

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

ANA LUIZA RODRIGUES DOS SANTOS

ELIAS GONÇALVES CASTILHO

**Revisão sobre a aplicação de nanocristais de celulose em  
poli(butadieno adipato-co-tereftalato) para aplicações de filmes  
biodegradáveis.**

CAMPINAS/SP  
2025

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

ANA LUIZA RODRIGUES DOS SANTOS

ELIAS GONÇALVES CASTILHO

**Revisão sobre a aplicação de nanocristais de celulose em poli(butadieno adipato-co-tereftalato) para aplicações de filmes biodegradáveis.**

Trabalho de Graduação apresentado por **Ana Luiza Rodrigues dos Santos e Elias Gonçalves Castilho**, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em **Processos Químicos**, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação da Prof<sup>a</sup>. Dra. **Juliana Canto Duarte**

CAMPINAS/SP  
2025

ANA LUIZA RODRIGUES DOS SANTOS

ELIAS GONÇALVES CASTILHO

**Revisão sobre aplicação de nanocristais de celulose em poli(butadieno adipato-co-tereftalato) para aplicações de filmes biodegradáveis**

Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Químicos, pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Fatec Campinas.

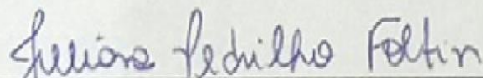
Campinas, 02 de dezembro de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**



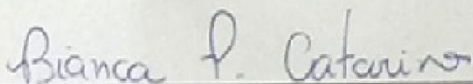
---

Juliana Canto Duarte  
Fatec Campinas



---

Juliana Pedrilho Foltin  
Fatec Campinas



---

Bianca Pavan Catarino  
Fatec Campinas

## **RESUMO**

Atualmente, diversos tipos de artefatos de plástico são constantemente produzidos. As poliolefinas, polímeros obtidos através da destilação do petróleo, apresentam pouca ou praticamente nenhuma degradabilidade, causando danos à saúde humana, animal e ao meio ambiente quando não são descartadas corretamente. Grande parte do plástico produzido é utilizada na fabricação de itens descartáveis, como embalagens ou produtos de curta duração. Esse modelo de utilização indica que o uso atual dos plásticos não apresenta sustentabilidade. Dessa forma, por meio de estudos das interações da celulose nanocristalina com plásticos biodegradáveis, desenvolveu-se um copolímero biodegradável resistente e flexível, no qual foram observadas mudanças significativas em suas propriedades mecânicas, sendo sua principal aplicação o desenvolvimento de embalagens. Assim, este trabalho buscou compreender a performance e a adaptação desse copolímero.

**Palavras-chave:** CNC's, copolímero biodegradável, polímeros sintéticos.

## **ABSTRACT**

Currently, various types of plastic artifacts are constantly being produced. Polyolefins, polymers obtained through petroleum distillation, exhibit little to no degradability, thereby causing harm to human and animal health as well as to the environment when not properly disposed of. A large portion of the plastic produced is used in the manufacture of disposable items, such as packaging or short-lived products. This pattern of use indicates that the current utilization of plastics is not sustainable. Thus, through studies on the interactions between nanocrystalline cellulose and biodegradable plastics, a resistant and flexible biodegradable copolymer was developed. Significant changes were observed in its mechanical properties, and its main application lies in the development of packaging materials. Therefore, this study sought to understand the performance and adaptability of this copolymer.

**Keywords:** biodegradable copolymer, CNC's, Synthetic Polymers.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Estrutura química da celulose em natura \_\_\_\_\_ Pág. 2

**Figura 2.** Estrutura química do PBAT. \_\_\_\_\_ Pág. 3

**Figura 3.** Estrutura hierárquica da celulose \_\_\_\_\_ Pág. 5

**Figura 4.** Processo de hidrolise ácida \_\_\_\_\_ Pág. 6

**Figura 5** Formação dos filmes \_\_\_\_\_ Pág. 10

## LISTA DE SIGLAS

$^{13}\text{C}$ -NMR.....Ressonância magnética nuclear de carbono-13

CNC.....Celulose Nano Cristalina

CNF.....Celulose Nano Fibrilada

PBAT.....Poli (butileno adipato-co-tereftalato)

PEBD.....Polietileno de Baixa Densidade

FTIR.....Epectoscopia por infravermelho com transformada de Fourier

GPA.....Gigapascal

MEV.....Microscopia eletrônica de varredura

UFC/cm<sup>2</sup>.....Unidade Formadora de Colonias  
/Centímetros ao Quadrado

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
	1.1 Contextualização .....	3
	1.2 Justificativa/Problemática .....	3
	1.3 Objetivos .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>9</b>
	3.1 Acetilação da celulose.....	9
	3.2 Processo de formação dos filmes .....	9
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>14</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais causados pelo descarte inadequado dos plásticos vêm sendo cada vez mais abordados devido aos impactos causados no meio ambiente. Por conta desses danos, o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis vem sendo considerado um dos grandes desafios da atualidade. Em aplicações de embalagens levantou preocupações em relação a poluição ambiental, logo ao gerenciamento seguro dos resíduos. Grandes quantidades de materiais de embalagem são produzidas todos os anos com a intenção de uso e descarte. A gestão atual para lidar com resíduos plásticos pós-consumo incluem incineração e aterro sanitário, que por sua vez contribuem para problemas ambientais, não garantindo um tratamento correto desses materiais. (Khalil, H.P.S et. al. 2016).

A conscientização ambiental, qual estima-se a substituição dos polímeros não biodegradáveis, plásticos comerciais, pelos biodegradáveis, que são considerados ecologicamente corretos. No entanto devemos considerar que as propriedades mecânicas desses materiais biodegradáveis, são, frequentemente, considerados inferiores em comparação aos derivados do petróleo (Fredri & Dorigata,. 2021). Por sua vez, o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis com propriedades semelhantes aos plásticos comerciais tem sido uma grande barreira para a produção de "plásticos verdes".

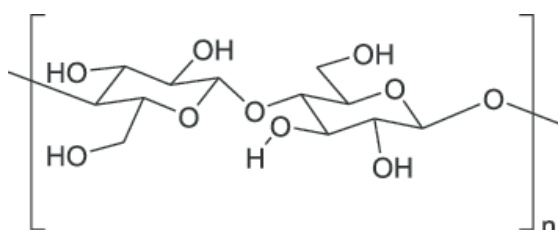
Logo houve uma crescente demanda do mercado por produtos de menor impacto ambiental o que resultou em alta demanda de pesquisas sobre os polímeros biodegradáveis voltados para o desenvolvimento em embalagens plásticas (Morelli, 2014). Todavia, os biopolímeros necessitam de um reforço visando o aprimoramento das propriedades intrínsecas do material. Em contrapartida, as fibras de celuloses em seu estado natura, são caracterizadas por uma alta temperatura de transição vítrea e normalmente se degradam abaixo de sua temperatura de fusão, logo inviabilizando o processamento por rotas termoplásticas. (Lo Re *et al.*, 2023).

Após o advento da nanotecnologia e aprofundamento do tema em questão, estudos demonstraram que a utilização de reforços em escala nanométrica pode levar a modificações interessantes em relação aos esforços mecânicos referente a fase elastomérica dos materiais, módulo de Young (Morelli, 2014).

A celulose é um dos biopolímeros mais abundantes e naturais do planeta, pois é derivada de vários tipos de materiais, por exemplo, as biomassas extraídas de plantas e animais, considera promissora para a substituição das poliolefinas (Shaikh *et al.*, 2023). A celulose é um

polissacarídeo composto por unidades repetitivas de anidroglicose ligadas por meio de ligações  $\beta$ -1,4-glicosídica. Onde cada unidade consiste em três grupos hidroxila, conforme mostrado na Figura 1.

**Figura 1** - Estrutura química da celulose em natura.



Fonte: Da Silva Junior, 2006.

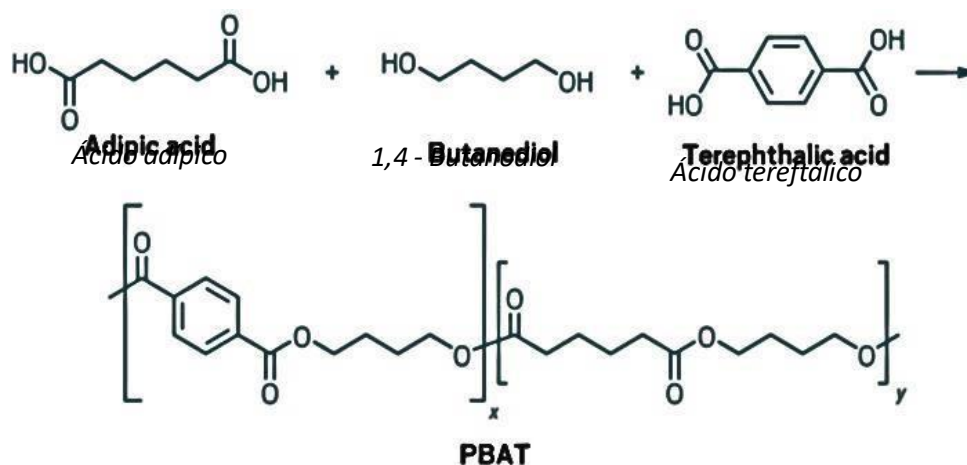
Por ser um polímero não tóxico e biodegradável com alta resistência à tração e compressão, tem amplo uso em vários segmentos, nanotecnologia, farmacêutica, alimentícia, cosméticos, têxtil e de papel. A celulose nanocristalina, em particular, está entre os derivados de celulose mais interessantes devido a sua biocompatibilidade e alta resistência.

O poli(butileno adipato co-tereftalato) ou PBAT, também conhecido por seu nome comercial Ecoflex (comercializado pela empresa BASF), é um copolímero biodegradável derivado do petróleo e formado pelos ácidos adípico e tereftálico combinados com butanediol, representado pela Figura 2. O material, copoliéster alifático-aromático, é um polímero sintético baseado em recursos fósseis, porém biodegradável. Apresenta boa processabilidade e flexibilidade, logo podendo ser aplicado em embalagens flexíveis, devido às suas características. Entretanto, seu alto custo e propriedades termomecânicas inferiores em comparação com polímeros não biodegradáveis, plásticos comerciais (Ferreira *et al.*, 2019).

O polímero é notável por suas propriedades comparáveis às do polietileno de baixa densidade, tornando-o um excelente candidato para aplicações em embalagens. No entanto, a adoção mais ampla do PBAT é dificultada por seu custo relativamente alto e propriedades termomecânicas inferiores em comparação com polímeros convencionais não biodegradáveis.

Ao reforçar biocompósitos à base de PBAT com celulose é possível aumentar sua resistência termomecânica, bem como melhorar suas capacidades de barreira ao vapor de água e ao oxigênio, superando as do PBAT puro (Gondim *et al.*, 2024)

Figura 2 - Estrutura química do PBAT.



Fonte: Tullo, 2021.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente, a reutilização de materiais plásticos tem se tornado um tema demasiado atrativo, embora não tenha sido completamente bem-sucedida em nível global. Isso se deve ao fato de um dos principais desafios está ligado com a separação desses insumos com os resíduos orgânicos, logo resultando em custos e desperdício de tempo (Rosa & Pântano Filho, 2003).

Contudo o uso dos polímeros biodegradáveis apresenta uma série de benefícios ambientais, como regeneração de matérias-primas, biodegradação e redução de emissões de dióxido de carbono, no qual levam ao aquecimento global. (Samir *et al.*, 2022)

## 1.2 JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA

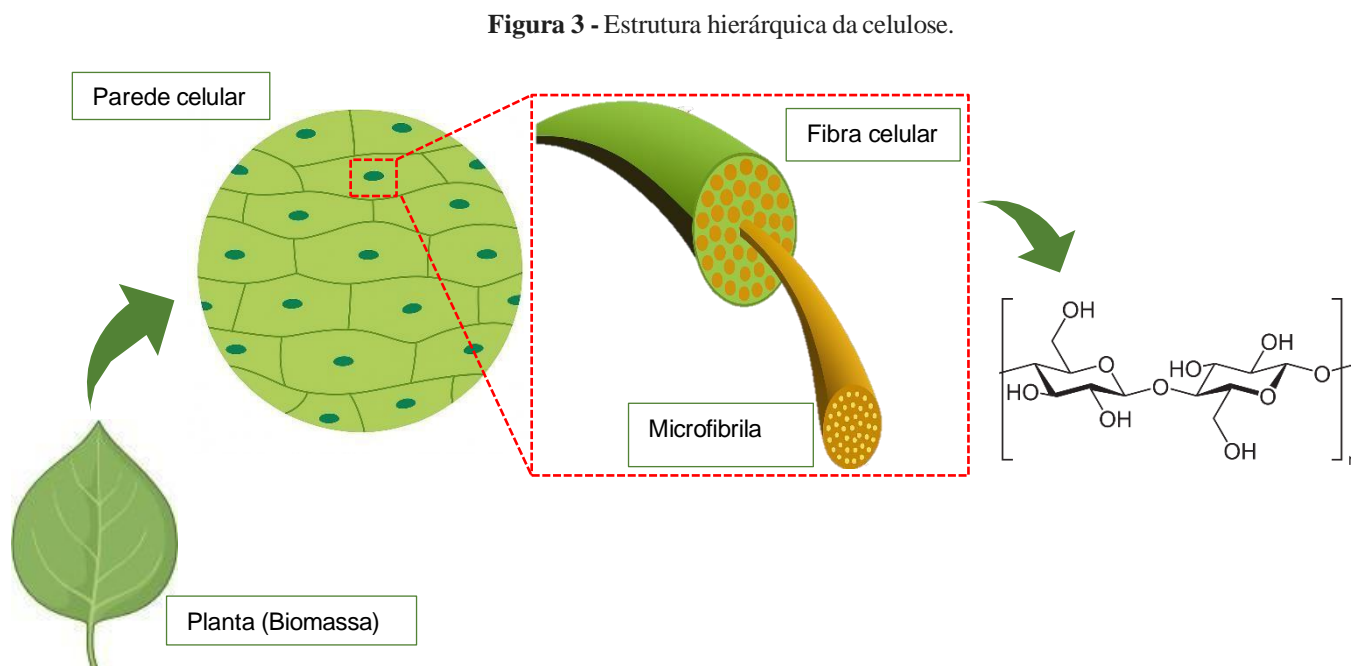
A extração intensa de recursos naturais e a falta de cuidado humano causam vários impactos negativos à natureza, sendo um deles o descarte incorreto dos polímeros. Esse material, ao ser liberado no meio ambiente, afeta negativamente tanto os animais quanto as plantas, já que não se decompõe com facilidade. No entanto, estudos recentes demonstram que há outras formas de mitigar o impacto causado pelos polímeros como alterações de composição para torná-lo biodegradável, acelerando o processo de degradação em relação aos polímeros convencionais. Logo, o PBAT aparece como uma alternativa viável para diminuir o efeito nocivo dos polímeros no meio ambiente. Juntamente com a incorporação dos nanos cristais de celulose (CNC's), que por sua vez, modificam propriedades mecânicas, como por exemplo módulo de Young, rigidez e flexibilidade.

### **1.3 OBJETIVOS**

- Comparar as propriedades mecânicas do PBAT/CNC's em relação aos plásticos comerciais.
- Compreender as relações mecânicas no PBAT/CNC's para o aprimoramento das propriedades intrínsecas do material sem a adição da nanocelulose.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A celulose, formada por unidades de D-glicose ligadas a  $\beta$  (1–4) na cadeia linear, é a principal componente estrutural das paredes celulares de plantas. Constitui 35–50% da massa seca de folhas, caules, madeira e frutos e está presente em muitos resíduos agrícolas. (Gondim *et al.*, 2024). Suas características constituem de baixa densidade, biodegradabilidade e não toxicidade. (Fortunati *et al.*, 2016). O processo de separação e isolamento da celulose e de outras biomassas como lignina e hemicelulose, geralmente é uma combinação de processos químicos, mecânicos ou enzimáticos. Os tratamentos químicos permitem a remoção de hemicelulose e lignina da biomassa lignocelulósica, aumentando a eficiência do processo de fibrilação, as técnicas mecânicas também são aplicadas ao isolamento da celulose, geralmente empregados técnicas de ultrassonicação e moagem por moinho de bolas (Gondim *et al.*, 2024). A estrutura hierárquica pode ser observada na figura 3 abaixo.

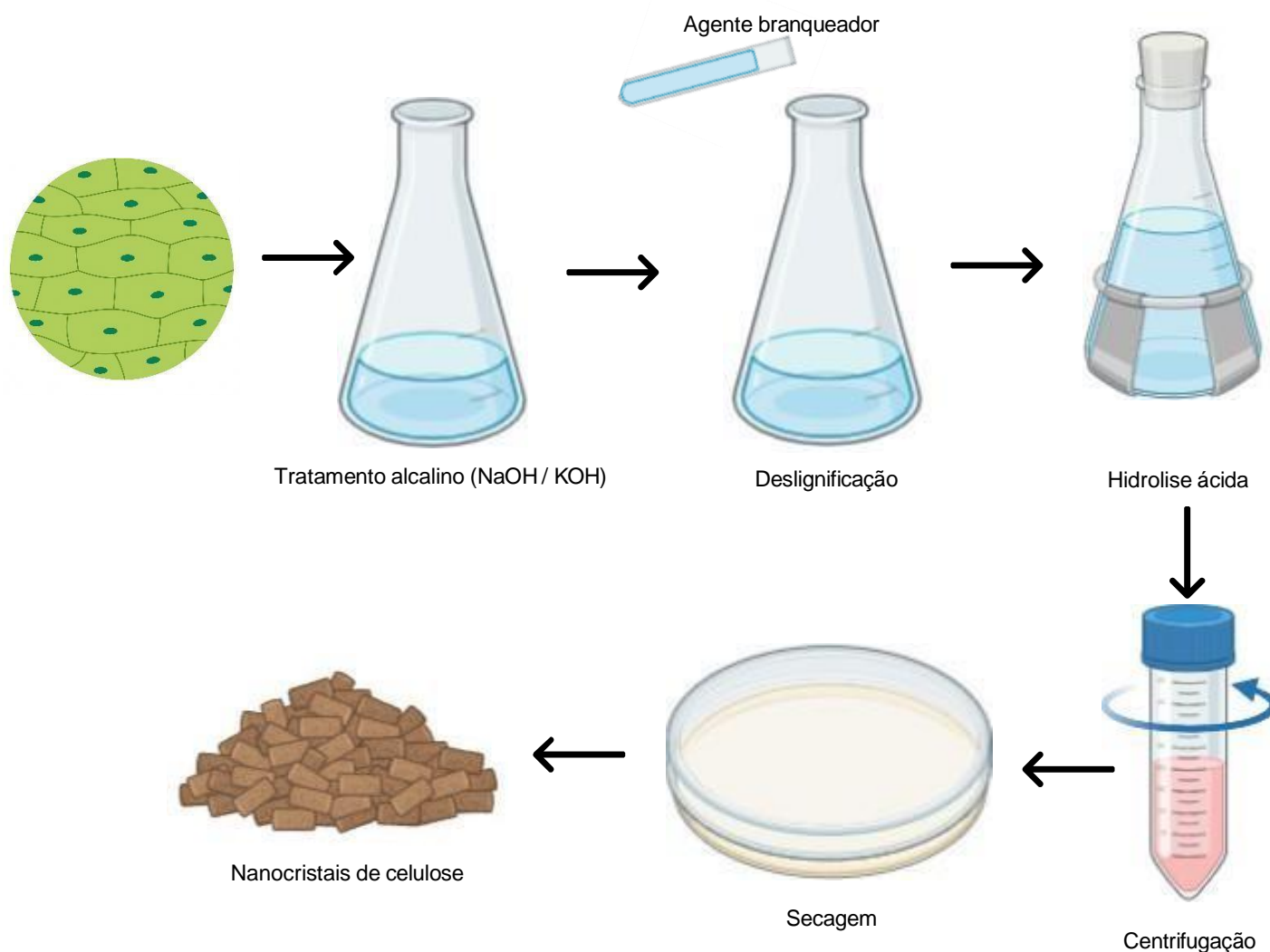


Fonte: Adaptado de Sonowal, D ; Wani, K., 2025

Os cristais de celulose podem ser obtidos através por meio da hidrólise de regiões amorfas, resultando em estruturas rígidas, altamente cristalinas, com diâmetros de 1 a 100 nm e comprimentos de cerca de 100 nm ou mais. As fibras também podem ser obtidas por meio de processos de fragmentação mecânica juntamente com tratamentos enzimáticos ou químicos,

que por sua vez resulta em estruturas flexíveis, com partes amorfas e cristalinas e diâmetros de 3 a 100 nm. (Gondim *et al.*, 2024). A figura 4 abaixo exemplifica como ocorre o processo de separação de nanocristais por hidrólise ácida.

**Figura 4** - Processo de hidrólise ácida.



Fonte: Adaptado de Sonowal, D ; Wani, K.,, 2025

Os CNC's são considerados preferíveis como componentes de suporte de carga, devido a sua maior capacidade de melhoria a tenacidade, juntamente com a resistência e a rigidez por meio da interação da interface entre os CNCs e a matriz. Isso se deve ao fato da alta porcentagem de cristalinidade (cerca de 65-95% de cristalinidade), que representa alta resistência, rigidez e módulo mais alto (138–150 GPa), em comparação as fibras de celulose (cerca de 70 GPa), por sua vez, o desenvolvimento de CNC's para reforço em materiais compósitos é desejável devido à ampla disponibilidade de fontes de celulose e biodegradabilidade. (Ng *et al.*, 2015).

Os nanocristais de celulose, apresentam grande quantidade de hidroxilas, grupos OH, na superfície, responsáveis por gerar uma intensa força intermolecular, devido a essa característica e hidrofiliçidade, podem gerar dispersões insatisfatórias e fraca interação com o polímero. (Ferreira, 2017). Por conta dessas características, a literatura desenvolveu-se técnicas de compatibilização entre os CNC's e os polímeros hidrofóbicos.

Juntamente com as CNC's., nanopartículas altamente cristalinas, também a formação do CNF, celulose nanofibrilada, que são fibras longas e emaranhadas, compostas por regiões cristalinas e amorfas, geralmente obtida por fibrilação mecânica. (Sonowal, D; Wani, K, 2025). No qual essas fibras, possuem maiores razões de aspecto e maior capacidade de formação de redes, resultando em excelentes propriedades de formação de filmes e de barriras. Porém, em termos de processabilidade, o CNC's é considerado mais vantajoso, por conta da apresentar uma melhor dispersibilidade, em especial aos solventes polares além de apresentar maior grau de cristalinidade e módulo de tração (até 150 GPa). (Sonowal, D; Wani, K, 2025). Ambos os tipos são biodegradáveis, renováveis e ecologicamente corretos, mas sua escolha depende dos requisitos da aplicação: CNC's para rigidez e precisão, CNF's para flexibilidade e desempenho viscoelástico.

No cenário econômico, os CNC's podem ser obtidos através de resíduos agrícolas de baixo custo, por exemplo sabugos de milho, cascas de trigo e serragem, considerado como descartes, oferecendo oportunidade de agregação de valor. (Sonowal, D; Wani, K, 2025). Através disso, desenvolve-se novas oportunidades de emprego em zonas rurais além de auxiliar aos pequenos agricultores fontes alternativas de renda, fomentando o crescimento inclusivo em economias agropecuárias. (Sonowal, D; Wani, K, , 2025). Podendo haver o empoderamento as comunidades locais, promovendo a industrialização rural e a contribuição para a resiliência dos meios de subsistência.

Nas questões ambientais, os nano cristais representam uma alternativa sustentável aos nanomateriais sintéticos derivados do petróleo, pois através da sua biodegradabilidade, renovabilidade e baixa toxicidade, os impulsionam para uma economia circular e práticas de fabricação mais ecológicas. (Drishya *et al.*, 2025). Logo, é correto dizer que o desenvolvimento de CNC's não é apenas uma inovação científica, mas um passo para o aprimoramento do desenvolvimento sustentável em múltiplas frentes. (Sonowal, D; Wani, K, 2025).

É desejável incorporar a celulose isolada em uma matriz polimérica para fabricação de nanocompósitos funcionais, especialmente em embalagens. Porém há um desafio relacionado

com a compatibilidade ao combinar polímeros e celulose, logo alguns pré-tratamentos podem reduzir o grau de hidrofiliabilidade da celulose, devido aos altos níveis de reação dos grupos hidroxila, entretanto modificações químicas adicionais após o isolamento ainda podem ser necessárias. De acordo com o cenário atual, a demanda em explorar materiais de embalagens sustentáveis, avançados e ecologicamente corretos, com propriedades físicas, mecânicas e de barreira superiores está aumentando. Os materiais comumente utilizados em embalagens para alimentos, bebidas, produtos médicos e farmacêuticos, bem como em aplicações industriais, não são degradáveis e, portanto, estão levantando preocupações com a poluição ambiental. (Khalil, H.P.S *et al.*, 2016). Todavia, deve-se haver um equilíbrio entre as preocupações ambientais, considerações econômicas e o desempenho da embalagem do produto.

Os polímeros biodegradáveis têm ganhado destaque no mercado em diversas áreas, dentre elas a indústria de embalagens, por conta do seu baixo impacto ambiental e geração de resíduos. Dentre eles o PBAT se destaca como forte candidato como polímero biodegradável proveniente de recursos fósseis. O material apresenta boa ductilidade e flexibilidade, com uma temperatura de fusão ( $T_m$ ) de cerca de 120 °C e uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de -17 °C. Além disso, suas propriedades mecânicas são semelhantes às do polietileno de baixa densidade-PEBD, tornando o PBAT um polímero interessante para ser aplicado em embalagens, como por exemplo em sacolas plásticas. (Gondim *et al.*, 2024). Todavia, o polímero apresenta algumas desvantagens, por exemplo baixa resistência à tração, baixo módulo, baixa transparência, permeabilidade ao vapor de água e custo mais alto em comparação com os polímeros comerciais. (Gondim *et al.*, 2024). Neste contexto, os compósitos de PBAT podem ter propriedades térmicas, mecânicas e de barreiras aprimoradas em comparação ao PBAT puro.

Entretanto, o principal desafio no processamento na fabricação de biocompósitos é a compatibilização. Quando a celulose é compatibilizada e bem dispersa na matriz de PBAT, algumas propriedades dos compósitos podem ser melhoradas, como as propriedades mecânicas, térmicas e de barreiras. (Gondim *et al.*, 2024). A literatura explica diversas formas de como suprir o desafio da incompatibilidade e processamento dos filmes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A celulose é o biopolímero mais abundante da natureza, porém, através de modificações em escala nano nas suas propriedades ela pode obter características melhores para o setor industrial e comercial, dessa forma, ela pode ser submetida a diversos ensaios para obter os resultados desejados.

#### 3.1 ACETILAÇÃO DA CELULOSE

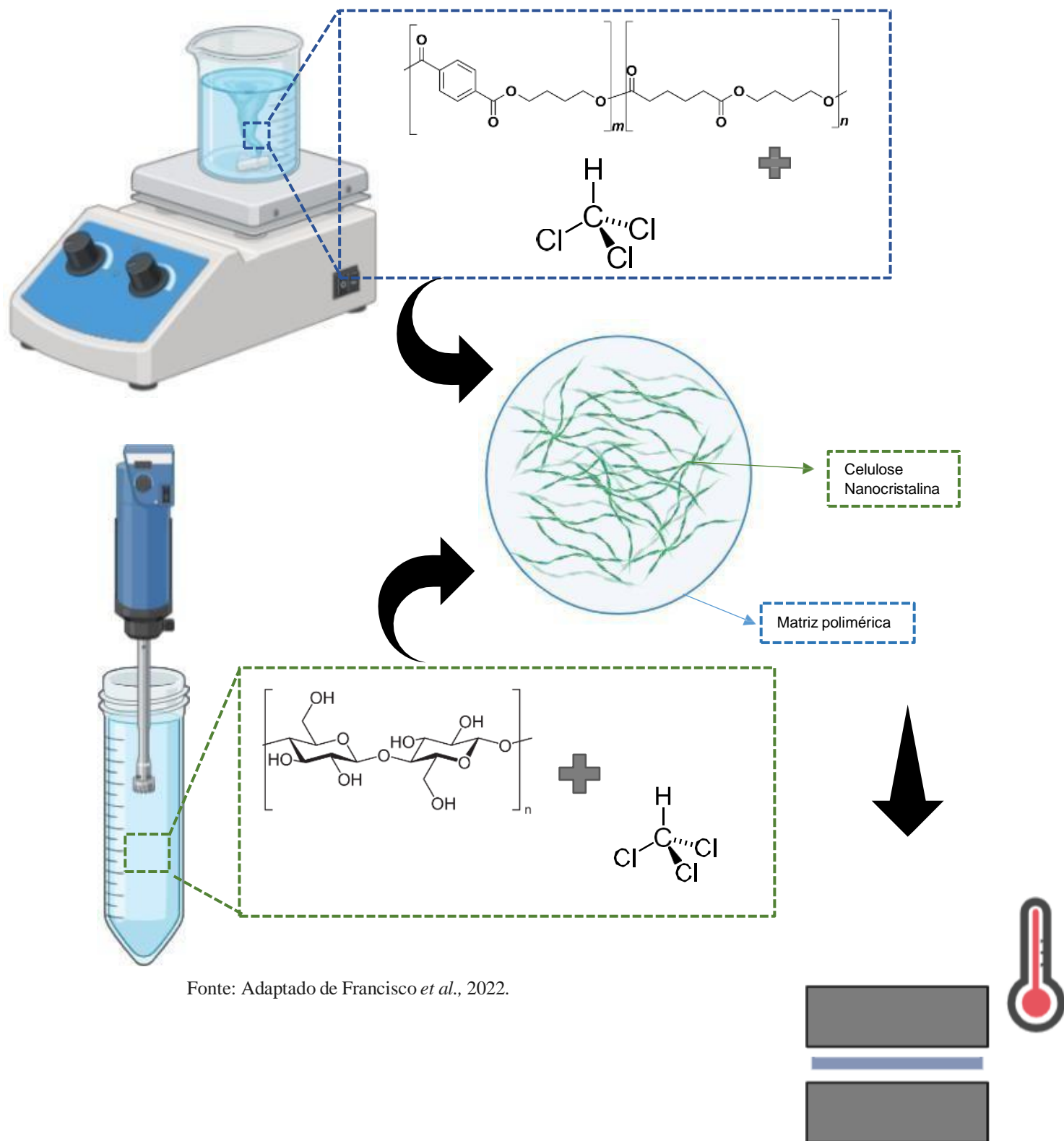
Os nanocristais de celulose, apresentam um alto nível hidrofílico, devido os grupos de hidroxilas presentes na superfície, tornando assim incompatível com os polímeros hidrofóbicos, no caso o PBAT. Para solucionar esse problema, a literatura demonstra técnicas de hidrofobização, o mais comumente aplicado é a acetilação, onde a sua efetividade pode ser analisada através de espectroscopia por infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (Francisco *et al.* 2022).

A acetilação é uma reação química que ocorre quando uma hidroxila é substituída por um grupo acetila. Dessa forma, quando utilizada na nanocelulose ela melhora suas propriedades mecânicas, sua solubilidade, transparência e estabilidade térmica. Dessa forma, com esse processo é possível alterar a polaridade dos nanocristais de celulose, tornando-as hidrofóbicas e melhorando suas propriedades mecânicas, solubilidade, transparência e estabilidade térmica.

#### 3.2 PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS FILMES

Os parâmetros e técnicas de processamento e formação dos filmes de PBAT com CNC's, foram obtidos através das contribuições realizadas por Francisco *et al.* (2022), sendo este um processo de moldagem por solventes, combinada com prensagem a quente. O processo inicia-se com a solubilização do polímero em clorofórmio, sob agitação magnética. Da mesma forma, os CNC's foram dispersos em clorofórmio, com auxílio de um homogeneizador ultrassônico para facilitar a dispersão. Em seguida ocorreu a dispersão dos CNC's com PBAT, e, após a dispersão completa, o sistema permaneceu em agitação para melhor dispersão. Por fim, a solução passou pelo processo de secagem por evaporação do excesso de solvente em uma capela de exaustão, formando os filmes de nanocompósitos. Finalmente, os filmes de nanocompósitos foram cortados e prensados a quente, obtendo como produto, um filme extremamente flexível, no qual sofreram ensaios mecânicos através da utilização de uma máquina universal de testes (EMIC®, Brazil).

Figura 5- Formação dos filmes.



Fonte: Adaptado de Francisco *et al.*, 2022.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As pesquisas na literatura sobre compósitos de PBAT reforçados com CNC destacam-se diferentes estratégias de modificação e compatibilização, no qual aprimoram a adesão, dispersão e conseqüentemente as propriedades mecânicas.

Hung *et al.*, (2022) no qual o ácido maleico, combinado com os CNC resultou em uma melhor compatibilização entre o polímero e a matriz, comprovados com FTIR e Ressonância magnética nuclear de carbono-13 ( $^{13}\text{C}$ -NMR). Nas aplicações de embalagens essas modificações são fundamentais para embalagens biodegradáveis que exigem melhor barreira à umidade e estabilidade térmica. Com a incorporação de 3% em peso de CNC, os resultados obtidos da análise de DSC, revelaram que o CNC atuou como nucleante, aumentando a taxa de cristalização do PBAT. O tempo de cristalização foi reduzido em aproximadamente 50–80%. E ensaios mecânicos realizados indicaram aumento do módulo e da rigidez com o acréscimo de CNC, enquanto a elongação na ruptura diminuiu levemente. Por fim, a permeabilidade ao vapor de água dos filmes diminuiu com o aumento das quantidades de CNC, isso ocorre devido a formação de uma rede mais densa e estável, que dificultou a passagem de moléculas de vapor.

Juma *et al.*, (2025), CNC modificado por anidrido succínico e curcumina. Os resultados mostraram que a adição de CNC modificado melhorou a dispersão das nanopartículas e promoveu interações químicas mais fortes com o PBAT. Além disso, apresentaram atividade antioxidante significativa e efetiva inibição de crescimento bacteriano, sendo aproximadamente 1,82 log UFC/cm<sup>2</sup> para *Escherichia coli* e 2,12 log UFC/cm<sup>2</sup> para *Staphylococcus aureus*. Este estudo destacou que a incorporação de CNC modificado com curcumina que foi caracterizado através de microscopia eletrônica de transmissão (MET, JEM-2100, Tóquio, Japão) não comprometeu a integridade estrutural do PBAT, todavia agregou em funcionalidades, como resistência bacteriana e antioxidante, tornando o compósito promissor para embalagens biodegradáveis, onde sua eficiência foi medida com Espectrofotômetro UV-Vis (TU-1950, Pequim, China).

Wang *et al.*, (2022), avaliou o efeito da modificação química em diferentes agentes de acoplamento como silanos e anidridos com Microscopia eletrônica de varredura (MEV, Hitachi S-4800, Tóquio, Japão). Em ensaios mecânicos a adição de 2 % de massa de CNC, promoveu um aumento de resistência a tração de aproximadamente 5,1% e alongamento de ruptura em torno de 28,8% em comparação ao PBAT puro. Os resultados indicaram que a diferença de energia superficial foi resultada através da melhor adesão entre a matriz e as

partículas modificadas, consequentemente aprimorando a transferência de tensão na interface entre o reforço e a matriz.

O quadro 1 abaixo, representa os resultados obtidos em diferentes formas de modificação da celulose e principais propriedades analisadas. Demonstrando que a modificação química, juntamente com a incorporação da matriz polimérica resultaram na modificação das propriedades mecânicas, além de outras propriedades como barreira de luz UV e resistência bacteriana, que por sua vez são propriedades muito importantes para a aplicação de embalagens biodegradáveis.

**Quadro 1-** Resultados da literatura

<b>Artigo</b>	<b>Modificação</b>	<b>%CNC</b>	<b>Propriedades analisadas</b>	<b>Principais resultados</b>
<b>Hung et. al. (2022)</b>	PBAT com ácido maleico (PBAT + CNC)	0-3	Módulo de armazenamento, cristalização	Aumento no módulo e rigidez, diminuição do tempo de cristalização 50-80% e boa compatibilidade.
<b>Juma et. al. (2025)</b>	CNC modificado com anidrido succínico + curcumina	-	Atividade antimicrobiana	Inibição de <i>E. coli</i> (1,82 log UFC/cm <sup>2</sup> ) e <i>S. aureus</i> (2,12 log CFU/cm <sup>2</sup> ); propriedades de barreira e UV aprimoradas.
<b>Wang et. al. (2022)</b>	CNC modificado com silano e anidrido	2	Resistência à tração, módulo	5,1% em resistência e 21,8% em alongamento de ruptura; melhor adesão interfacial

Fonte: Hung et al. (2022) ; Juma et al. (2025) ; Wang et al. (2022).

## 5 CONCLUSÃO

A incorporação de nanocristais de celulose (CNC) em matrizes de poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) tem se mostrado uma estratégia promissora para aprimorar propriedades mecânicas, térmicas e de barreira em filmes biodegradáveis. De acordo com os autores, Sonowal, D; Wani, K, . (2025), os CNC podem ser obtidos a partir de resíduos agrícolas de baixo custo, como sabugos de milho, cascas de trigo e serragem, o que representa não apenas um avanço tecnológico, mas também uma oportunidade econômica e ambiental.

Pesquisas, como as de Hung *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2022), demonstram que pequenas frações de CNC — na faixa de 1 a 5% em massa são capazes de melhorar significativamente a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a estabilidade do PBAT devido à alta área superficial e à boa dispersão das nanopartículas na matriz polimérica. Esses resultados indicam uma forte interação entre o CNC e o PBAT, o que favorece a transferência de tensão e o reforço mecânico do compósito.

Além disso, conforme evidenciado por Juma *et al.* (2025), os filmes obtidos com PBAT/CNC apresentam maior transparência e homogeneidade, sendo potencialmente aplicáveis na indústria de embalagens biodegradáveis, em substituição parcial aos polímeros convencionais derivados de petróleo. Logo é correto dizer que a incorporação do CNC como reforço, se alinha em tópicos como sustentabilidade, economia circular e materiais ambientalmente responsáveis.

Por fim, a literatura recente confirma que o desenvolvimento de compósitos PBAT-CNC, representa uma alternativa viável e eficiente para a produção de filmes biodegradáveis, aproveitando resíduos agrícolas como fonte de matéria-prima e reduzindo os impactos ambientais associados aos plásticos convencionais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**DRISHYA, KATTIL** et al. Advances in Microbial and Plant-Based Biopolymers: Synthesis and Applications in Next-Generation Materials. **Macromol—A Journal of Macromolecular Research**, v. 5, n. 2, p. 21–21, 6 maio 2025.

**FRANCISCO, A. B. F. D. P.** et al. Comprehensive study of cellulose nanocrystals acetylation effects on poly (butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposite films obtained by solvent casting and heat pressing. **Industrial Crops and Products**, v. 177, p. 114459, 5 jan. 2022.

**Fredi, G; Dorigato, A.** Recycling of bioplastic waste: A review, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Volume 4, Issue 3, 2021, Pages 159-177. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.006>.

**GONDIM, F.** et al. Biocomposites of Cellulose Isolated from Coffee Processing By-Products and Incorporation in Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) Matrix: An Overview. **Polymers**, v. 16, n. 3, p. 314–314, 24 jan. 2024.

**H.P.S, Kalil** et al. A review on nanocellulosic fibres as new material for sustainable packaging: Process and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 823–836, out. 2016.

**HUNG, J.** et al. Synthesis, Characterization, and Physical Properties of Maleic Acid-Grafted Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/Cellulose Nanocrystal Composites. **Polymers**, v. 14, n. 13, p. 2742–2742, 5 jul. 2022.

**JUMA, H.** et al. Enhanced Antioxidant and Antibacterial Properties of Polybutylene Adipate-Terephthalate/Curcumin Composite Films Using Surface-Modified Cellulose Nanocrystals. **Polymers**, v. 17, n. 7, p. 830, 21 mar. 2025.

**LO RE, G.** *et al.* Melt processable cellulose fibres engineered for replacing oil-based thermoplastics. *Chemical Engineering Journal*, v. 458, p. 141372, fev. 2023.

**MORELLI, C. L.** Processamento e estudo das propriedades de filmes e peças injetadas de nanobiocompósitos de nanocristais de celulose e matrizes biodegradáveis. *Hal.science*, 4 abr. 2014. Disponível em: <https://theses.hal.science/tel-01290491/>

**NG, H.-M.** et al. Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers. **Composites Part B: Engineering**, v. 75, p. 176–200, jun. 2015.

**ROSA, Derval S.; PÂNTANO FILHO, Rubens.** Biodegradação: um ensaio com polímeros. Moara, 2003.

**SAMIR, A.** Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Materials Degradation*, v. 6, n. 1, 19 ago. 2022.

**SHAIKH, K. et al.** Nanocellulose: Fundamentals and Applications. IntechOpen eBooks, 29 maio 2024. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/89136>

**SONOWAL, D; WANI, K.** Comprehensive review of cellulose nanocrystals: preparation, properties, modifications and applications. **Bulletin of the National Research Centre/Bulletin of the National Research Center**, v. 49, n. 1, 25 ago. 2025.

**WANG, H. et al.** Tailoring Interfacial Adhesion between PBAT Matrix and PTFE-Modified Microcrystalline Cellulose Additive for Advanced Composites. **Polymers (Basel)**, v. 14, n. 10, p. 1973–1973, 12 maio 2022.