseqüentemente, melhorando a interação com o amido de batata. Nos resultados, foi observado que a quantidade de lignina, hemicelulose e ceras do BCA tratado com hidróxido de sódio diminuíram enquanto que a de celulose aumentou, isto é, ficou mais disponível para o desenvolvimento do filme bioplástico.

3.2 Importância dos bioplásticos

Os bioplásticos surgiram da esperança de resolver os problemas ambientais gerados pelos plásticos derivados do petróleo, sendo sua biodegradabilidade importante para o planeta. São produtos que possuem degradação sob certas condições e devem ser escolhidos de acordo com a ocasião. De qualquer forma, são materiais que possuem grande poder de atuação em diversos segmentos, como indústrias de embalagens, aplicações medicinais e agricultura (15).

Ainda, segundo (15), uma das formas de classificar bioplásticos é de acordo com sua biodegradabilidade. De modo geral, podemos classificar em biodegradáveis e não biodegradáveis. Para os biodegradáveis, que são derivados de recursos naturais, podem englobar os seguintes materiais: poli(ácido láctico) (PLA), poli(hidroxialcanoato) (PHA) e poli(butileno succinato) (Bio-PBS). Já, para os não biodegradáveis, estão (Bio-PE), (Bio-PP) e o poli(tereftalato de etileno) (Bio-PET). Embora de origens renováveis, estes últimos não são biodegradáveis.

Existem diversos processos de produzir bioplásticos, mas as principais formas são: polimerização química, utilização de polímeros naturais e fermentação bacteriana de poliéster, conforme tabela 3.2 (15). Os bioplásticos, entretanto, podem possuir certas deficiências estruturais quando comparados com plásticos petroquímicos.

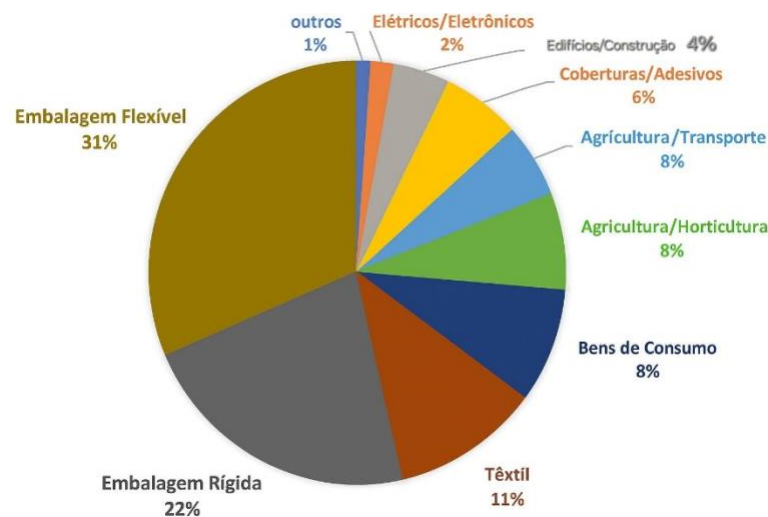
Tabela 3.2. Processo comum de síntese de bioplásticos

Síntese do processo		
	Processo	Produto
Bio-PE	Fermentação anaeróbica da glicose Destilação do bioetanol Desidratação em altas temperaturas com catalisador Polimerização do bioetileno	Bioetanol Mistura azeotrópica de etanol hidratado e vinhaça Bio-etileno Bio-PE
Bio-PP	Fermentação da glicose Desidratação do iso-butanol Etapas intermediárias Polimerização do bio-propileno	Iso-butanol Iso-butileno Bio-propileno Bio-PP
PBS	Fermentação bacteriana da glicose Hidrogenação do ácido succínico Esterificação entre diácido(ácido succínico) e diol (1-4, butanodiol) Policondensação em alta temperatura	Ácido succínico 1-4-butanodiol Butileno succinato PBS
PLA	Método ROP Fermentação da glicose e sucrose Remoção de água condensada, ácido mesolático e polímero de baixo peso molecular Recristalização Adição de coordenação/inserção, cátion e ânion(mecanismos iniciadores) para induzir a polimerização	Ácido láctico Lactida pura de alto peso molecular Ácido polilático

Fonte: Adaptado de (15).

Mundialmente, das 360 milhões de toneladas de plástico produzidas anualmente, 1% são de bioplásticos (16). Um valor baixo, porém com potencial de crescimento ainda neste século XXI. Bioplásticos de origem biológica já estão sendo aplicados em diversos setores, como: embalagens, têxtil e bens de consumo. Na figura, podemos observar estas últimas e outras aplicações (16).

Figura 3.2. Aplicações de bioplásticos.



Fonte: adaptado de (16).

Atualmente, estudos tentam aprimorar as capacidades dos bioplásticos reforçando-os com outras matérias-primas, sendo por meio de mistura de polímeros ou adição de carga. Esta última, refere-se a partículas ou fibras, ocasionando um reforço no compósito. No geral, cargas como amido é uma das mais utilizadas, justamente por ser uma fonte que pode ser encontrada na batata inglesa, por exemplo. Além disso, quando há a união do amido com as fibras, as propriedades dos bioplásticos são melhoradas (15).

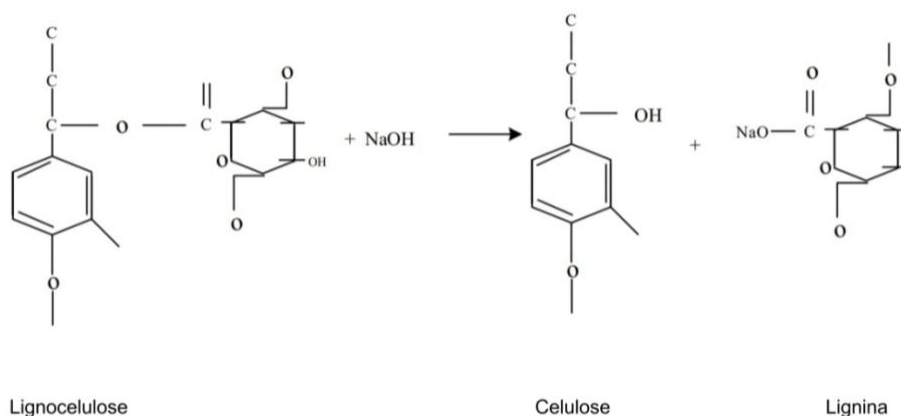
Materiais sintéticos como PP, fibra de carbono e fibra de vidro também podem ser usados como reforço no desenvolvimento de bioplástico, resultando em aumento de suas propriedades (15). No entanto, a compatibilidade entre o bioplástico e o reforço pode alterar sua biodegradabilidade (15).

3.3 Bagaço-de-cana

O bagaco-de-cana (*Saccharum spp.*) é uma matéria-prima rica em celulose e um biorecurso abundante no planeta terra. De acordo com (17), o BCA também apresenta capacidade de ser utilizado como matriz. Assim, o BCA pode ser utilizado em materiais compósitos, sendo muito procurado para esse tipo de aplicação.

Ainda conforme o estudo (17), uma das formas de melhorar a interação do BCA com outros componentes é usando $\text{NaOH}_{(s)}$ como forma de melhorar suas propriedades de adesão para, por exemplo, desenvolver placas compósitas. O hidróxido de sódio é responsável por decompor a biomassa lignocelulósica do BCA em moléculas de celulose e lignina, conforme figura abaixo. Quando ocorre essa decomposição, a celulose se torna disponível para interagir com outro componente e formar algum compósito de interesse.

Figura 3.3 - Decomposição da lignocelulose (bagaço-de-cana) quando tratada com $\text{NaOH}_{(aq)}$.



Fonte: adaptado de (17).

3.4 Sisal

O sisal (*Agave sisalana*) também é uma matéria-prima rica em celulose e bastante produzida no estado da Bahia. É encontrado na forma de planta e pode ser utilizado para a fabricação de fios que podem formar cordas, por exemplo. Dessa forma, possui grande aplicação e pode ser estudado o desenvolvimento de outros materiais, em especial de compostos biodegradáveis. Abaixo, macro e microestruturas do sisal.

Figura 3.4 - Folha (a), fibras (b) e microestruturas do sisal (c).



Fonte: adaptado de (12).

Uma vez que sua composição de celulose, hemicelulose e lignina do sisal é semelhante ao do BCA, pode-se estudar seu comportamento. Semelhantemente ao BCA, as fibras de sisal também podem ser tratadas de forma alcalina e verificar sua eficiência na produção de materiais biodegradáveis.

3.5 Amido de batata

O amido é um tipo de biopolímero natural que pode ser encontrado na batata, arroz ou milho. Além disso, fontes que não são convencionais, como raízes, cascas ou caroços de frutas podem ser utilizados como fonte de amido (17). Ainda segundo (17), filmes a base de amido possuem características negativas para o mercado como hidrofiliabilidade, baixas propriedades mecânicas e pouca resistência microbiana ou

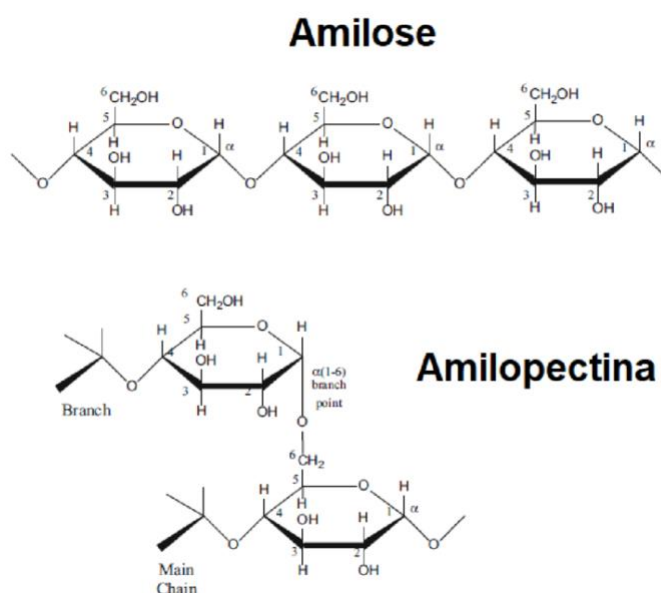
antioxidante. Entretanto, quando o amido é incorporado a alguma carga, por exemplo, suas capacidades são melhoradas.

O amido é um polímero formado pela sucessão da α -D-glicose e possui duas estruturas formadoras da matriz: amilose e amilopectina. Estas duas variam em quantidade para formar o amido em torno de 20-30% de amilose e 70-80% de amilopectina (18).

Para se trabalhar com o amido de batata precisa-se formar um filme compósito com duas fases distintas, mas complementares: uma matriz polimérica e uma carga, a qual pode ser oriunda de materiais orgânicos ou inorgânicos (18). Logo, pode-se trabalhar com o amido atuando como matriz polimérica ou, por exemplo, o bagaço-de-cana como carga ou agente de reforço.

Além disso, estudos indicam que o comportamento do amido quando utilizado como matriz polimérica em desenvolvimentos de bioplásticos pode ser melhorado na presença de um plastificante, segundo (19). Além disso, o plastificante deve possuir baixo peso molecular e atua como agente redutor das ligações de hidrogênio entre amilose e amilopectina. Diversas substâncias como glicerol, sorbitol, ureia, frutose, sacarose e glicol podem ser usadas como plastificantes (19).

Figura 3.5 - Moléculas componentes do amido.



Fonte: adaptado de (20).

4 METODOLOGIA

4.1 Escolha da metodologia

Neste projeto, para a produção de bioplásticos a partir do bagaço da cana-de-açúcar e sisal reforçados com amido de batata, foi escolhida a metodologia seguida no estudo de (11). Adaptações foram necessárias para as realizações dos experimentos, uma vez que no trabalho citado não foi especificado certos detalhes.

4.2 Aquisição da matéria-prima

O bagaço-de-cana e sisal foram adquiridos via doação de uma discente da UFPB, sendo estes já entregues moídos. As fibras foram moídas em um moinho de facas, presente no Laboratório de Operações Unitárias, o qual fica localizado no Centro de Tecnologia.

4.3 Materiais, equipamentos e laboratórios.

A grande maioria dos materiais e vidrarias foram disponibilizados pelos laboratórios da UFPB, sendo estes o Laboratório de Operações Unitárias (LOU) e o Laboratório de Petróleo (LaPet). Já, para as análises de perfilometria e ensaios de tração, o Laboratório Integrado de Biomateriais (LABIO) foi crucial para tais análises.

- Bagaço-de-cana de cana moído e com mesh 65 ($\approx 212 \mu\text{m}$)
- Sisal moído e com mesh 40 ($\approx 425 \mu\text{m}$)
- Chapas de aquecimento
- Vidrarias
- Solução de NaOH a 5%
- Solução de Cloreto de Bário à 10%
- Ácido Sulfúrico concentrado em 98%
- Moinho de facas SL - 31
- Dessecador

- Incubadora
- Mufla
- Perfilômetro Talysurf CCI MP-Lite (Taylor Hobson)
- Máquina Universal de Ensaio

4.4 Tratamento das amostras

O tratamento do BCA e sisal foram feitos previamente para melhorar a resposta das matérias-primas. No estudo realizado em (11), foi observado que um tratamento alcalino é necessário para diminuir a quantidade de lignina presente no bagaço-de-cana, isto é, foi identificado que o uso de NaOH (5%) possui capacidade de melhorar os resultados do desenvolvimento do filme bioplástico.

4.5 Caracterização

4.5.1 Determinação de quantidade de extrativos, celulose, hemicelulose e lignina

Em primeiro lugar, conforme descrito em (11), foi feita uma caracterização das fibras para averiguar seus teores de quantidade de extrativos, celulose, hemicelulose e lignina. Neste caso, o tratamento alcalino com NaOH foi mantido segundo a metodologia já citada. Além disso, para se determinar tais teores as análises foram feitas em sequência, isto é, com a massa que sobrou da determinação da quantidade de extrativos foi usada para determinar o teor de hemicelulose, mantendo essa ordem para lignina e celulose.

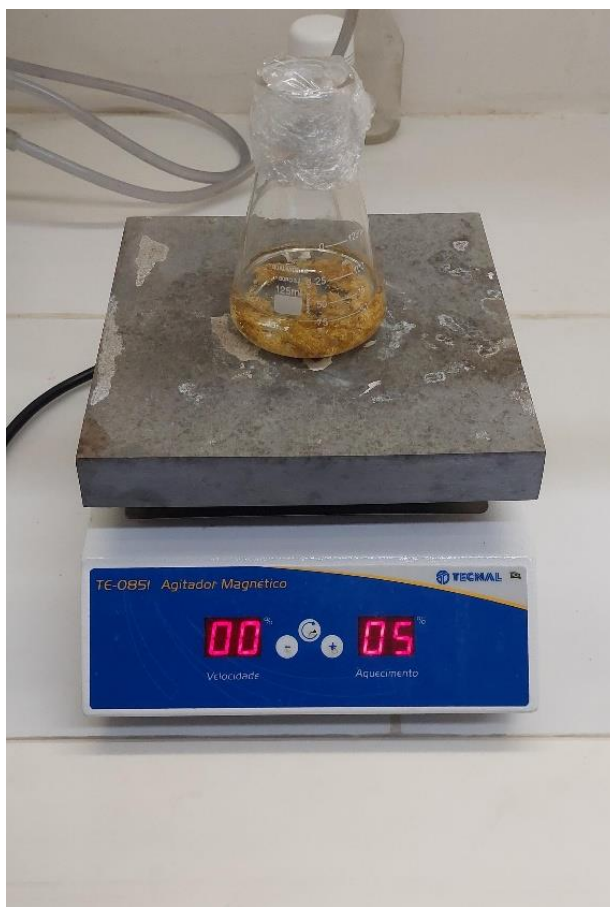
Então, para se determinar a quantidade de extrativos, foi feito o tratamento alcalino inicialmente. Para tanto, foram pesadas 6,00 gramas de BCA e 5,01 gramas de sisal sendo colocadas em béqueres de 250 mL. Além disso, para preparar a solução alcalina foram usadas 5 gramas de NaOH P.A. e 100 mL de água destilada, formando uma solução a 5%. Tal solução foi levada para aquecimento a 60 °C com agitação magnética por cerca de 15 minutos e, após isso, as fibras foram despejadas nas soluções por 1(uma) hora mantendo a agitação.

Terminado o tratamento, as fibras foram lavadas em água corrente com auxílio de peneiras e transferidas para placas de Pétri e, depois, colocadas para secarem em

temperatura ambiente, matendo-as expostas ao fluxo de ar. No dia seguinte, após 24 horas, foram levadas para aquecimento a 60 °C por cerca de 3 horas. Feita a secagem, as fibras foram mantidas em um dessacador como forma de proteção contra umidade até a próxima etapa.

Para se determinar o teor de extrativos, foram utilizadas cerca de 1,06 gramas de BCA e 0,5179 gramas de sisal. Tais quantidades foram colocadas na presença de 60 mL de acetona em temperatura controlada a 90 °C usando um termômetro de infravermelho por 2(duas) horas. Vale ressaltar que o ponto de ebulição da acetona é por volta de 56 °C, sendo necessário uma adaptação do erlenmeyer para que o solvente não escapasse, conforme figura abaixo.

Figura 4.1 - Fibras de BCA em acetona.



Fonte: autoral, 2025.

Após o término do aquecimento, parte da solução foi separada das fibras sendo deixado um pouco do conteúdo para ajudar na transferência para uma placa de Pétri,

sendo este procedimento realizado para BCA e sisal. Feito isso, as placas de Pétri foram levadas para secar em estufa a 105-110 °C até atingirem peso constante

Para a determinação da quantidade de hemicelulose, foi utilizado uma solução de 170 mL de água destilada e 3,4 gramas de NaOH. As massas restantes da quantidade de extrativos foram utilizadas nesta etapa, sendo seu valores de 0,6374 gramas para BCA e 0,0357 gramas para o sisal. A mistura das soluções com as fibras foram mantidas em aquecimento a 80 °C por 3,5 horas.

Figura 4.2 - Aquecimento das fibras.



Fonte: autoral, 2025.

Terminando o aquecimento, as fibras foram lavadas em água corrente e colocadas em béqueres com um pouco de água destilada, sendo esta parte necessária para se utilizar as fitas de pH. O pH das fibras foi observado estar perto de 6, embora na referência seja indicado o valor de 7 (11). Na figura abaixo, medição de pH das fibras.

Figura 4.3 – Medição de pH das fibras.



Fonte: autoral, 2025.

Sendo feitas as medidas de pH, as fibras de BCA e sisal foram levadas para secarem em estufa na temperatura de 105 °C até atingirem peso constante, sendo seus resultados anotados.

Já, para as quantidades de lignina, foi utilizado um volume de 30 mL de H_2SO_4 (I) concentrado em 98%. As fibras foram colocadas na presença desse volume por cerca de 24 horas em temperatura ambiente e, após esse tempo, foi aquecida a 100 °C por 1(uma) hora. Depois, a mistura foi filtrada usando uma aparelhagem composta por funil e papel de filtro. Vale lembrar que, para realizar a filtração, a mistura foi resfriada em temperatura para evitar que o papel de filtro rompesse. Desse modo, após o resfriamento, as fibras foram colocadas no papel de filtro e lavadas com água destilada até a não detecção dos íons sulfatos do ácido sulfúrico.

Figura 4.4 - Filtração de fibras de sisal.



Fonte: autoral, 2025.

Assim, após lavar as fibras com água destilada, seu conteúdo residual era coletado e levado para fazer uma titulação com BaCl_2 (aq) a 10 %, sendo essa solução preparada usando 10 gramas de BaCl_2 (s) e 100 mL de água destilada. Embora na referência (21) tenha sido utilizado uma bureta para fazer a titulação, uma pipeta de Pasteur foi observado ser suficiente para uma análise qualitativa. Logo, quando algumas gotas de BaCl_2 (aq) eram colocadas no resíduo da lavagem das fibras, uma turvação era notada sendo um indicativo da presença de íons sulfato. O processo foi repetido várias vezes até o desaparecimento da turvação (21).

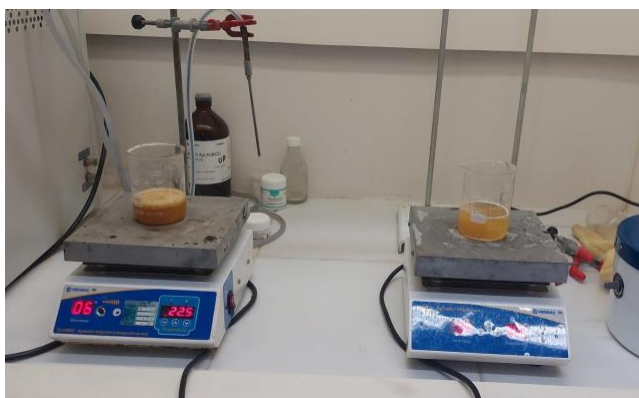
Na etapa seguinte, as fibras foram levadas para secar em estufa na temperatura recomendada de 105 °C até atingirem peso constante. Assim sendo, foi feita a determinação das quantidades de lignina e, conseqüentemente, celulose.

4.6 Preparação de filmes bioplásticos a partir de BCA, sisal e fécula de batata.

Primeiramente, foram pesadas cerca de 5 gramas de cada fibra para serem lavadas em água corrente com o auxílio de peneiras e, em seguida, colocadas em uma estufa a 60 °C por 4 horas. Após retirada da estufa, foram colocadas em um dessecador para remover o excesso de umidade residual até o dia seguinte. Assim, no dia posterior, as fibras foram tratadas alcalinicamente da forma como é recomendada no estudo (11).

Para o tratamento alcalino, foram utilizados 5 gramas de NaOH de grau laboratorial e 100 mL de água destilada para preparar a solução, sendo essas quantidades usadas para cada fibra individualmente. Tais soluções foram aquecidas a 60 °C por 15 minutos. Após esse aquecimento, as fibras foram colocadas nas soluções e aquecidas com agitação magnética por 1(uma) hora.

Figura 4.5 - Tratamento alcalino das fibras. Do lado esquerdo BCA e, do lado direito, sisal.



Fonte: autoral, 2025.

Terminado o aquecimento, as fibras de BCA e sisal foram levadas para lavagem em água corrente e com água destilada. Para tanto, foi necessário utilizar peneiras de mesh escolhidos que não permitissem que sua massa escapasse. Desse modo, o BCA foi filtrado em uma peneira de mesh 115 e, o sisal, em uma peneira de mesh 65.

Depois da lavagem, foram armazenadas em placas de Pétri por cerca de 24 horas e expostas ao ambiente com o intuito de sua umidade diminuir até o dia seguinte.

Figura 4.6 - Peneiras utilizadas para filtragem de BCA e sisal.



Fonte: autoral, 2025.

Figura 4.7 - Fibras após filtragem. Do lado esquerdo, BCA e do lado direito, sisal.



Fonte: autoral, 2025.

Após cerca de um dia de secagem, BCA e sisal foram colocados em uma estufa a 60 °C até diminuição de sua umidade por cerca de 3 horas. Então, depois disso, armazenados em um dessecador até a etapa seguinte. Na figura abaixo, pode-se observar as fibras após secagem na estufa.

Figura 4.8 - Fibras após secagem em estufa. Do lado esquerdo, BCA e do lado direito, sisal.



Fonte: autoral, 2025.

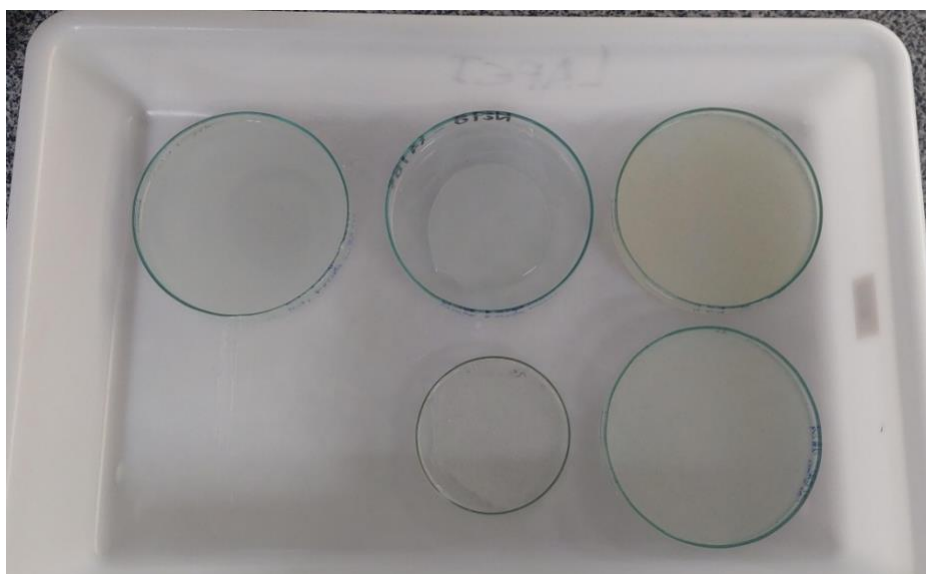
Na próxima etapa, iniciou-se o desenvolvimento do filme bioplástico. Para tanto, foram pesadas quantidades de 0,2 g de BCA e 0,4 g de sisal. Para as duas massas de fibras foram pesadas 10 gramas de fécula de batata, 185 mL de água destilada, 2 mL de ácido acético glacial e 5 mL de glicerina. Tais quantidades foram colocadas em béqueres de 250 mL e levadas para aquecimento por volta de 70 °C com agitação magnética até a solução ganhar viscosidade, sendo necessários 15 minutos. No momento no qual a solução ficou tão viscosa que a agitação magnética não foi possível, foi utilizado um bastão de vidro para continuar o procedimento, conforme recomendado em (11). Vale ressaltar que cada preparo foi feita um por vez, justamente para ter mais controle do processo.

Além do sisal e BCA, também foi preparado um filme à base somente de amido de batata, para verificar suas propriedades e comparar com as fibras utilizadas. Para

tanto, usou-se 10 gramas de fécula de batata, 185 mL de água destilada, 2 mL de ácido acético e 5mL de glicerina.

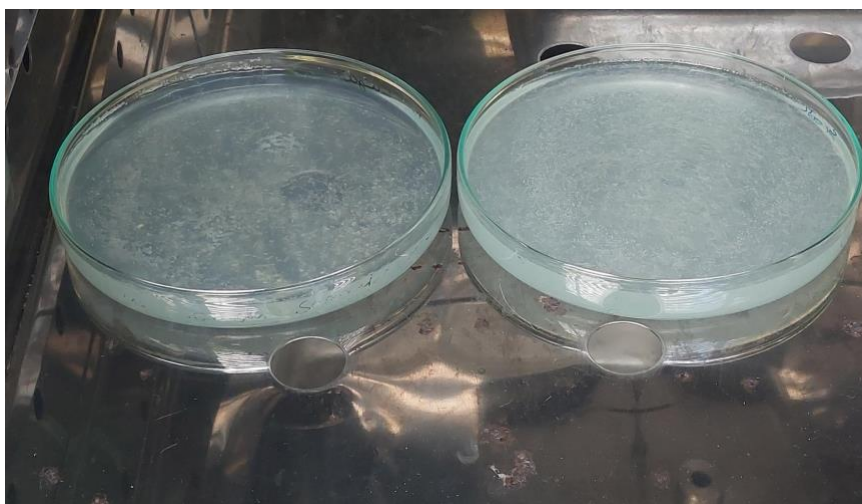
Após o término do aquecimento, as soluções foram espalhadas o mais rápido possível sobre placas de Pétri de 12 cm de diâmetro. Em seguida, colocadas para secar em estufa a 40 °C por 3 dias. Abaixo, figuras das placas de Pétri após seu preparo e em seu primeiro dia de secagem.

Figura 4.9 – Placas de Pétri com BCA, sisal e apenas fécula de batata.



Fonte: autoral, 2025.

Figura 4.10 - Placa de BCA do lado esquerdo e sisal do lado direito.



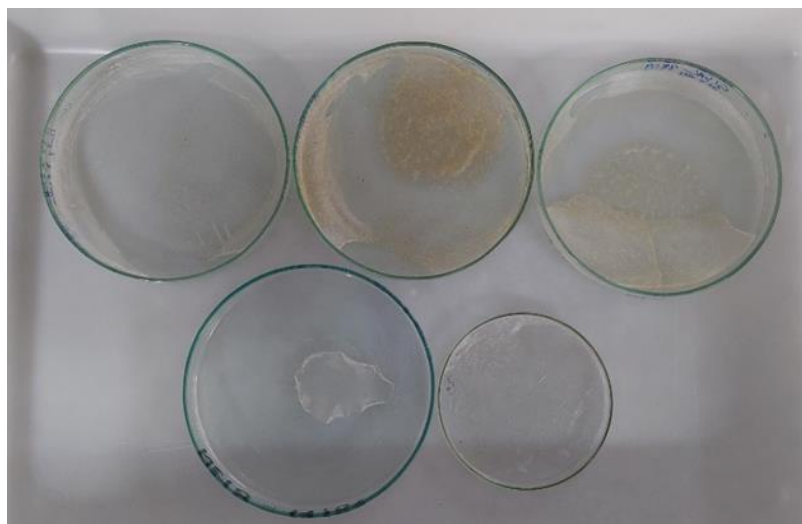
Fonte: autoral, 2025.

Figura 4.11 – Segundo dia de secagem das fibras de BCA, sisal e apenas fécula de batata.



Fonte: autoral, 2025.

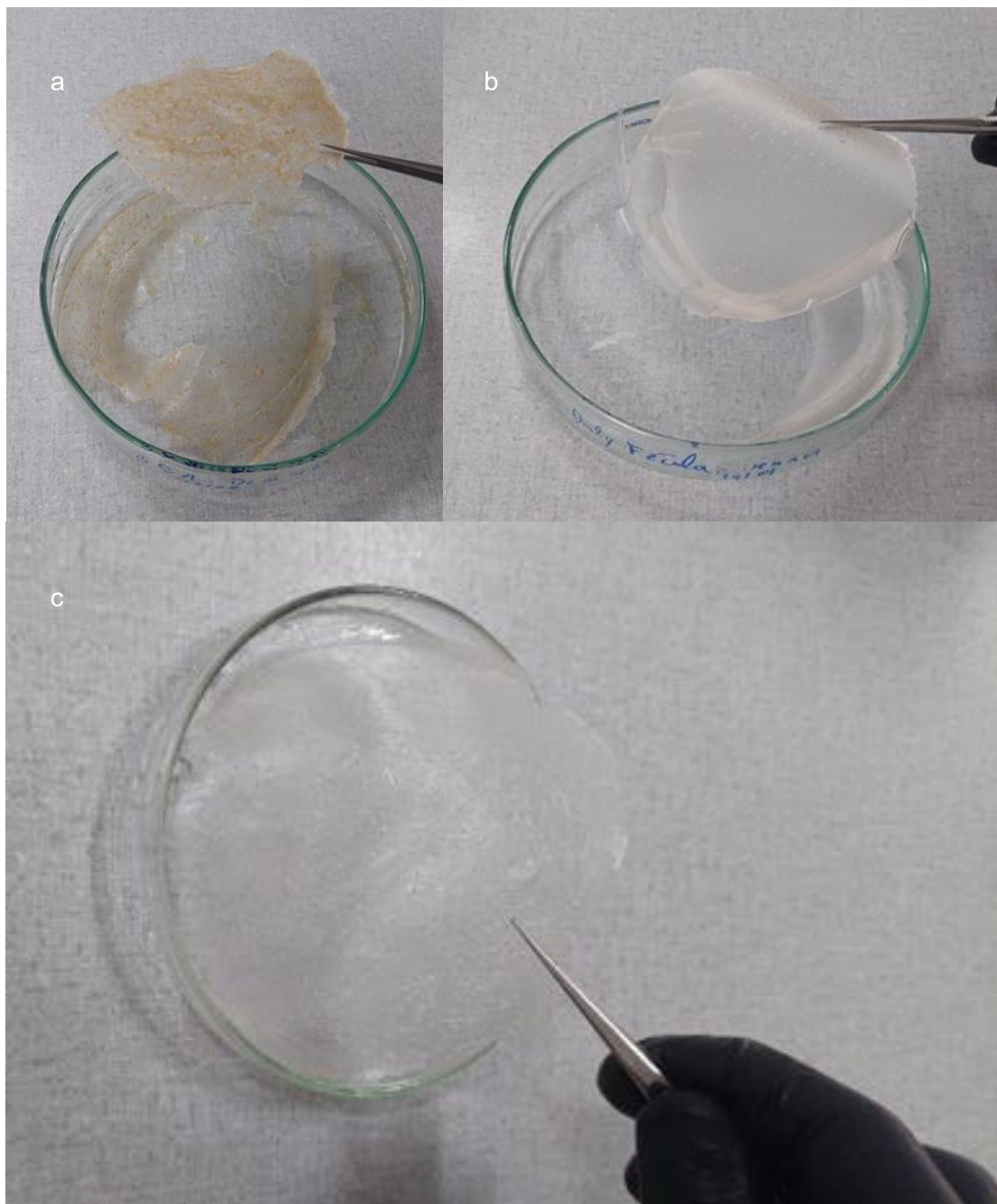
Figura 4.12 – Fibras de BCA, sisal e apenas fécula após três dias de secagem.



Fonte: autoral, 2025.

Após os três dias de secagem, conforme figura 4.8 e 4.9, os filmes foram removidos com cuidado das placas de Pétri usando uma pinça. Os filmes foram armazenados para análises posteriores usando as próprias placas de Pétri e filme PVC para protegê-los da umidade.

Figura 4.13 – Filmes de BCA em (a), fécula de batata em (b) e sisal em (c).



4.7 Análise das propriedades mecânicas e superficiais dos filmes bioplásticos

Nessa etapa, foram escolhidas duas formas de analisar as propriedades dos filmes bioplásticos desenvolvidos: resistência à tração e perfilometria. Para tanto, foram utilizados a Máquina Universal de Ensaio e Perfilômetro, respectivamente. Para as análises, os filmes foram cortados com uma tesoura em pequenos pedaços de, aproximadamente, 5 cm (c) x 1 cm (l). Para determinar a espessura dos filmes, foi utilizado um paquímetro digital e realizadas cinco medidas em pontos distintos para a mesma amostra. O resultado foi adotado como a média das medidas para cada tipo de filme utilizado e pode ser conferido na tabela abaixo.

Tabela 4.4 - Medidas de espessura para uma amostra de cada filme bioplástico.

Número de medidas	Espessura com BCA (mm)	Espessura com Sisal (mm)	Espessura com Fécula de batata (mm)
1	2,00	1,20	0,66
2	1,33	1,22	0,70
3	1,30	1,14	0,61
4	1,12	0,71	0,62
5	1,43	0,94	0,60
Média	1,44	1,04	0,64

Fonte: autoral, 2025.

4.7.1 Resistência à tração

A resistência à tração é uma medida de como um material se comporta quando aplicado forças em suas extremidades, ou seja, o quanto o material resiste até seu rompimento. Seguindo a metodologia em (11), uma adaptação usando pedaços de papelão foi necessária para fixar os filmes, pois foi observado que em testes primários os filmes se rompiam muito próximo dos seus pontos de fixação. De forma ideal, é importante que os filmes tenham seu rompimento próximo ao centro, pois fornece de forma visual o máximo de sua alongação.

Além da resistência à tração, outro parâmetro que é importante ressaltar é o módulo de Young, conforme estudo em (11). O módulo de Young é uma medida de quanto um material possui rigidez à tração. Na figura abaixo, exemplo de ensaio usando o filme composto por BCA.

Figura 4.14 - Ensaio de tração do filme composto por BCA.



Fonte: autoral, 2025.

Semelhantemente ao BCA, os filmes de sisal e fécula de batata passaram pelo mesmo procedimento, mantendo as dimensões das amostras. Foram preparadas três amostras de cada filme para realizar ensaios para cada uma delas. No final, os valores foram considerados como a média dos resultados.

4.7.2 Perfilometria

O perfilômetro é um equipamento que nos fornece a medida da rugosidade de uma superfície e foi utilizado para avaliar, neste estudo, as superfícies dos filmes

bioplásticos desenvolvidos. Os filmes foram cortados em pequenos pedaços com medidas aproximadas de 5 cm x 1 cm e analisados de duas formas: frente e verso. Entende-se como a frente do filme a região que ficou exposta ao fluxo de calor na etapa de secagem, conforme figura 4.7. Já, para o verso, entende-se como a região que ficou em contato direto com a placa de Pétri, apresentando uma superfície menos rugosa visualmente.

Para as análises de perfilometria dos filmes bioplásticos, foram avaliados alguns parâmetros, como Ra (Roughness Average ou Rugosidade Média) e Sq (Root Mean Square Roughness ou Rugosidade Quadrática Média), além de terem sido geradas imagens das superfícies dos filmes com escala de tamanho. Ao todo, foram examinadas três amostras de cada bioplástico. No final, os valores foram considerados como a média dos resultados.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização

Na tabela abaixo, as quantidades usadas e determinadas de extrativos para BCA e sisal.

Tabela 5.1 - Determinação da quantidade de extrativos.

	Massa utilizada (g) A	Peso constante (g) B	Quantidade de extrativos (g)
BCA	1,06	0,4226	0,6374
Sisal	0,5179	0,4822	0,0357

Fonte: autoral, 2025.

Para a determinação das quantidades de hemicelulose, suas massas foram anotadas e podem ser observadas na tabela abaixo.

Tabela 5.2 - Determinação da quantidade de hemicelulose.

	Massa utilizada (g) B	Peso constante (g) C	Quantidade de hemicelulose (g)
BCA	0,4226	0,231	0,1916
Sisal	0,4822	0,3956	0,0866

Fonte: autoral, 2025.

Já, para a determinação das quantidades de lignina das fibras, os valores de suas massas foram anotados e podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 5.3 - Determinação da quantidade de lignina.

	Massa utilizada (g)	Peso constante (g) D	Quantidade de lignina (g)
BCA	0,231	0,3023	0,0713
Sisal	0,3956	0,1797	0,2159

Fonte: autoral, 2025.

Por último, foi feita a determinação da quantidade de celulose presentes nas fibras. Para tanto, bastou somar os valores obtidos anteriormente e subtrair do valor pesado inicialmente, segundo metodologia proposta em (21), porém adaptada.

$$(A - B) + (B - C) + D + E = A (g) \qquad Eq. 5.1$$

Dessa forma, os valores de celulose encontrados para BCA e sisal foram, respectivamente, 0,3023 g e 0,1797 g.

5.2 Análises de resistência à tração

5.2.1. Análises de resistência à tração para BCA

Para as análises de resistência à tração, foi utilizado a Máquina Universal de Ensaio, fornecendo o quanto as amostras de filmes resistem ao estiramento.

Tabela 5.4 - Ensaio de resistência à tração para filme com BCA.

Amostra	Extensão em carga máxima [mm]	Tensão de tração em Resistência à tração [MPa]	Carga na Resistência à tração [N]	Módulo de Young [MPa]
1	16,752	3,052	33,567	29,356
2	7,587	3,353	35,881	42,452
3	6,315	2,872	31,597	23,988
Média	10,218	3,092	33,682	31,932
Desvio padrão	4,65	0,20	1,75	7,75

Fonte: autoral, 2025.

Os gráficos obtidos pelo equipamento para as três amostras de BCA podem ser conferidos conforme apêndice A.

5.2.2 Análises de resistência à tração para filme bioplástico com sisal

Tabela 5.5 - Ensaio de resistência à tração para filme bioplástico com sisal.

Amostra	Extensão em carga máxima [mm]	Tensão de tração em Resistência à tração [MPa]	Carga na Resistência à tração [N]	Módulo de Young [MPa]
1	4,919	2,906	31,967	58,876
2	7,502	2,558	28,140	42,637
3	9,585	3,758	41,340	59,307
Média	7,335	3,074	33,816	53,607
Desvio padrão	1,91	0,50	5,54	7,76

Fonte: autoral, 2025.

Os gráficos obtidos pelo equipamento para as três amostras de sisal podem ser conferidos conforme apêndice B.

5.2.3 Análises de resistência à tração para filme bioplástico com fécula de batata

Tabela 5.6 - Ensaio de resistência à tração para filme com apenas fécula de batata.

Amostra	Extensão em carga máxima [mm]	Tensão de tração em Resistência à tração [MPa]	Carga na Resistência à tração [N]	Módulo de Young [MPa]
1	6,085	0,465	5,110	4,814
2	10,002	1,183	13,015	9,763
Média	8,043	0,824	9,063	7,289
Desvio padrão	1,96	0,36	3,95	2,02

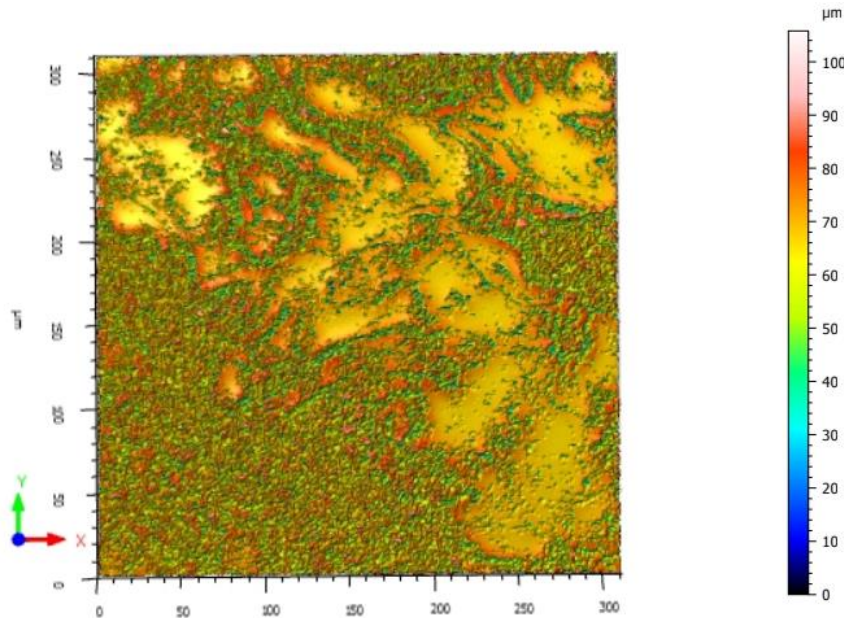
Fonte: autoral, 2025.

Os gráficos obtidos pelo equipamento para as três amostras de fécula de batata podem ser conferidos conforme apêndice C.

5.3 Análises de perfilometria

5.3.1 Análises de perfilometria para filme bioplástico com BCA

Figura 5.1 - Frente do filme bioplástico com BCA para amostra (1).



Fonte: autoral, 2025.

Para as demais amostras, suas imagens frontais, perfil e do verso podem ser conferidas nos apêndices D, E e F, respectivamente.

Tabela 5.7 - Parâmetros avaliados para a frente do filme com BCA.

Amostra	Ra	Sq
1	9,569	14,74
2	5,414	9,190
3	3,805	8,331
Média	6,263	10,754
Desvio padrão	2,43	2,84

Fonte: autoral, 2025.

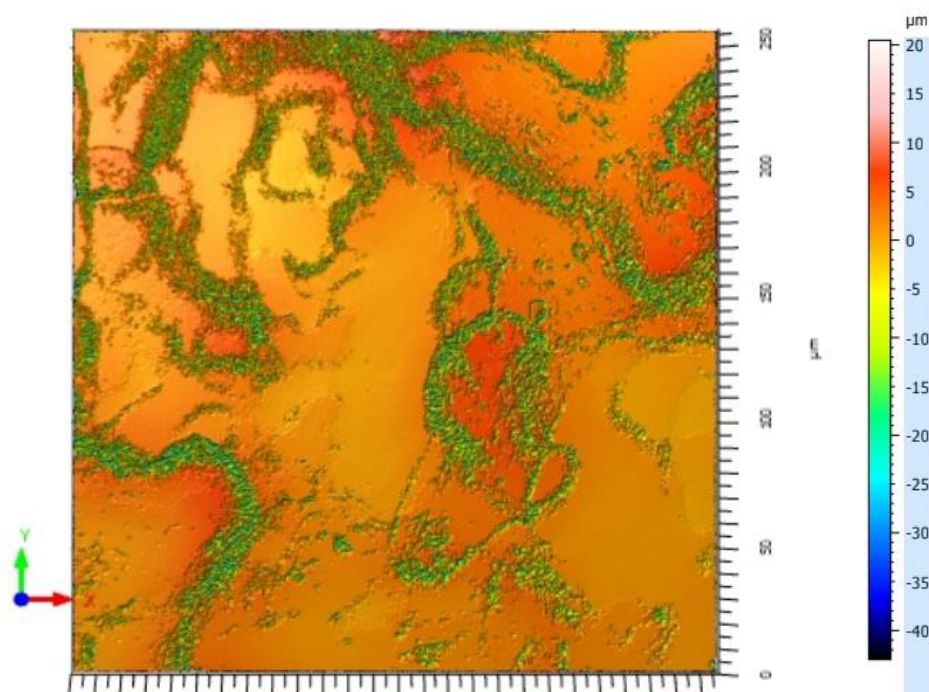
Tabela 5.8 - Parâmetros avaliados para o verso do filme com BCA.

Amostra	Ra	Sq
1	0,243	0,961
2	1,280	4,065
3	0,221	0,666
Média	0,581	1,897
Desvio padrão	0,49	1,54

Fonte: autoral, 2025.

5.3.2 Análises de perfilometria para filme bioplástico com sisal

Figura 5.3 - Frente do filme bioplástico com sisal para amostra (1).



Fonte: autoral, 2025.

Para as demais amostras, suas imagens frontais, perfil e do verso podem ser conferidas nos apêndices G, H e I, respectivamente.

Tabela 5.9 - Parâmetros avaliados para a frente do filme com sisal.

Amostra	Ra	Sq
1	3,973	6,200
2	3,644	8,462
3	4,329	9,820
Média	3,982	8,161
Desvio padrão	0,28	1,49

Fonte: autoral, 2025.

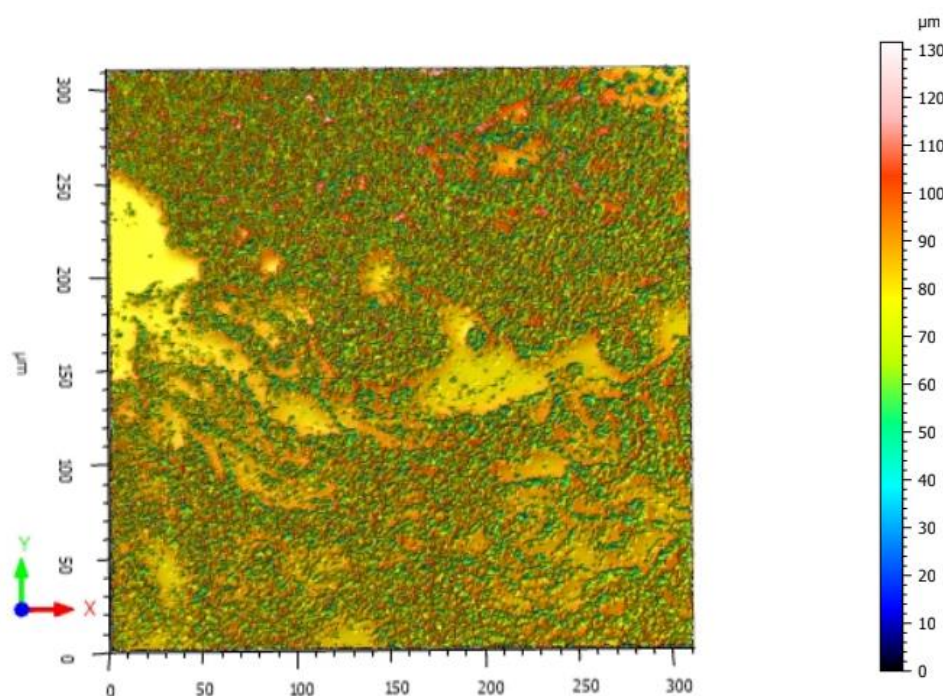
Tabela 5.10 – Parâmetros avaliados para o verso do filme com sisal.

Amostra	Ra	Sq
1	8,243	14,82
2	6,634	10,08
3	0,592	1,973
Média	5,156	8,958
Desvio padrão	3,29	5,30

Fonte: autoral, 2025.

5.3.3 Análises de perfilometria para filme bioplástico com fécula de batata

Figura 5.5 - Frente do filme bioplástico com fécula de batata para amostra (1).



Fonte: autoral, 2025.

Para as demais amostras, suas imagens frontais e perfil podem ser conferidas nos apêndices J e K, respectivamente.

Tabela 5.11 – Parâmetros avaliados para a frente do filme com fécula de batata.

Amostra	Ra	Sq
1	13,33	20,10
2	10,64	15,64
3	7,925	14,16
Média	10,631	16,63
Desvio padrão	2,21	2,52

Fonte: autoral, 2025.

5.4 Comparações dos resultados

A seguir, segue-se tabela com os valores médios de resistência à tração e módulo de Young para os filmes bioplásticos desenvolvidos. Estes parâmetros foram comparados com os valores obtidos no estudo (11). Resumidamente, o valor adotado como comparação do estudo citado anteriormente será o melhor obtido, isto é, o valor que foi realizado tratamento de carga apenas com BCA de 6 % (0,6 g).

Tabela 5.12 - Comparação entre valores de módulo de Young e resistência à tração.

Filme bioplástico	Módulo de Young médio [MPa]	Módulo de Young comparado [MPa]	Resistência à tração média [MPa]	Resistência à tração comparada [MPa]
BCA	31,932	28,72	3,902	5,30
Sisal	53,607		3,074	
Fécula de batata	7,289		0,824	

Fonte: autoral, 2025 e adaptado de (11).

Os valores do módulo de Young obtidos para BCA e sisal foram maiores comparados ao do estudo (11), revelando melhorias nas propriedades de filme bioplástico em especial para o composto por sisal. A resistência à tração, entretanto, observou-se menor nos dois principais casos (BCA e sisal) quando comparada com a carga por BCA do estudo citado. Tal fato pode ser explicado pela quantidade de fibras utilizadas, em especial para o sisal. Segundo (11), um excesso de fibras pode impedi-

las de formar ligações com a matriz polimérica do amido de batata, pois não há quantidade de polímeros necessárias para interagir com a carga. Vale ressaltar que cada fibra possui propriedades características, em especial o sisal, pois o valor médio de resistência obtido pode ser explicado, portanto, pela quantidade de fibras utilizadas sejam elas numa quantidade maior ou menor.

Abaixo, segue-se tabela com os valores médios de Ra e Sq para os filmes bioplásticos produzidos comparando-os com valores de garrafas PET e madeira.

Tabela 5.13 - Comparação entre valores de Ra e Sq para filme com BCA, PET e madeira.

Filme	Superfície	Ra médio (µm)	Sq médio (µm)	PET Ra (µm)	PET Sq (µm)	<i>Gmelina arborea</i> Ra (µm)	<i>Gmelina arborea</i> Sq (µm)
BCA	Frente	6,623	10,754	0,04	0,01	7,25	10,96
BCA	Verso	0,581	1,897	0,04	0,01	7,25	10,96
Sisal	Frente	3,892	8,161	0,04	0,01	7,25	10,96
Sisal	Verso	5,156	8,958	0,04	0,01	7,25	10,96
Fécula	Frente	10,631	16,63	0,04	0,01	7,25	10,96

Fonte: autoral, 2025 e adaptado de (22) e (23).

Observa-se, pela tabela acima, que os filmes desenvolvidos apresentam rugosidade elevada comparada com plásticos convencionais, provavelmente devido ao mesh, isto é, aos tamanhos de partículas utilizadas no trabalho. Para BCA foi utilizado partículas de mesh 65 ($\approx 212 \mu\text{m}$) e, para o sisal, utilizados fibras de mesh 40 ($\approx 425 \mu\text{m}$).

5.5 Aspectos visuais e sensoriais dos filmes bioplásticos

Os filmes bioplásticos desenvolvidos apresentaram características específicas visuais e sensoriais. As fibras nos filmes com BCA e sisal não ficaram organizadas homogeneamente, entretanto, os filmes apresentaram boa flexibilidade e resistência ao rasgo.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos das propriedades mecânicas e superficiais foram razoavelmente satisfatórios. Resultados melhores podem ser obtidos quando forem variadas as quantidades de fibras ou o seu tamanho. Além disso, ensaios de biodegradabilidade, Análise Termogravimétrica, FT-IR ou, principalmente, MEV, podem ser cruciais para verificar aspectos comportamentais das fibras e explicar suas interações com a matriz de fécula de batata.

Os filmes bioplásticos reforçados com sisal apresentaram resultados promissores, pois sua rigidez mostrou-se maior comparada ao filme bioplástico com BCA, podendo ser explicado pela quantidade de fibras utilizadas. Logo, pode-se designar um novo destino para essa matéria-prima, seja industrial e em respeito ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

¹ **Em audiência, Comissão de Meio Ambiente discute como a legislação pode ajudar a reduzir o consumo de plásticos.** Disponível em:

<https://www.saopaulo.sp.leg.br/blog/em-audiencia-comissao-de-meio-ambiente-discute-como-a-legislacao-pode-ajudar-a-reduzir-o-consumo-de-plasticos/?amp_markup=1>. Acesso em: 5 out. 2023.

² AMBIENTAL, A. L. **10 países que combatem a poluição plástica.** Disponível em:

<<https://adslogisticaambiental.com.br/10-paises-que-combatem-a-poluicao-plastica/>>. Acesso em: 5 out. 2023.

³ DA SILVA, Hiago Lucas Soares et al. PRODUÇÃO DE PLÁSTICO BIODEGRADÁVEL. ANAIS DA MOTIVANDO: FEIRA DE INOVAÇÃO E CIÊNCIAS DO UNIVAG, n. 01, 2022.

⁴ LOPES, Mateus S. Garcez. **Produção de plásticos biodegradáveis utilizando hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar.** 2010. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Instituto Butantan, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2010.

⁵ **Paraíba tem aumento de produção e fecha safra 2022/2023 com um volume de 7,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzida.** Disponível em:

<<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/sucroenergetico/353422-paraiba-tem-aumento-de-producao-e-fecha-safra-2022-2023-com-um-volume-de-7-4-milhoes-de-toneladas-de-cana-de-acucar-produzida.html>>. Acesso em: 5 out. 2023.

⁶ SANTOS, Robson de Andrade. **Sisal.** Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>>. Acesso em: 25 ago. 2025.

⁷ **Usinas de açúcar e álcool no estado: Paraíba** Disponível em :

<https://www.novacana.com/usinas_brasil/estados/paraiba>. Acesso em: 22 out. 2023

⁸ SANTOS, Fernando et al. (Ed.). **Sugarcane biorefinery, technology and perspectives**. Academic Press, 2019. Acesso em: 22 out. 2023

⁹ CHEN, Ming-Jie et al. **Homogeneous transesterification of sugar cane bagasse toward sustainable plastics**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 5, n. 1, p. 360-366, 2017.

¹⁰ CHEN, Ming-Jie; SHI, Qing-Shan. **Transforming sugarcane bagasse into bioplastics via homogeneous modification with phthalic anhydride in ionic liquid**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 3, n. 10, p. 2510-2515, 2015.

¹¹ HAMIN, Siti Hajar et al. **Effect of chemical treatment on the structural, thermal, and mechanical properties of sugarcane bagasse as filler for starch-based bioplastic**. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, Volume 98, Issue 3, pp. 625-632, 2022

¹² Qu, W., Niu, B., Lv, C., & Liu, J. **A Review of Sisal Fiber-Reinforced Geopolymers: Preparation, Microstructure, and Mechanical Properties**. *Molecules*, 29(10), 2401, 2024

¹³ SANTOS, Edinusia Moreira Carneiro, SILVA, Onildo Araujo da. **SISAL NA BAHIA – BRASIL**. Mercator, Fortaleza, v. 16, e16029, 2017

¹⁴ CHADIJAH, S.; RUSTIAH, R.O; MUNIR, M I D. Determination of the optimum concentration cellulose bagasse in making film bioplastic. **Journal of Physics Conference Series**, 2018. Acesso em: 22 out. 2023

¹⁵ KONG, U.; MOHAMMAD, Rawi, N.F.; Tay, G.S. **The Potential Applications of Reinforced Bioplastics in Various Industries: A Review**. *Polymers* 2023, 15, 2399.

¹⁶ SIRACUSA, Valentina; BLANCO, Ignazio. **Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications.** *Polymers*, 12(8), 1641, 2023.

¹⁷ KUSAMA, Heri Septya; PERMATASARI, Dita; UMAR, Wakhid Khoirul; SHARMA, Sanjay K. **Sugarcane bagasse as an environmentally friendly composite material to face the sustainable development era.** *Biomass Conv. Bioref.* 14, 26693–26706, 2024.

¹⁸ Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2023). **A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging.** *Polymers*, 15(13), 2972, 2020.

¹⁹ IMOISILI, Patrick Ehi; JEN, Tie-Chen. **Synthesis and characterization of bioplastic films from potato peel Starch; effect of glycerol as plasticizer.** Volume 105, Pages 1-5, ISSN 2214-7853, 2024.

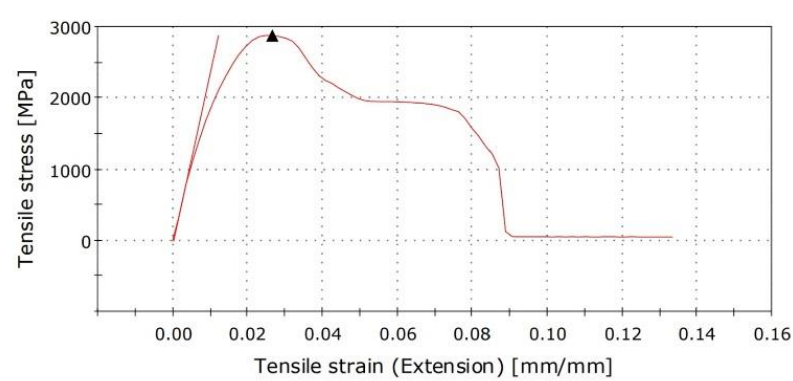
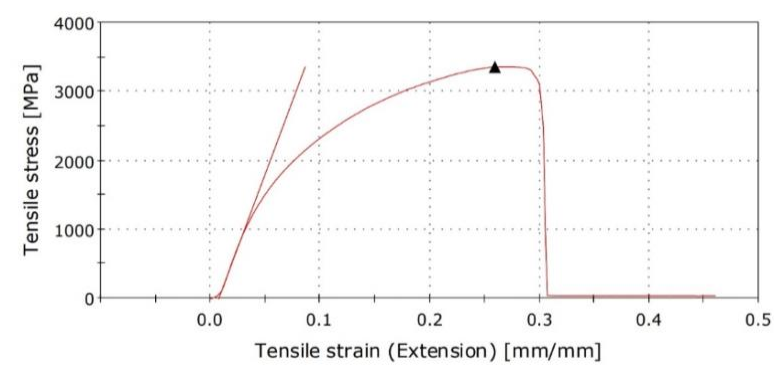
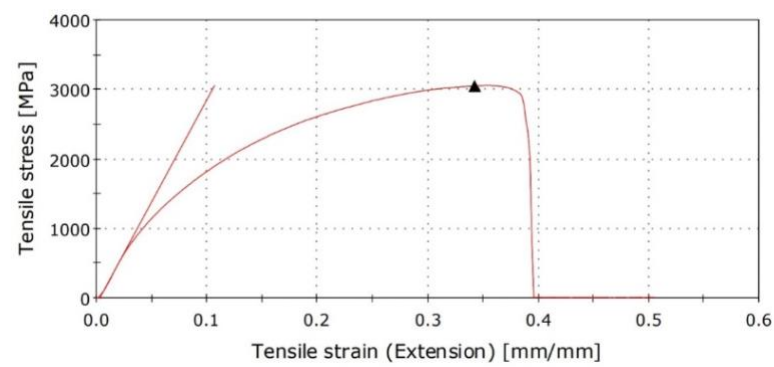
²⁰ MATOS, Vanderson; NOGUEIRA, Stephânia da Consolação Silva. **Investigação industrial sobre o desempenho comparativo entre amidos de milho e mandioca como depressores de ferro na flotação catiônica reversa.** Conference: 22° Simpósio de Mineração, 2023

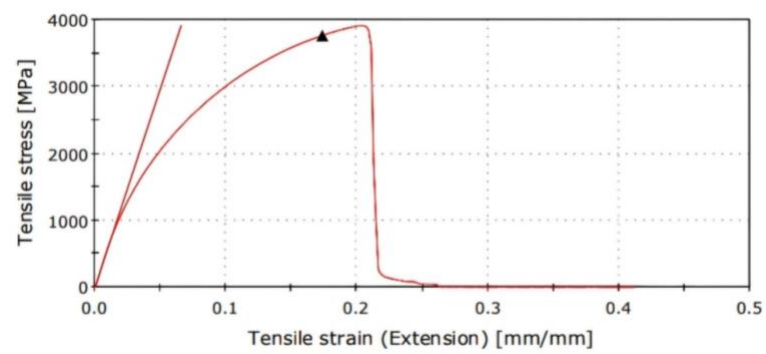
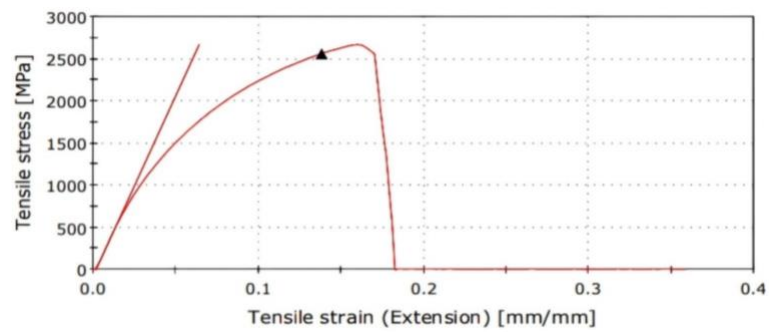
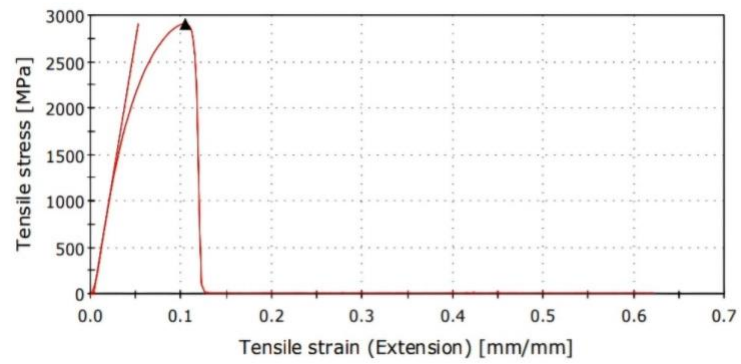
²¹ MANSORA, Adila Maisyarah; LIMA, Jeng Shiun; ANIB, Farid Nasir; HASHIMA, Haslenda; HOA, Wai Shin. **Characteristics of Cellulose, Hemicellulose and Lignin of MD2 Pineapple Biomass.** *Chemical Engineering Transactions* Vol. 72, 2019.

²² GENNA, Silvio; LEONE, Claudio; MORETTI, Patrizia; VENETTACCI, Simone **Infuence of Polymer Surface Roughness on the Fractions of Transmitted, Refected and Absorbed Energy in Operation of Laser Transmission Welding.** *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 11:469–491 (2024).

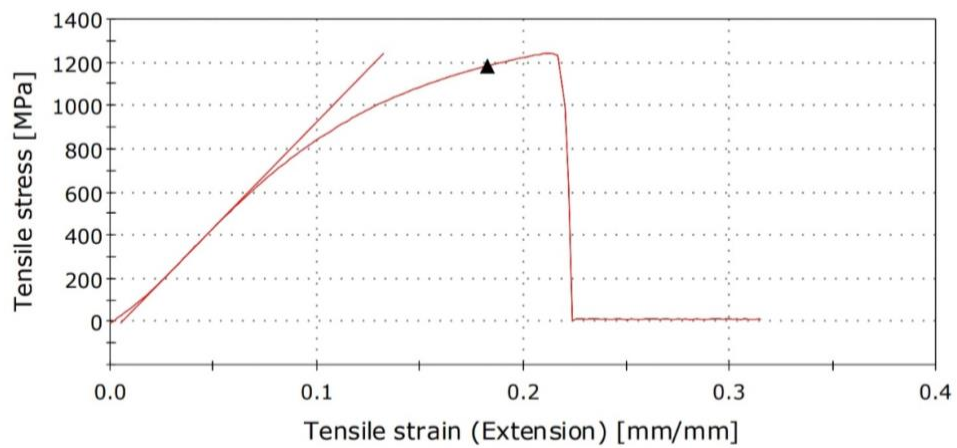
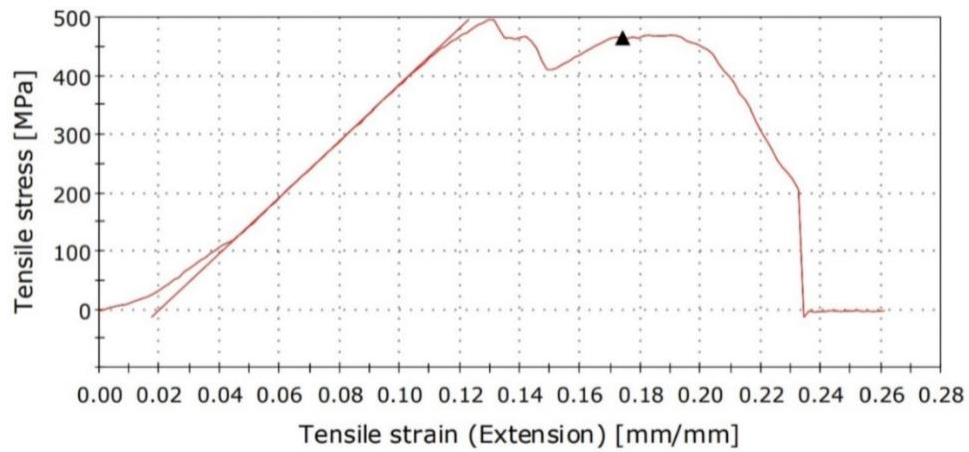
²³ CARVALHO, Douglas Edson; ROCHA, Márcio Pereira da; KLITZKE, Ricardo Jorge; CADEMARTORI, Pedro Henrique Gonzalez. **Surface changes in wood submitted to thermomechanical densification.** Maderas. Ciencia y tecnología (26): 42, 1-14, 2024.

APÊNDICE A – Gráficos de resistência à tração para amostras com BCA

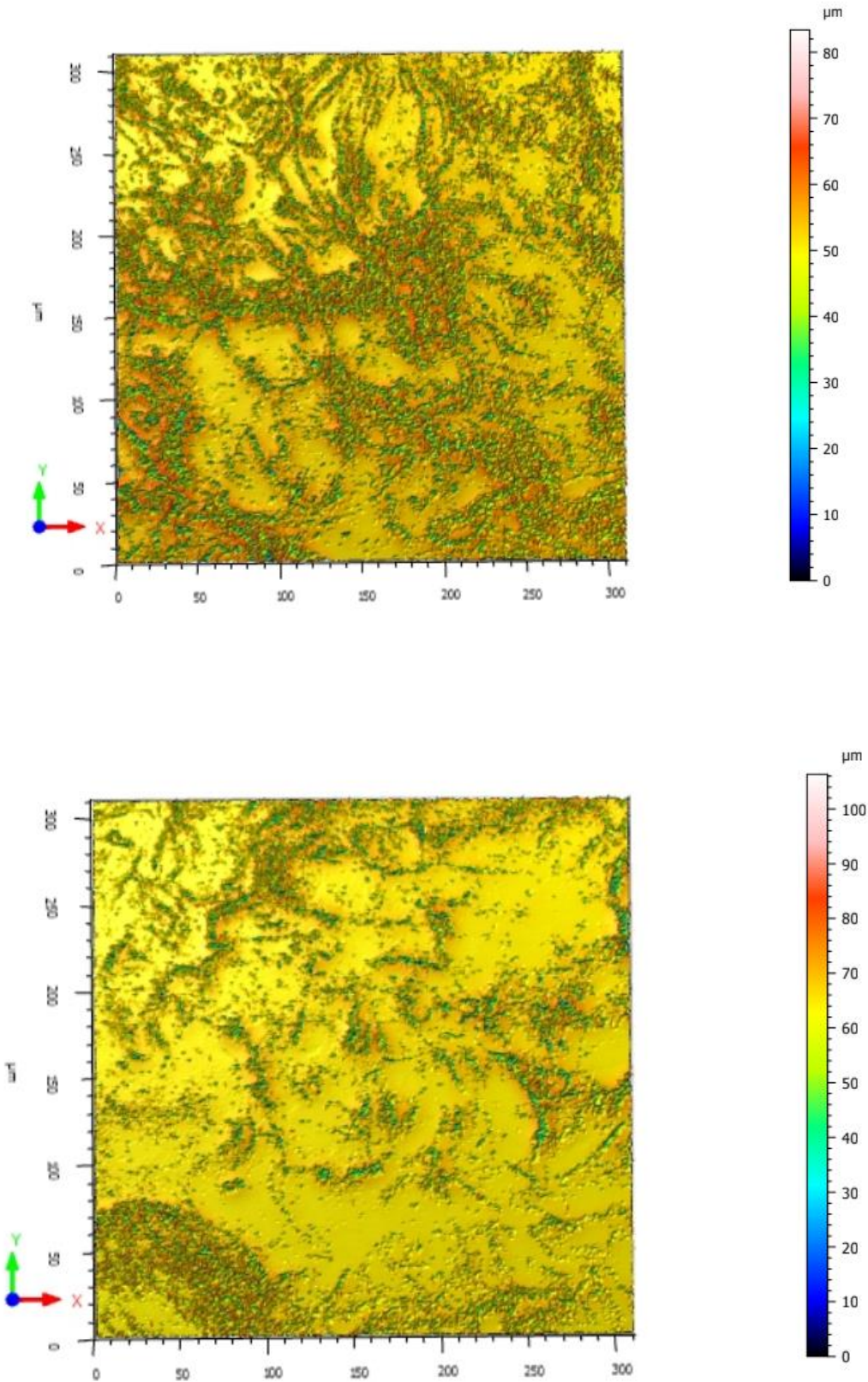


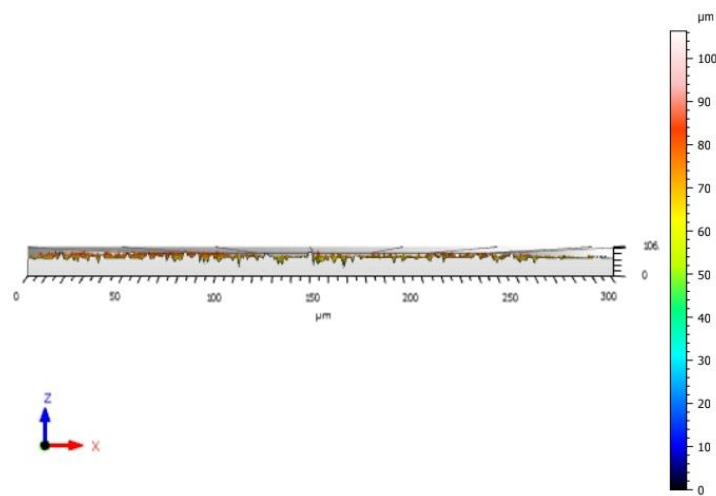
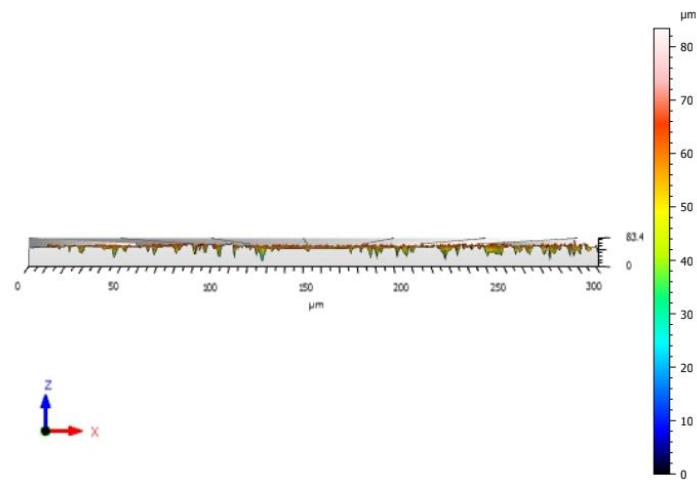
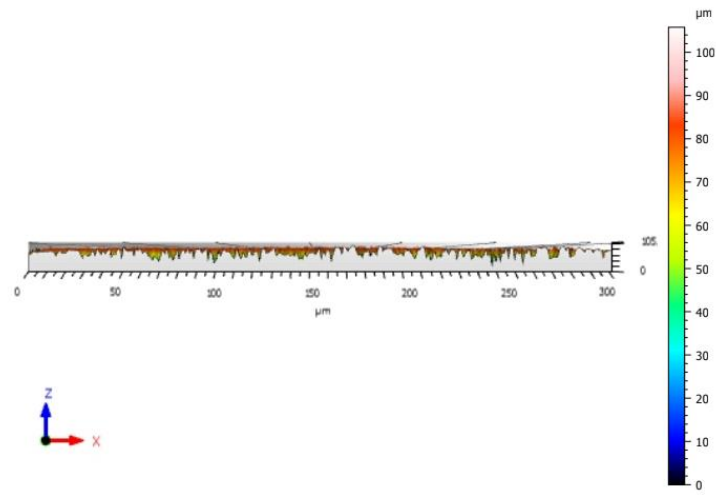
APÊNDICE B – Gráficos de resistência à tração para amostras com sisal

APÊNDICE C – Gráficos de resistência à tração para amostras com fécula de batata

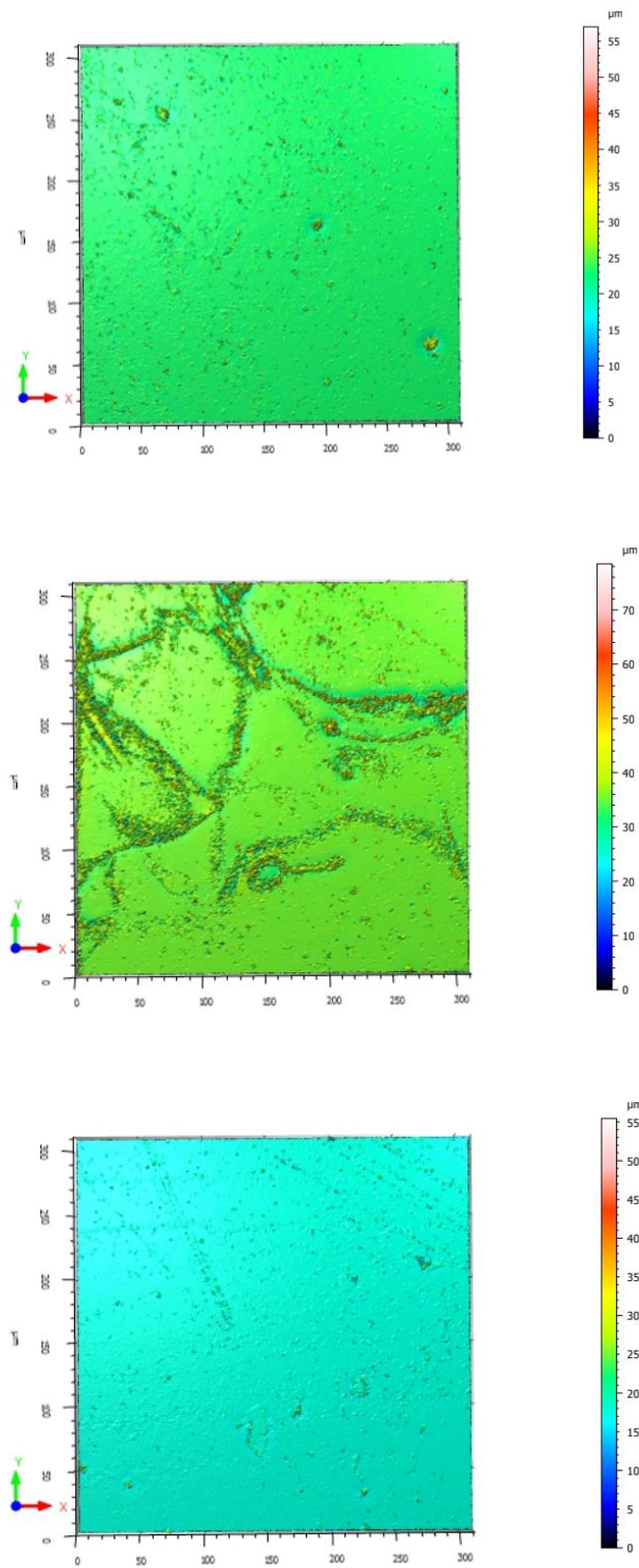


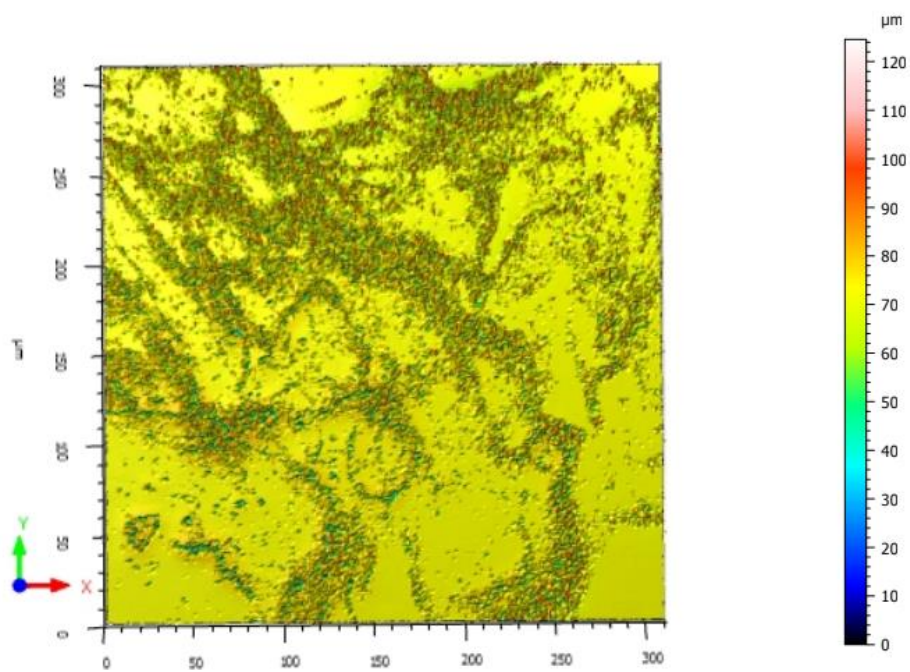
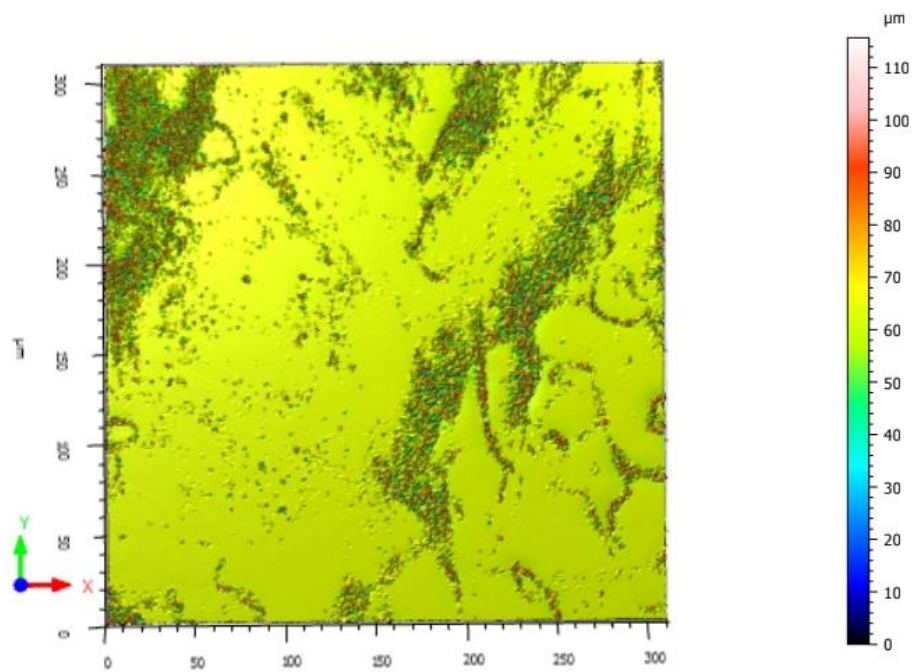
APÊNDICE D – Imagens da frente de filme com BCA



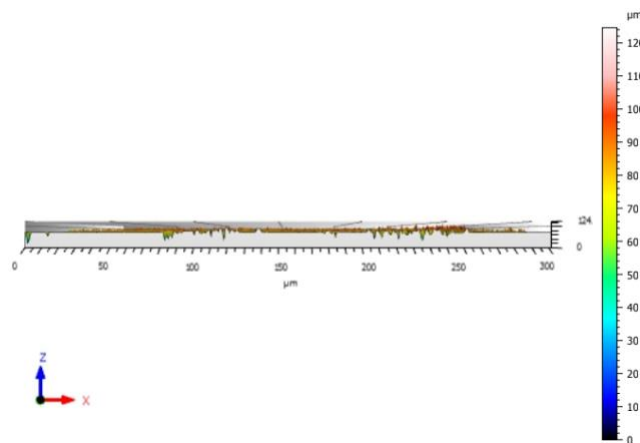
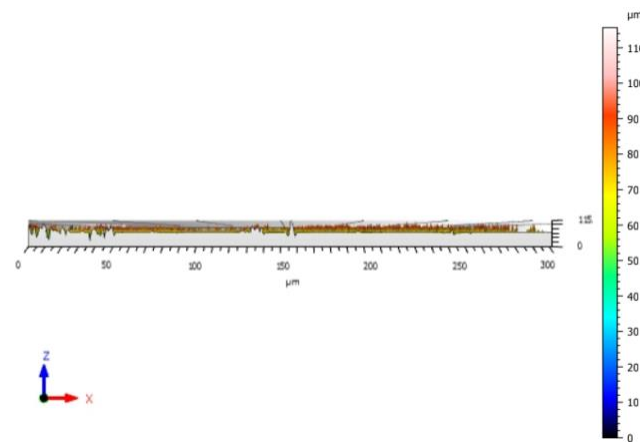
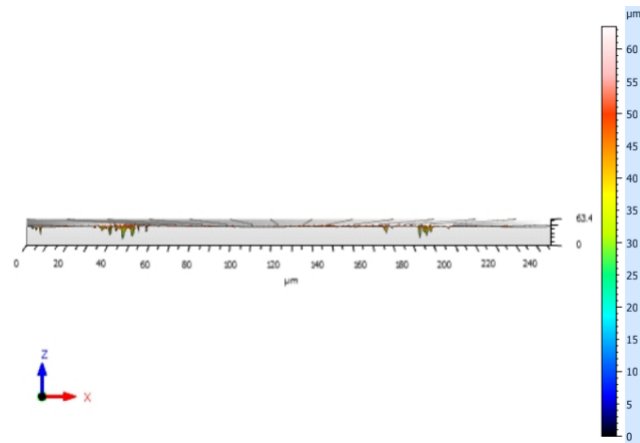
APÊNDICE E – Imagens de perfil para amostrfilme com BCA

APÊNDICE F – Imagens do verso de filme com BCA

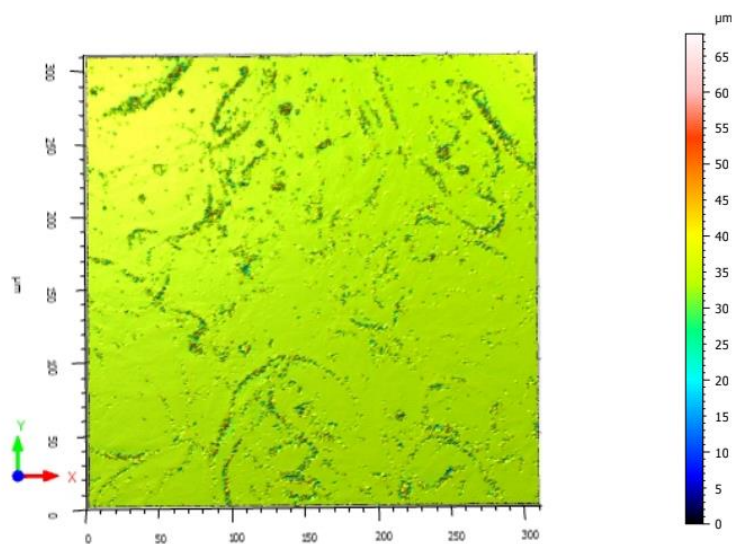
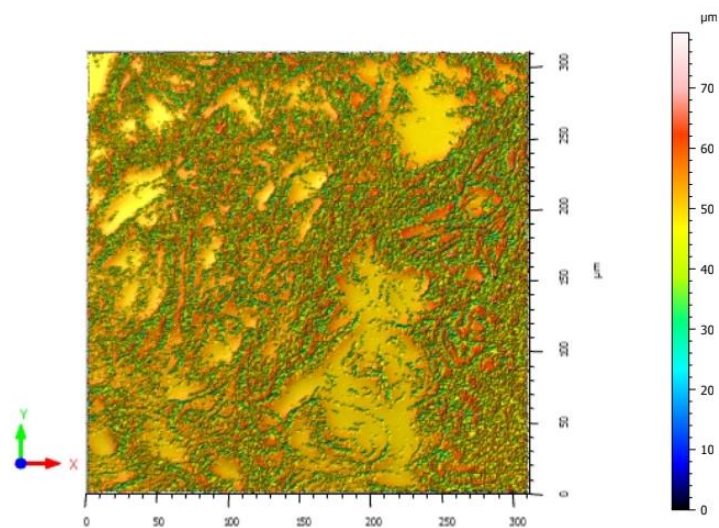
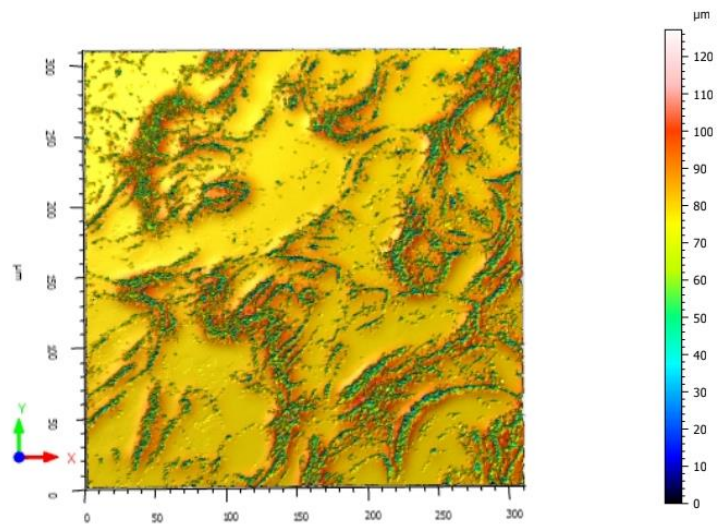


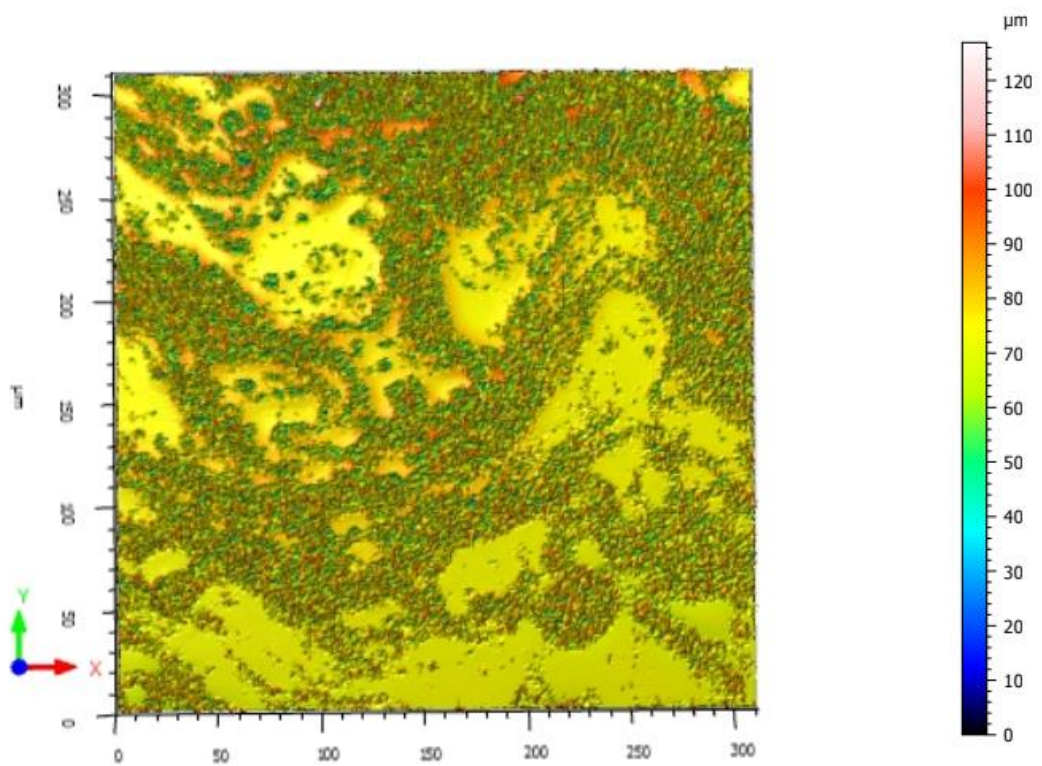
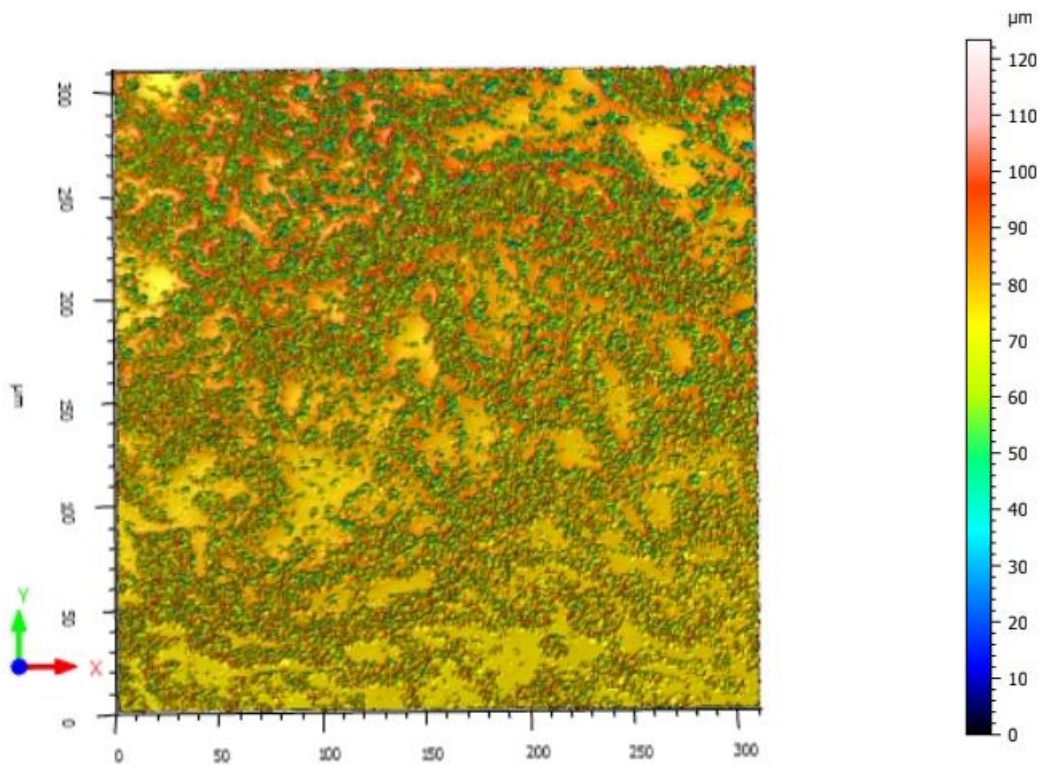
APÊNDICE G – Imagens da frente de filme com sisal

APÊNDICE H – Imagens de perfil de filme com sisal



APÊNDICE I – Imagens do verso de filme com sisal



APÊNDICE J – Imagens da frente de filme com fécula de batata

APÊNDICE K – Imagens de perfil de filme com fécula de batata

