ETEC DE CARAGUATATUBA

CURSO TÉCNICO DE MEIO AMBIENTE

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILMES POLIMÉRICOS DE CARBOXIMETILCELULOSE REFORÇADOS COM BIOMASSA DE AGUAPÉ (*Eichhornia crassipes*) E FIBRAS DE COCO VERDE (*Cocos nucifera L.)*

Felipe Silva Delecrode[1]; Henry Augusto de Souza Ferraz[1]; Igor Gabriel Freitas[1]; Murilo Martins[1]; Samuel Pedroso Brambilla[1]; Fernanda Renata Almeida Ribeiro[2]; Marivane Turim Koschevic[3].

Resumo: O presente estudo investigou o desenvolvimento de biofilmes poliméricos biodegradáveis formulados a partir de carboximetilcelulose (CMC) e glicerol, incorporando a biomassa do aguapé (*Eichhornia crassipes*) e fibras de coco verde (*Cocos nucifera L.)* como reforços estruturais. A iniciativa surge como alternativa aos polímeros sintéticos convencionais derivados do petróleo, cujos resíduos causam contaminação ambiental e geração de microplásticos. A metodologia compreendeu a coleta das matérias-primas em Caraguatatuba (SP), seguida pela higienização, secagem em estufa (70 °C) e trituração do aguapé, além da secagem (50 °C) e do tratamento alcalino (mercerização com NaOH a 3%) de parte das fibras de coco para otimizar a adesão na matriz. Foram elaboradas doze formulações (F1 a F12) por homogeneização térmica e secagem em formas antiaderentes, avaliadas quanto aos aspectos visuais, microscopia óptica, taxa de dissolução em água e biodegradação em solo. Os resultados demonstraram que o teor de glicerol regulou diretamente a flexibilidade e a higroscopicidade dos filmes, enquanto o aguapé conferiu superfície dual (rugosa e lisa) e as fibras de coco aumentaram a rigidez mecânica e a resistência à dissolução aquosa, seja pela presença da lignina nas fibras *in natura*, seja pela maior adesão interfacial promovida pelo tratamento alcalino. Os ensaios em solo confirmaram a biodegradabilidade de todos os protótipos, destacando-se a formulação F12 (fusão de ambas as biomassas) pelo equilíbrio superior entre resistência, manuseabilidade e degradação. Conclui-se que o aproveitamento dessas biomassas abundantes constitui uma alternativa ecológica e tecnicamente viável que poderá substituir plásticos convencionais em embalagens e invólucros para mudas.
Palavras-chave: Bioplásticos; Aguapé; Fibras de coco; Carboximetilcelulose; Biodegradabilidade.

Abstract: The present study investigated the development of biodegradable polymeric biofilms formulated from carboxymethyl cellulose (CMC) and glycerol, incorporating water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biomass and green coconut fibers (*Cocos nucifera* L.) as structural reinforcements. This initiative emerges as an alternative to conventional petroleum-derived synthetic polymers, whose waste causes environmental contamination and microplastic generation. The methodology comprised raw material collection in Caraguatatuba (SP, Brazil), followed by cleaning, oven drying (70 °C), and grinding of the water hyacinth, as well as drying (50 °C) and

[1]Alunos do curso Técnico em Meio Ambiente Integrado ao Ensino Médio Etec Caraguatatuba, 2026:
[2] Auxiliar de Docente em Química: Fernanda Renata Almeida Ribeiro
[3]Professora da ETEC de Caraguatatuba, 2026: Marivane Turim Koschevic.

alkaline treatment (mercerization with 3% NaOH) of part of the coconut fibers to optimize matrix adhesion. Twelve formulations (F1 to F12) were prepared via thermal homogenization and casting in non-stick molds, and were subsequently evaluated for visual aspects, optical microscopy, water dissolution rate, and soil biodegradation. The results demonstrated that glycerol content directly regulated the flexibility and hygroscopicity of the films, whereas water hyacinth imparted a dual surface (rough and smooth) and coconut fibers increased mechanical stiffness and resistance to aqueous dissolution, driven either by the lignin content in untreated fibers or by enhanced interfacial adhesion resulting from alkaline treatment. Soil burial assays confirmed the biodegradability of all prototypes, with formulation F12 (combining both biomasses) standing out for its superior balance between mechanical strength, handleability, and degradation rate. It is concluded that the valorization of these abundant biomasses constitutes an ecologically sound and technically viable alternative capable of replacing conventional plastics in packaging and seedling containers.
Keywords: Bioplastics; Water hyacinth; Coconut fibers; Carboxymethyl cellulose; Biodegradability.

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são polímeros formados principalmente por átomos de carbono e obtidos a partir de recursos naturais renováveis ou não renováveis, sendo usado como principal matéria-prima para a sua produção, o petróleo. Conforme Rossi *et al.* (2005), os plásticos representam mais de 90% dos materiais utilizados atualmente, razão pela necessidade do uso de materiais maleáveis, de baixo custo, resistentes ao calor e com uma boa relação de peso-resistência, justificando a sua grande produção. Segundo a Plastics Europe (2024), a produção mundial de plásticos atingiu 413,8 milhões de toneladas em 2023, além disso cerca de 90% eram de origem fóssil. Porém, suas propriedades são prejudiciais para o meio ambiente, uma vez que sua produção e seu descarte irregular afetam os ecossistemas mundiais, visto que sua decomposição é um processo lento, variando de 10 até 600 anos, e ainda assim é muito prejudicial, sabendo-se que ela acontece principalmente em locais com exposição à luz solar, pois a radiação ultravioleta (UV) rompe as ligações químicas das cadeias poliméricas e causa a separação e a geração de microplástico durante o processo de fotodegradação, podendo causar impactos negativos contínuos ao longo de seu período de permanência, afetando o ambiente marinho, alcançando a cadeia alimentar dos organismos locais e possibilitando o seu transporte por meio de

microrganismos e animais, o que culmina na contaminação humana por meio do consumo.

Dessa maneira, os bioplásticos surgem como uma alternativa aos plásticos convencionais, principalmente por terem em sua composição lipídios, proteínas, carboidratos, plastificantes, surfactantes e outros materiais, como água e álcool, seu desenvolvimento pode estar associado a materiais renováveis, a fim de tornar o produto degradável e, em alguns casos, com características personalizadas.

A princípio, os aguapés são uma espécie nativa brasileira com comportamento hiperdominante, porém, fora do Brasil é considerada a mais disseminada espécie invasora do mundo (IPBES, 2023), utilizada como fonte de alimento por peixes e mamíferos. Na ausência destes animais, o aguapé reproduz-se com muita facilidade, impedindo rapidamente a passagem de luz, o que atrapalha a produção de oxigênio por meio da fotossíntese de algas responsáveis pela oxigenação da água, refletindo na morte dos organismos aquáticos e provocando um desequilíbrio ecológico e a eutrofização. Sendo assim, a sua retirada para a realização do projeto é benéfica ao meio em que está inserido.

Outro composto benéfico é a fibra de coco verde em junção com o bioplástico, tendo objetivo de aumentar sua rigidez, ampliando suas áreas de utilização, e mantendo-se um produto biodegradável.

Diante do exposto, o aproveitamento biotecnológico de resíduos agroindustriais e de biomassa aquática abundante no Litoral Norte de São Paulo, especificamente no município de Caraguatatuba, apresenta-se como uma estratégia promissora para mitigar os impactos ambientais locais causados tanto pelo descarte inadequado de cascas de coco verde quanto pela proliferação excessiva do aguapé (*Eichhornia crassipes*) em canais urbanos.

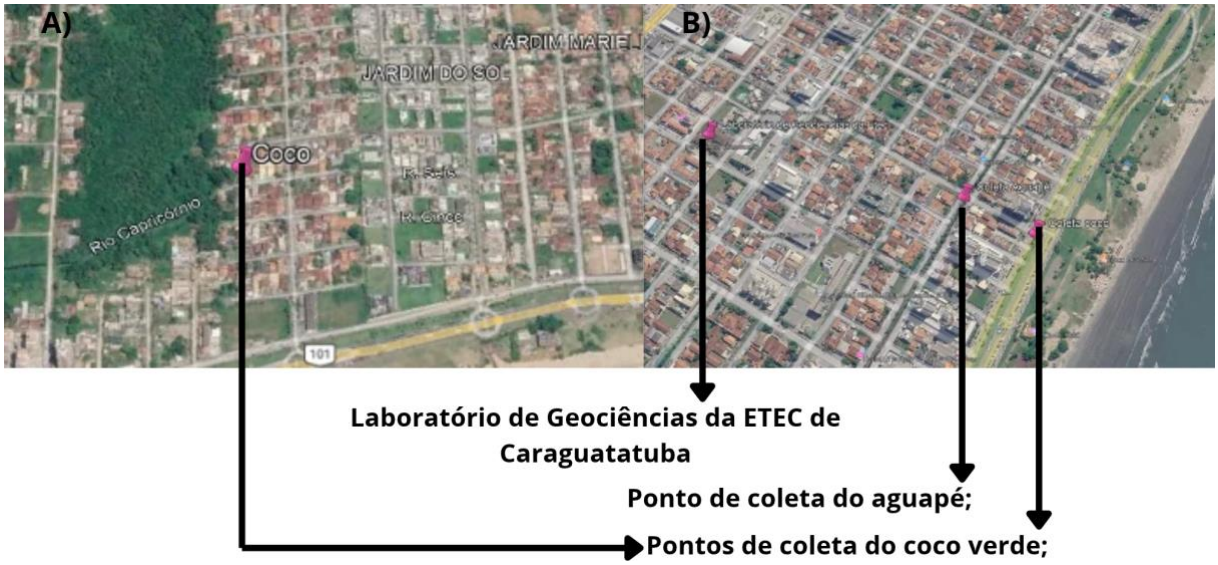
Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo geral desenvolver e caracterizar biofilmes poliméricos biodegradáveis à base de carboximetilcelulose (CMC) e glicerol, incorporando a biomassa do aguapé e fibras de coco verde como reforços estruturais, avaliando suas propriedades visuais, microestruturais, de solubilidade em água e de biodegradabilidade em solo, visando à sua aplicação como alternativa sustentável aos plásticos convencionais no cotidiano regional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção das Matérias Primas

O aguapé e o coco foram extraídos manualmente nos períodos entre 17/08 e 23/09/2026. O aguapé foi obtido em um canal de água pluvial no bairro do Indaiá (23°38'18.90"S; 45°25'23.49"O), localizada no município de Caraguatatuba. Foram encontradas dentro do canal, na superfície da água e colocadas em um saco plástico. Os cocos foram obtidos no bairro do Indaiá (23°38'20.16"S; 45°25'19.27"O), e na praia do Massaguaçu (23°35'49.17"S; 45°20'28.09"O) – Figura 1. Ambos os produtos foram encaminhados ao Laboratório de Geociências da ETEC de Caraguatatuba.

Figura 1 – Mapa das regiões de coleta.



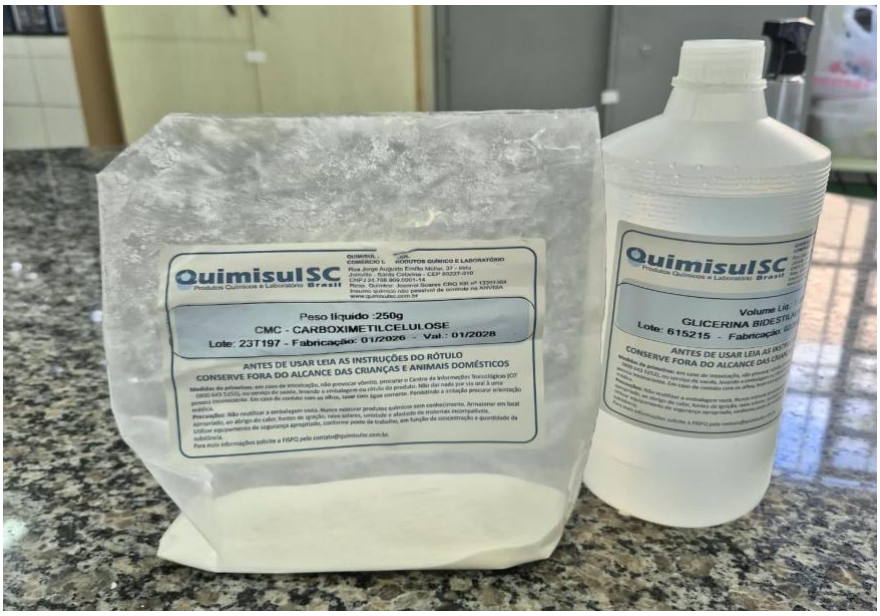
Fonte: Adaptado do Google Earth.

2.1.1 Obtenção e uso da Carboximetilcelulose (CMC) e do glicerol

Na produção dos filmes plásticos, foram utilizados como materiais a carboximetilcelulose (CMC) e o glicerol, ambos da marca QuimiosulSC que atuam de forma distinta – Figura 2. A carboximetilcelulose atua como agente polimérico formador do filme, o que contribui para a formação da matriz polimérica. Enquanto o glicerol tem função de plastificante, a fim de proporcionar maior flexibilidade,

maleabilidade e elasticidade aos biofilmes, diminuindo a rigidez e a tendência de formação de uma estrutura quebradiça.

Figura 2 – matérias primas



Fonte: Elaborado pelos autores.

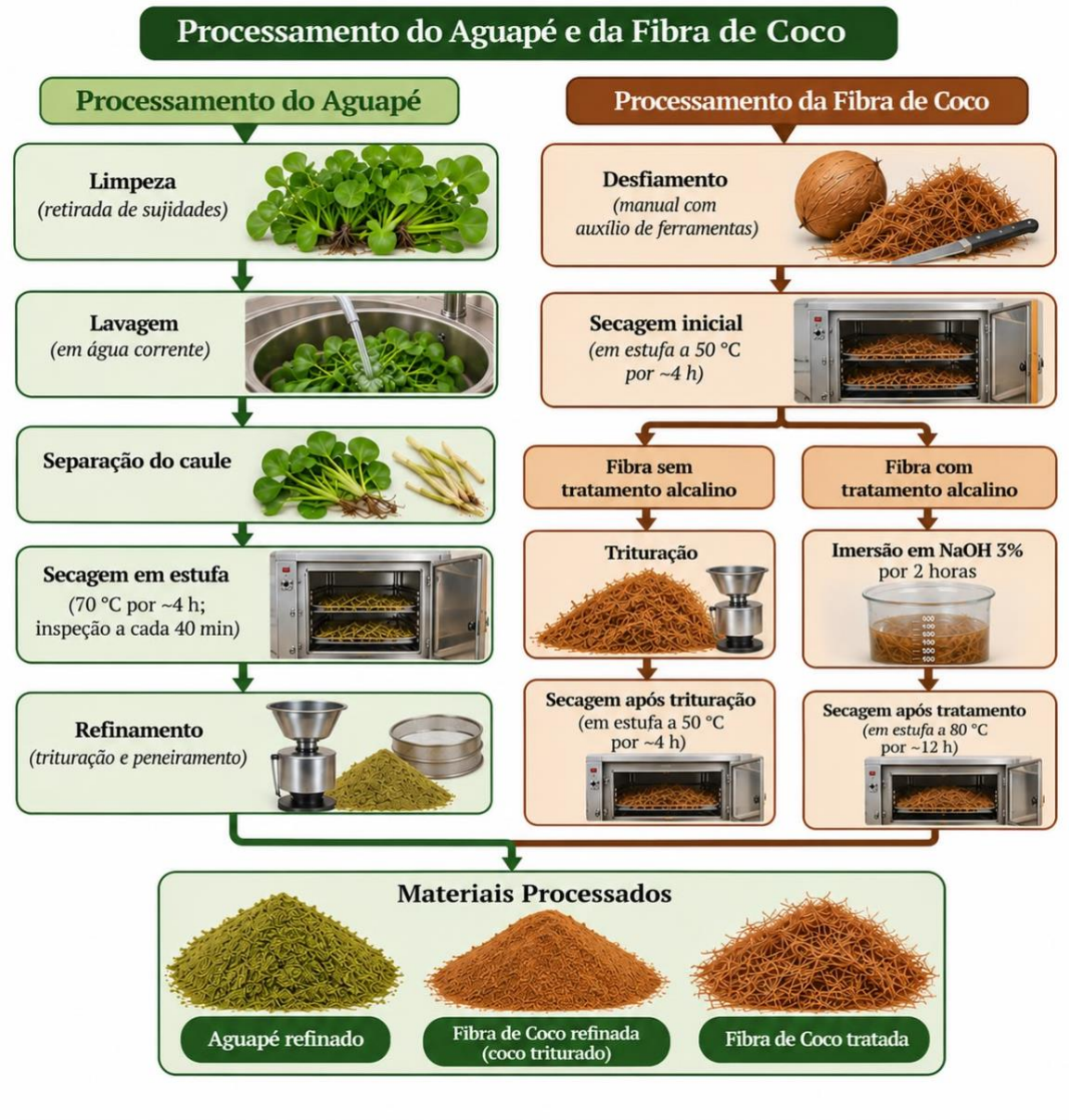
2.1.2 Processamento do Aguapé e da Fibra de Coco

No laboratório de geociências da Etec de Caraguatatuba, o aguapé passou por limpeza (retirada de sujidades), lavagem em água corrente, separação do caule, armazenamento em formas e secagem em estufa a 70°C com intervalos de inspeção de 40 em 40 minutos para verificação do material. Esse processo levou cerca de 4 horas para a secagem total do material. Que foram refinados por meio de equipamentos de trituração e peneirados.

O coco verde coletado foi desfiado manualmente em fibras e submetido à secagem em estufa a 50 °C por cerca de 4 horas, com inspeções a cada 40 minutos. Posteriormente, o material foi dividido em duas frações: uma parte foi triturada para obtenção de pó fino (fibra refinada), enquanto a outra foi mantida na forma de fibras desfiadas e submetida ao tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH). Foi utilizada uma solução aquosa de Hidróxido de Sódio na concentração de 3% (m/v), e para além disso utilizados 25g de fibra de coco para 500ml da solução alcalina, a qual corresponde a uma razão de 1:20 (m/v) entre a fibra e a solução. As fibras foram

imersas na solução durante 2 horas e após retiradas foram secas na estufa a 80°C por cerca de 12 horas - Figura 3.

Figura 3 – Processamento do aguapé e da fibra de coco.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2 Elaboração das Soluções Filmogênicas

O processo se inicia com a medição dos materiais de acordo com a Tabela 1. Em seguida, a água é submetida ao aquecimento no agitador magnético até se obter

50°C a 60°C. Posteriormente foram adicionados o CMC e o glicerol separadamente, de forma gradativa, com agitação até a solubilização completa do material, no decorrer de aproximadamente 4 horas. Na sequência foram adicionados aguapé e fibras de coco segundo a Tabela 1, que foram agitadas até a integração total com a formulação por cerca de 5 horas. Subsequentemente foram acondicionadas em formas de Teflon antiaderentes e submetidas a secagem na estufa à 50°C por volta de 13 horas (técnica casting).

Tabela 1 – Formulações dos filmes poliméricos.

Protótipo	CMC	Glicerol	Água	Aguapé	Coco	Coco Tratado
F1	15g	10mL	250mL	-	-	-
F2	15g	7mL	250mL	-	-	-
F3	15g	5mL	230mL	-	-	-
F4	15g	3,5mL	230mL	-	-	-
F5	15g	10mL	250mL	4g	-	-
F6	15g	7mL	250mL	4g	-	-
F7	15g	7mL	230mL	-	4g	-
F8	15g	7mL	230mL	-	-	5g
F9	15g	5mL	230mL	-	-	4g
F10	15g	5mL	230mL	-	-	5g
F11	15g	10mL	250mL	2g	2g	-
F12	15g	7mL	250mL	2g	2g	-

Fonte: Do próprio autor, 2026.

Conforme detalhado na Tabela 1, as formulações F5 e F6 incorporaram exclusivamente a biomassa moída do aguapé; os protótipos F7, F11 e F12 utilizaram a fibra de coco refinada (moída), isolada ou combinada ao aguapé; já as amostras F8, F9 e F10 foram reforçadas com as fibras de coco desfiadas submetidas ao tratamento alcalino.

2.3 Microscopia Óptica

O microscópio utilizado foi o Nova optical systems, nas lentes 4x e 10x, para verificação de falhas estruturais como bolhas e fendas – Figura 4.

Figura 4 – Microscópio Nova Optical Systems.



Fonte: Elaborado pelos autores

2.4 Teste de Solubilidade

O teste de solubilidade é uma técnica utilizada para medição de determinados materiais em relação a sua degradabilidade em meios aquáticos. Para a realização dos procedimentos se adiciona soluto em determinadas quantidades de solvente em um recipiente limpo, após adição os compostos são agitados e é medido o tempo para a solubilização. A metodologia utilizada, foi adaptada de Lima (2026).

O processo teve como primeira fase o corte dos filmes plásticos em três quadrados de 2x2 centímetros (triplicata), após o recorte o material foi adicionado dentro de béqueres com 50ml de água e agitado em temperatura ambiente até sua solubilização completa.

O tempo de dissolução das amostras foi registrado e a solubilidade em água (W_s) foi calculado a partir de tal equação:

$$Ws = \frac{m}{t}$$

Onde: WS = solubilidade em água g/s (gramas por segundo), m = massa da amostra g (gramas) e t = tempo de dissolução t (segundos) (Lima, 2026).

2.5 Teste de Biodegradabilidade no Solo

O teste de biodegradabilidade em solo é o processo responsável por avaliar a capacidade de uma determinada substância em ser decomposta por microrganismos (bactérias e fungos). Portanto este teste permite acompanhar as mudanças do material, a fim de compreender a sua biodegradabilidade e seus possíveis impactos no meio ambiente.

Figura 5 – Procedimento de biodegradabilidade no solo.



Fonte: Elaborado pelos autores

Como primeiro procedimento foi feito a escolha da terra que seria utilizada nos ensaios. O material selecionado foi o produto destacado como agro solo, da marca Floreira, que, em seguida foi acondicionado em uma caixa plástica. A metodologia utilizada, foi adaptada de Lima (2026). Após a escolha do material foi realizado o corte dos filmes em pequenos retângulos de aproximadamente 2x4 centímetros. Em

seguida foram separadas três amostras de partes semelhantes de cada material (triplicata) e fixadas entre telas para suporte com objetivo de realizar o ensaio com três repetições. Dessa maneira o conjunto de amostras foi enterrado verticalmente no recipiente plástico contendo o substrato. Por fim se adicionou pequenas quantidades de água visando manter a umidade necessária – Figura 5.

As amostras permaneceram enterradas por um período de 7 dias. Após a exumação, devido à fragilidade estrutural adquirida pelos filmes durante a decomposição, não foi possível realizar a limpeza mecânica completa do substrato aderido sem comprometer a integridade dos fragmentos residuais. Dessa forma, o registro da massa bruta final foi complementado pela inspeção visual e morfológica do grau de fragmentação das matrizes poliméricas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Polímeros Convencionais e suas Consequências

Os polímeros sintéticos convencionais são macromoléculas formadas por monômeros unidos por ligações covalentes estáveis, o que confere leveza, moldabilidade, impermeabilidade e elevada resistência mecânica. Produzidos predominantemente a partir de derivados do petróleo — em geral por reações de adição com substituição no etileno — esses materiais expandiram-se com o surgimento da Baquelite (1907) e a Segunda Guerra Mundial. Atualmente, a produção mundial anual excede 400 milhões de toneladas (Plastics Europe, 2024), atendendo a setores como embalagens, construção civil e medicina.

Contudo, a ineficiência no gerenciamento de resíduos — com taxa de reciclagem global de apenas 9% — culminou em uma grave crise ambiental. Estima-se um acúmulo de 86 a 150 milhões de toneladas de plásticos nos oceanos. No Brasil, cerca de 3,44 milhões de toneladas de resíduos plásticos por ano são geridas de forma inadequada, e parte delas pode alcançar corpos d’água e o mar (Alencar et al., 2023). Essa poluição compromete ecossistemas costeiros, prejudica economias locais e causa a morte de espécies marinhas por emaranhamento ou ingestão acidental de detritos.

Ademais, a degradação ambiental desses materiais origina microplásticos (partículas inferiores a 5 mm), somados aos microplásticos primários utilizados em cosméticos e indústrias. Dispersos pela água e pelo ar, esses fragmentos absorvem poluentes e bioacumulam-se na cadeia alimentar. Os microplásticos podem liberar aditivos e outras substâncias químicas, como os ftalatos, que podem ser absorvidas pelo organismo por ingestão e inalação e estão associadas a desregulações endócrinas, toxicidade celular e inflamações.

3.2 Polímeros Biodegradáveis

Os polímeros biodegradáveis destacam-se por serem materiais cuja degradação resulta da ação de microrganismos naturais (fungos, bactérias e algas), convertendo-os em substâncias como CO_2, água e biomassa. Estes materiais podem ser naturais, como os polissacarídeos (amido, celulose) e proteínas, sintéticos e semissintéticos, como a carboximetilcelulose (CMC), um derivado semissintético da celulose. Além disso podem ser usados plastificantes como o glicerol (que pode ter origem tanto natural quanto sintético) frequentemente usado para melhorar a flexibilidade dos filmes biodegradáveis

Para que a biodegradação ocorra de forma plena, são necessárias condições específicas de calor, umidade, luz e oxigênio. O processo de degradação estrutural, também chamado de biodeterioração, acontece através da colonização da superfície do polímero por microrganismos que formam biofilmes e quebram as cadeias químicas em quatro etapas principais: biodeterioração, despolimerização, assimilação e mineralização.

Entre os exemplos mais estudados estão o PLA, sintetizado a partir do amido de fontes renováveis como milho e cana-de-açúcar, e os PHAs (polihidroxialcanoatos), produzidos por bactérias como reserva de energia a partir de material orgânico, incluindo subprodutos da cana. A PCL é um poliéster sintético flexível muito utilizado em suturas absorvíveis e sistemas de libertação controlada de fármacos devido à sua biodegradabilidade em fluidos corporais. Apesar dos benefícios, estes materiais enfrentam limitações como o alto custo de produção — o PHB pode custar muito mais que o polipropileno comum — e a necessidade de

infraestrutura industrial para a compostagem, uma vez que o descarte inadequado em aterros pode gerar metano (CH_4), anulando parte das vantagens ambientais

3.3 Fibras De Coco

As fibras de coco verde são resíduos naturais abundantes obtidos da casca do fruto, sendo valorizadas por sua baixa densidade, baixa abrasividade e biodegradabilidade. A sua aplicação em bioplásticos auxilia na mitigação do impacto ambiental causado pelo acúmulo de lixo não degradável.

Para melhorar a compatibilidade e a adesão entre a fibra natural e a matriz de polímero, utiliza-se frequentemente a mercerização. Este tratamento químico com Hidróxido de Sódio (NaOH). É capaz de remover parcialmente componentes como hemicelulose, lignina, cera e impurezas, assim reduzindo a hidrofilicidade da fibra e aumentando sua rugosidade superficial, ampliando a área de contato para a ancoragem na matriz. Estudos mostram que a incorporação dessas fibras pode causar uma desorganização no empacotamento das cadeias poliméricas, o que resulta em uma diminuição do teor de cristalinidade do material final.

No que tange à biodegradação, os compósitos com fibras de coco são classificados como materiais biodegradáveis segundo normas técnicas como a ASTM G160-03. Em solo simulado, o processo de degradação é marcado por uma perda de massa crescente e por alterações morfológicas visíveis, como o surgimento de fissuras, orifícios e poros na superfície do material. Notavelmente, compósitos com fibras que não sofreram tratamento químico degradam-se mais rapidamente, pois a acetilação cria uma barreira que retarda ligeiramente o ataque inicial de microrganismos. Além disso, ensaios comparativos demonstraram que pode ter uma influência ainda mais expressiva na degradação de compósitos com fibra de coco do que o solo simulado, apresentando valores superiores de perda de massa.

3.4 Aguapé (*Eichhornia crassipes*)

A princípio, entre as matérias-primas renováveis, destaca-se a biomassa de aguapé devido à sua composição rica em lignoceluloses (como celulose, hemicelulose e lignina), que permite a criação de redes poliméricas. Entre seus principais benefícios

de seu uso, destacam-se o aproveitamento de biomassa abundante (por conta de sua resistência), já que é uma espécie com comportamento invasor, justificando a sua retirada visto que a sua ação pode ser prejudicial ao ecossistema a partir do processo de eutrofização, elevando de forma descontrolada o seu ciclo de reprodução e formando uma cobertura contínua na interface água-atmosfera, alterando os níveis de oxigênio no ambiente por falta de luz solar e inibindo a fotossíntese dos organismos ali presentes. Destaca-se também a rápida degradação no meio ambiente (biodegradação).

Além disso o aguapé pode acumular os nutrientes presentes na água, como os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S), principalmente em ambientes eutrofizados, onde há excesso desses nutrientes. Dessa forma a utilização dessa biomassa contribui para recuperação dos ambientes aquáticos.

O aguapé desempenha um papel diverso na produção de plásticos biodegradáveis, atuando tanto como matéria-prima para a síntese de novos biopolímeros quanto como agente ativo no processo de decomposição ambiental. Plantas aquáticas, como o aguapé (*Eichhornia crassipes*), utiliza-se na produção de filmes biodegradáveis, onde se utiliza frequentemente o glicerol como plastificante para conferir a flexibilidade necessária ao material final. Além disso, a celulose do aguapé é utilizada como componente estrutural e fibra de reforço sendo a principal responsável por conferir resistência mecânica e estabilidade ao material.

A celulose representa cerca de 29,17% da massa seca da planta. Ela possui uma estrutura cristalina mantida por fortes ligações de hidrogênio, o que a torna insolúvel em água e solventes orgânicos convencionais, visto isso a extração da celulose não é realizada, deixando-a integrada à própria planta.

3.5 Aplicação

O desenvolvimento contemporâneo de plásticos biodegradáveis baseia-se na combinação de matrizes poliméricas com cargas vegetais e plastificantes para otimizar tanto o desempenho mecânico quanto a sustentabilidade ambiental. Nesse cenário, as fibras de coco verde têm sido amplamente empregadas como reforço estrutural em matrizes poliméricas biodegradáveis, visando melhorar as propriedades de tração e conferir maior rigidez ao compósito (Leite et al., 2010).

De forma complementar, o aguapé (Eichhornia crassipes) destaca-se no desenvolvimento de biopolímeros como uma promissora fonte de biomassa lignocelulósica para a elaboração de filmes biodegradáveis. Nessas formulações, o glicerol atua como o principal agente plastificante ao ser integrado à celulose e à água, conferindo a flexibilidade necessária para evitar a fragilidade do material. A associação entre a matriz de aguapé e as fibras de coco agrega propriedades funcionais relevantes ao produto, equilibrando resistência e manuseabilidade. Contudo, a eficácia prática desses compósitos depende diretamente da sua capacidade de biodegradação, processo que é influenciado pela proporção de aditivos, pelo teor de plastificantes e pelos tratamentos interfaciais aplicados às fibras para melhorar sua adesão à matriz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

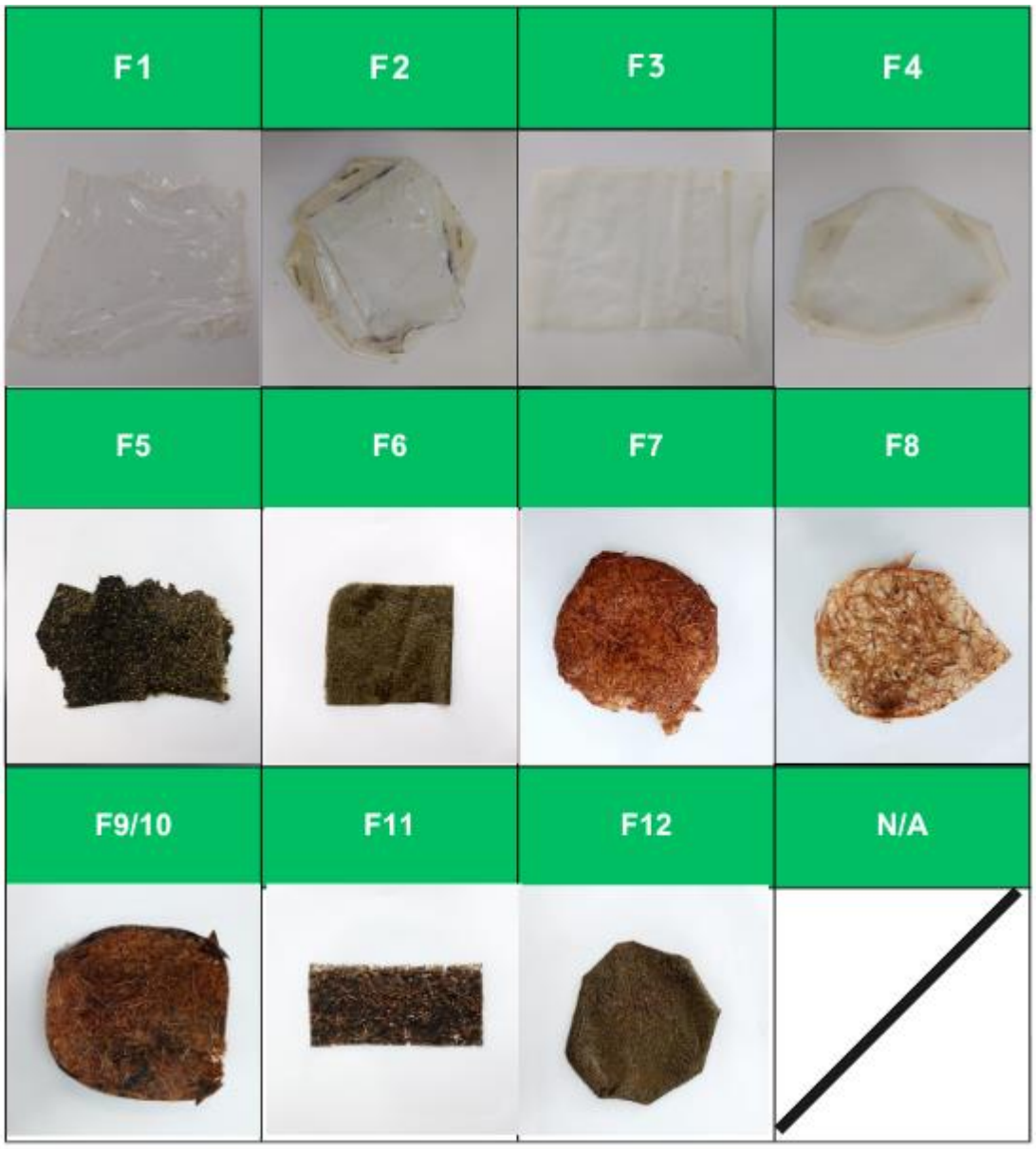
4.1 Aspectos Visuais/Mecânicos das Amostras

A produção dos filmes foi realizada a partir da utilização de CMC (carboximetilcelulose) e glicerina vegetal bidestilada (glicerol), seguindo as medidas previamente determinadas. O procedimento começou com a preparação das vidrarias e produtos utilizados, nos primeiros filmes foi utilizado entre 230mL e 250mL de água, essa foi aquecida sobre um agitador magnético até temperaturas entre 50º e 70º C (graus Célsius) medida por um termômetro de mercúrio, após a água atingir a temperatura desejada foi adicionado o CMC (que se manteve em 15 gramas entre todos os filmes) e o glicerol (com variação de 3,5 a 10 mililitros) de forma gradativa até a sua solubilidade completa, subsequentemente foi adicionado às biomassas segundo a Tabela 1.

Na tabela 2 é possível observar os filmes elaborados. Os protótipos F1 a F3 apresentaram maleabilidade satisfatória para a produção de embalagens, porém, resistência inferior aos demais, devido à falta de biomassa e elevada taxa de glicerol. Após um período em repouso, os plásticos absorveram a umidade ambiente afetando sua estrutura, perdendo sua devida rigidez e aumentando sua consistência pegajosa. A amostra F4 foi formulada com a menor utilização de glicerol dentre os filmes, o

resultado obtido foi uma maior rigidez e uma estrutura mais quebradiça, com menor flexibilidade e maior tendência à ruptura.

Tabela 2 – Aspecto visual das amostras



Fonte: Do próprio autor, 2026.

As amostras F5 e F6 foram as primeiras a serem formuladas com a presença do aguapé triturado, tornando a sua superfície dual: um verso rugoso com a presença do aguapé, e outro verso liso composto majoritariamente pelos plastificantes, resultando em maior rigidez do produto. Durante o processo de secagem o plástico

F5 apresentou uma proliferação de mofo, devido à alta quantidade de água e a presença de biomassa na sua formulação.

Os modelos F7 a F9/10 por possuírem as fibras de coco tiveram como a sua característica principal a dureza de sua estrutura, sem torná-lo frágil e quebradiço. Ideal para a confecção de bandejas.

Já os exemplares F11 e F12 contam com a fusão das biomassas e foram os protótipos mais promissores para a preparação de invólucros para mudas. Sendo um material que une a manuseabilidade do aguapé com a rigidez do coco.

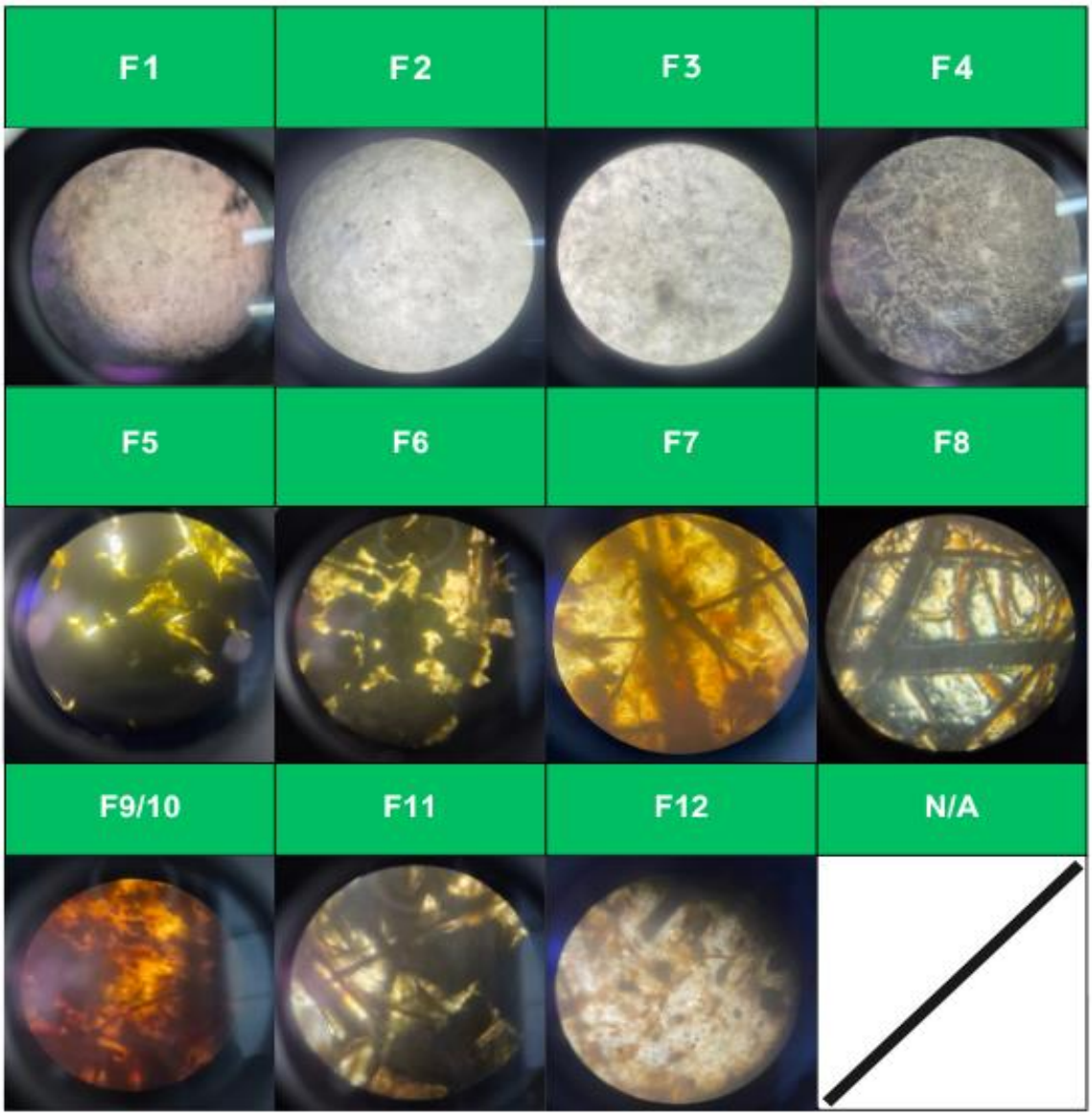
Também é importante considerar a influência das condições ambientais durante a secagem das amostras, especialmente a temperatura e a umidade do ar. Durante os experimentos, houve um volume elevado de chuvas, o que provavelmente aumentou a umidade do ambiente e interferiu no processo de secagem, na conservação e nas propriedades físicas dos filmes, podendo ter contribuído para alterações na rigidez e para a proliferação de mofo observada na amostra F5.

4.2 Resultados da Microscopia Óptica

Na tabela 3 é possível observar as imagens realizadas no microscópio óptico das amostras. Em sua maioria, os plásticos apresentaram boa continuidade em seus filmes, sem falhas aparentes. Entretanto os protótipos de F1 a F4 por não conterem biomassa apresentaram uma maior transparência em seus filmes e a presença de pequenas bolhas, F5 a F12 não tiveram a matriz totalmente integrada ao plastificante, o que não impactou na performance final do produto, apenas a existência de duas fases visíveis no plástico.

Nos protótipos reforçados com fibras de coco desfiadas e não moídas finamente (como F8 e F9/10), bem como nas amostras com maior concentração de fibras agregadas (F7 e F11), observou-se uma distribuição heterogênea das estruturas vegetais, caracterizada pela presença de filamentos fibrosos alongados dispostos em diferentes orientações ao longo da matriz polimérica. Por outro lado, nas formulações contendo apenas biomassa finamente triturada (F5, F6 e F12), os particulados apresentaram dispersão mais homogênea.

Tabela 3 – Microestrutura das amostras. Lente mais usada: 10x **100:1** (1 milímetro da amostra é ampliado em 100 milímetros).



Fonte: Do próprio autor, 2026.

4.3 Teste de Solubilidade

De modo geral o resultado do teste de solubilidade apresentou um comportamento distinto entre os protótipos, com variações na massa média, no tempo médio e na taxa média de perda de massa (WS) – Tabela 4. Sendo F1 o que apresentou o menor tempo médio (6,67 minutos) e a maior taxa de perda de massa ($9{,}66\times10^{-4}$ g/s), enquanto o F8 registrou a menor taxa ($3{,}33\times10^{-4}$ g/s). Já o F9/10 apresentou a maior massa média (0,62 g) e o maior tempo médio (20,33 minutos).

Observa-se na Tabela 4 que os tratamentos F7 a F10 apresentaram os maiores tempos de dissolução dentre os protótipos avaliados, evidenciando que a incorporação da fibra de coco conferiu maior resistência estrutural em meio aquoso. No protótipo F7 (fibra in natura), essa estabilidade deve-se à manutenção integral da lignina, componente naturalmente hidrofóbico; já nas formulações F8 a F10 (fibras mercerizadas), a parcial remoção de hemicelulose e ceras pelo tratamento alcalino elevou a rugosidade superficial, otimizando a ancoragem mecânica na matriz de CMC e dificultando a permeação da água. Já os processos F2, F3, F4, F6 demonstraram um valor de perda de massa relativamente próximas sendo respectivamente, F2 ($5{,}88\times10^{-4}$g/s), F3 ($5{,}11\times10^{-4}$ g/s), F4 ($5{,}35\times10^{-4}$ g/s) e F6 ($5{,}44\times10^{-4}$ g/s).

Tabela 4 – Dados da solubilidade média.

Protótipo	Massa média (g)	Tempo médio (min)	WS médio (g/s)
F1	0,36	6,67	$9{,}66\times10^{-4}$
F2	0,33	9,33	$5{,}88\times10^{-4}$
F3	0,30	10,00	$5{,}11\times10^{-4}$
F4	0,25	8,00	$5{,}35\times10^{-4}$
F5	0,39	9,67	$7{,}04\times10^{-4}$
F6	0,31	9,67	$5{,}44\times10^{-4}$
F7	0,43	18,67	$3{,}91\times10^{-4}$
F8	0,31	15,67	$3{,}33\times10^{-4}$
F9/10	0,62	20,33	$5{,}13\times10^{-4}$
F11	0,42	9,33	$7{,}50\times10^{-4}$
F12	0,29	9,33	$5{,}19\times10^{-4}$

Fonte: Do próprio autor, 2026.

4.4 Teste de Biodegradação

Após 7 dias de exposição ao solo simulado, os protótipos apresentaram diferentes níveis de deterioração estrutural, conforme registrado na Tabela 5. Observa-se que os valores de massa residual dos filmes com biomassa (como F7,

com 7,88 g, e F9/10, com 5,26 g) superaram a massa seca inicial dos corpos de prova (Tabela 4). Esse acréscimo deve-se à forte aderência de partículas úmidas do substrato às fibras vegetais expostas, cuja remoção completa mostrou-se inviável sem destruir a estrutura fragilizada dos resíduos. Por essa razão, a avaliação da biodegradabilidade fundamentou-se prioritariamente na integridade física e na análise visual das amostras (Tabela 6), em vez da perda de massa líquida isolada.

Tabela 5 – Resultados da degradação dos filmes.

Protótipo	Massa residual bruta com substrato aderido (g)	Situação
F1	----	Degradado completamente
F2	----	Degradado completamente
F3	----	Degradado completamente
F4	----	Degradado completamente
F5	0,86	Muito degradado
F6	0,63	Muito degradado
F7	7,88	Parcialmente degradado
F8	2,11	Parcialmente degradado
F9/10	5,26	Parcialmente degradado
F11	1,56	Parcialmente degradado
F12	0,48	Muito degradado

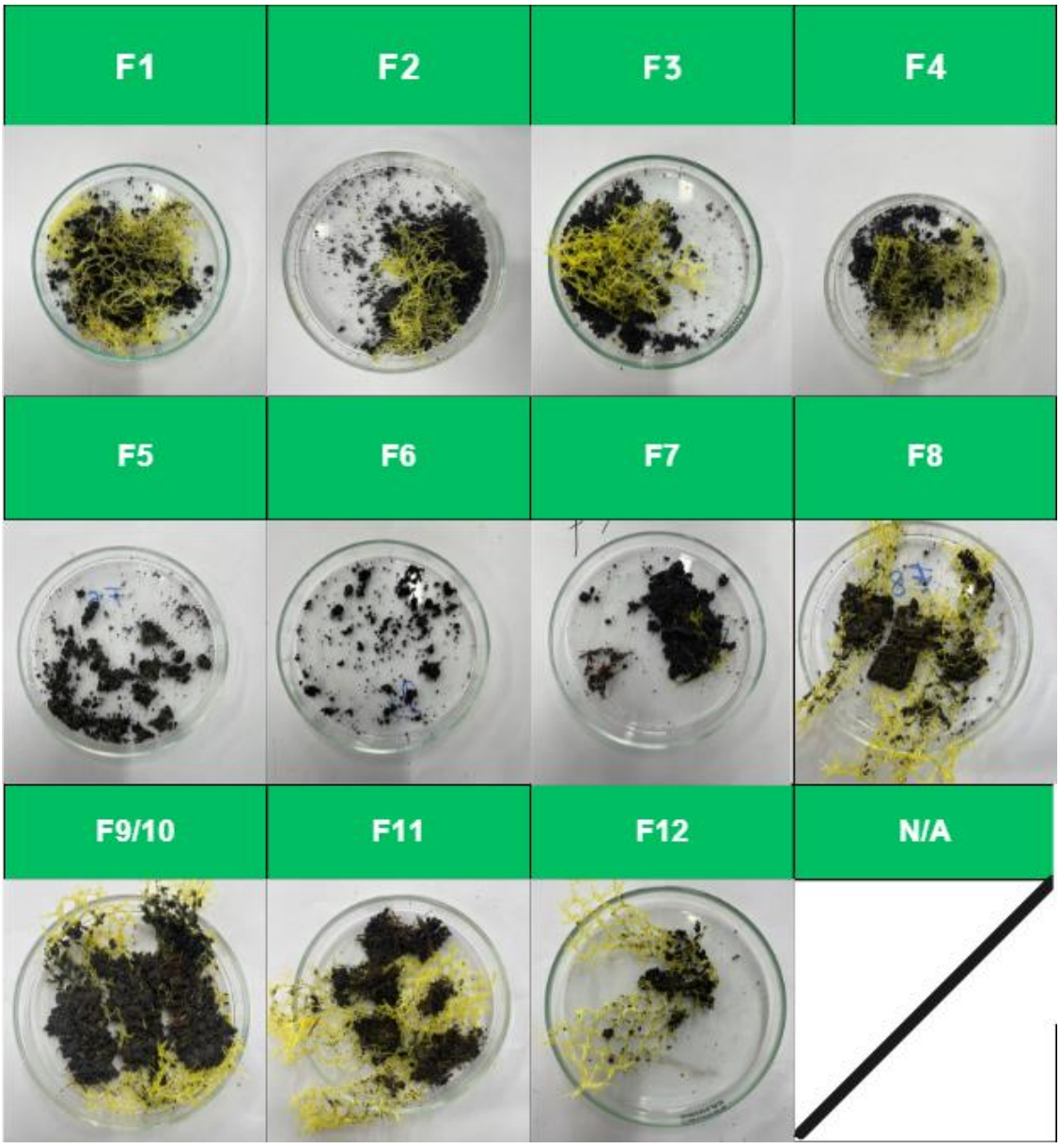
Fonte: Do próprio autor, 2026.

Os filmes de F1 a F4 tiveram 100% de sua estrutura degradada, por não possuírem nenhuma biomassa, facilitando a degradação. F5 e F6 tiveram grande parte de sua biomassa deteriorada, com a presença de apenas alguns vestígios do aguapé.

Os protótipos de F7 a F11 foram os protótipos com o peso mais elevado em virtude da maior aderência da terra ao filme. Ainda foi possível observar a estrutura original dos filmes, cujas matrizes apresentaram cinética de biodegradação mais lenta em virtude da incorporação das fibras de coco. No caso do protótipo F7 (fibra in natura), a lentidão decorre do elevado teor original de lignina — macromolécula rígida

e hidrofóbica de difícil degradação enzimática —, enquanto nos protótipos F8 a F10 (fibras submetidas ao tratamento alcalino com NaOH), a remoção de ceras e hemiceluloses promoveu maior compactação e adesão interfacial com a matriz de CMC, atuando como barreira física contra a penetração de umidade e o ataque inicial de microrganismos.

Tabela 06 – Aspectos visuais dos filmes após o teste de biodegradação.



Fonte: Do próprio autor, 2026.

A amostra F12 gerou um resultado satisfatório, visto que apresenta a fusão das duas biomassas, e com a diminuição do coco o protótipo se tornou mais suscetível

a biodegradação. Visto isso, é possível sugerir que seu caráter biodegradável, mas não se pode afirmar o tempo exato para tal. Na tabela 06 é possível observar o estado de biodegradação das amostras após 7 dias de tratamento.

O comportamento observado nos ensaios de dissolução e biodegradação corrobora os resultados descritos por Lima (2026), que avaliou biofilmes à base de polissacarídeos sulfatados da macroalga *Hypnea pseudomusciformis* incorporados com óleo de babaçu pelo mesmo método de taxa de dissolução (WS = m/t). Assim como a adição de óleo de babaçu reduziu a afinidade com a água pela formação de domínios hidrofóbicos na matriz polimérica, a incorporação das fibras de coco no presente estudo diminuiu a velocidade de dissolução aquosa (de 9,66 $x10^{-4}$ g/s em F1 para 3,33 $x10^{-4}$ g/s em F8), efeito associado tanto à hidrofobicidade da lignina residual quanto ao aumento da adesão fibra-matriz resultante da mercerização. Ademais, em ambos os estudos, esses fatores estruturais e hidrofóbicos atuaram como barreira física à penetração de água e microrganismos, retardando a cinética inicial de biodegradação em solo em comparação às matrizes poliméricas puras, sem comprometer o caráter biodegradável final dos compósitos.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como seu principal objetivo o desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir do uso da carboximetilcelulose (CMC) e glicerol, utilizando também o aguapé como biomassa vegetal e fibra de coco como material de reforço, buscando dessa forma as melhores qualidades físicas e mecânicas para aplicações no cotidiano caiçara e para um melhor aproveitamento dos resíduos naturais.

A partir dos resultados obtidos, pode se concluir que o uso do glicerol e o uso das biomassas influenciaram diretamente nas características dos protótipos produzidos. As amostras com maior quantidade de glicerol apresentaram maior maleabilidade, porém, uma menor resistência mecânica à umidade ambiente. Entretanto as que possuíam uma menor quantidade de glicerol demonstraram uma estrutura mais rígida e quebradiça. A utilização de fibras de coco fortaleceu a estrutura. Enquanto o aguapé apresentou uma superfície dual (parte com maior

concentração de glicerol e a outra com predominância do aguapé) nos protótipos que foi usado.

Dessa forma, conclui-se que a utilização das biomassas e o uso dos plastificantes se mostraram como uma boa alternativa para a substituição dos plásticos convencionais revelando potencial biodegradável e solúvel. Dentre as doze formulações, destacou-se o protótipo F12 como melhor opção, pois a fusão das duas biomassas (aguapé e fibras de coco) proporcionou um equilíbrio entre a manuseabilidade e uma rigidez estrutural ideal e uma taxa satisfatória de solubilidade e degradabilidade. Foi visto que os filmes têm apresentado capacidade para aplicação em embalagens sustentáveis, considerando a avaliação de suas propriedades ópticas, microscópicas e de biodegradabilidade.

Recomenda-se, para estudos futuros, a avaliação do desempenho dos filmes em suas propriedades físico-químicas, aperfeiçoar os métodos de processamento, realizar testes de biodegradação com acompanhamento da perda de massa ao longo do tempo e a inclusão de uma fração lipídica a fim de aumentar a impermeabilidade do material

Agradecimentos

A elaboração deste estudo teve o apoio de diversas pessoas e recursos fundamentais para a sua realização. Primeiramente, é de extrema necessidade agradecer à professora Marivane Turim Koschevic, cujo suporte incondicional, paciência e incentivo foram indispensáveis para a conclusão do projeto acadêmico. A MSc. Fernanda Renata Almeida Ribeiro, nosso sincero agradecimento pelo apoio dentro e fora do laboratório, nos conselhos para o manuseio dos equipamentos e pela ajuda fundamental tanto na solução de problemas práticos quanto na indicação de documentos e referências para auxiliar o trabalho.

Declaração de Uso de Inteligência Artificial Generativa:

No que tange à organização do estudo, foram utilizadas as ferramentas de Inteligência Artificial Generativa: Gemini e Notebook LM, sua utilização foi feita de forma exclusiva como suporte auxiliar na organização e sistematização das referências bibliográficas (textos e artigos utilizados na pesquisa). As imagens utilizadas em forma de tabelas foram todas feitas com os auxílios da plataforma Canva, mas se mantendo totalmente

autorais. Destaca-se que nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para a geração de dados, resultados, análise ou conclusões científicas. Todo o conteúdo foi integralmente produzido, verificado e revisado pelos autores, que assumem total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade deste manuscrito.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, M. V. *et al*. Advancing plastic pollution hotspotting at the subnational level: Brazil as a case study in the Global South. Marine Pollution Bulletin, v. 194, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X23008160. Acesso em: 29 set. 2026.

BERNARDES, Júlio; EMMANUEL, Emmanuelita. Temido por efeitos à saúde, bisfenol não está presente na produção dos principais plásticos. *Jornal da USP*, São Paulo, 20 ago. 2026. Disponível em: https://jornal.usp.br/ciencias/temido-por-efeitos-a-saude-bisfenol-nao-esta-presente-na-producao-dos-principais-plasticos/. Acesso em: 27 out. 2026.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 27 out. 2026.

BUSON, Raianne Ferreira. Investigação das propriedades mecânicas dos compósitos de resina poliéster insaturada reforçados com fibras de bambu natural e modificadas superficialmente. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/34694. Acesso em: 27 out. 2026.

CASTRO, Fábio de. Cientistas querem associar fabricação de bioplásticos à cadeia de produção do etanol. *Agência FAPESP*, 26 jul. 2012. Disponível em: https://agencia.fapesp.br/cientistas-querem-associar-fabricacao-de-bioplasticos-a-cadeia-de-producao-do-etanol/15936. Acesso em: 27 out. 2026.

FRANCHETTI, Sandra Mara Martins; MARCONATO, José Carlos. Polímeros biodegradáveis: uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. *Química Nova*, v. 29, n. 4, p. 811–816, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000400031. Acesso em: 27 set. 2026.

GONÇALVES, Beatriz dos Santos; OLIVEIRA, Emille Carvalho Schramm de; TOSTA, Emilly Francisco; SANTOS, Hanna de Araújo dos. Sustentabilidade e limitações do PLA: estudo sobre sua aplicação em copos descartáveis. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Salvador, Salvador, 2025. Disponível em: https://repositorio-api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/099a1671-e507-44fb-bcb1-4c35adbb1de7/content. Acesso em: 27 out. 2026.

IPBES. Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control. ROY, H. E.; PAUCHARD, A.; STOETT, P.; RENARD TRUONG, T. (ed.). Bonn: IPBES Secretariat, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.7430682. Acesso em: 29 out. 2026.

KITAJIMA, Karolina Miyuki; ZAFALÃO, Luis André da Silva; AGUIAR, Luiz Henrrick Nogueira. Produção de bioplástico a partir do bagaço de cana-de-açúcar. 2025.

LEITE, Marcia C. A. M.; FURTADO, Cristina R. G.; COUTO, Lessandra O.; OLIVEIRA, Flavia L. B. O.; CORREIA, Thiago R. Avaliação da biodegradação de compósitos de poli(ε-caprolactona)/fibra de coco verde. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 20, n. 5, p. 339–344, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000063. Acesso em: 27 set. 2026.

LIMA, Erivan Santos. Filmes à base de polissacarídeos sulfatados da alga marinha vermelha (Hypnea pseudomusciformis) incorporados com óleo de babaçu: elaboração e caracterização. 2026. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2026. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/86254. Acesso em: 17 nov. 2026.

MEDINA, Rebeca P.; SUEHIRO, Guilherme; SOUZA, Maria C. de; GÓMEZ PINEDA, Edgardo A.; WINKLER HECHENLEITNER, Ana A.; ABE TANAKA, Clara M. Preparação de celulose e derivados a partir das folhas da planta *Eichhornia azurea*. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 30., 2007. Disponível em: https://www.sbq.org.br/30ra/cdrom/resumos/T0685-1.pdf. Acesso em: 27 set. 2026.

PANIZZON, Jenifer; RODRIGUES, Thaís Fátima; LIMA, Ana Carolina; OLIVEIRA, Daniela de Lima de; FÜHR, Karine Taynara; QUEVEDO, Daniela Müller de; SOBRAL, Paula; GEHLEN, Günther; JAHNO, Vanusca Dalosto. From source to mouth: an integrated assessment of microplastics in the Sinos River, Southern Brazil, using SEM-EDS analysis and atmospheric modeling. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 61, e2883, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.5327/Z2176-94782883. Acesso em: 27 set. 2026.

PLASTICS EUROPE. Plastics – the Fast Facts 2024. Bruxelas: Plastics Europe, 2024. Disponível em: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/. Acesso em: 29 set. 2026.

ROLA, Monick Alves da Cruz. Avaliação da biodegradabilidade de polímeros comerciais pelo método de ambiente marinho simulado. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/26027. Acesso em: 27 set. 2026.

ROSSI, Adriana Vitorino; TERCI, Daniela B. Lopes; TERRA, Juliana; PINHEIRO, Tânia Ap. L. Separando e identificando alguns plásticos. Campinas: Grupo de Pesquisas em Química Analítica e Educação, Instituto de Química, Universidade

Estadual de Campinas, 2005. Disponível em: https://gpquae.iqm.unicamp.br/expplasticos.pdf. Acesso em: set out. 2026.

SOUZA, Edson. Quais são os impactos do plástico no meio ambiente? *Cestos de Lixo e Lixeiras*, 4 jul. 2024. Disponível em: https://cestosdelixoelixeiras.com.br/blog-lixeiras/quais-sao-os-impactos-do-plastico-no-meio-ambiente. Acesso em: 27 set. 2026.

SOUZA, Gabriela Courbis Saab de. Plásticos utilizados na indústria alimentícia, seus malefícios para a saúde e para a sustentabilidade: a toxicidade do BPA e a quantidade de lixo gerado. Brasília, 2021. Trabalho acadêmico. Disponível em: https://repositorio.uniceub.br/server/api/core/bitstreams/9b407683-9f23-41a8-bc78-827507e17b40/content. Acesso em: 27 set. 2026.