

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ARQUITETURA

ESPECIALIZAÇÃO EM CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS

PROPOSTA DE APERFEIÇOAMENTO EM TAMPAS DE EMBALAGEM
DE CIMENTO:

ANÁLISE DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS

Aluno: Rodrigo Damaceno Dutra Santos
Orientador: Prof. Glaucei Rodrigues Corrêa

Belo Horizonte, 2025

Rodrigo Damaceno Dutra Santos

PROPOSTA DE APERFEIÇOAMENTO EM TAMPAS DE EMBALAGEM
DE CIMENTO:

ANÁLISE DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS


Projeto apresentado ao Curso de Pós-graduação em Sustentabilidade, da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, à disciplina de “Trabalho de Conclusão de Curso” como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Sustentabilidade, sob a orientação do prof. Glaucinei Rodrigues Corrêa.

ATA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE MONOGRAFIA DO ALUNO RODRIGO DAMACENO DUTRA SANTOS COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO CERTIFICADO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS.

Aos vinte e dois dias do mês de dezembro de 2025, reuniu-se virtualmente às 10:00horas, a Comissão Examinadora composta pelo **Prof. Dr. Glaucinei Rodrigues Correa** - orientador-Presidente e pelo **Prof. Dr. Leonardo Geraldo de Oliveira Gomes**, como membro titular interno, designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em *Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis* para avaliação da monografia intitulada “PROPOSTA DE APERFEIÇOAMENTO EM TAMPAS DE EMBALAGEM DE CIMENTO: ANÁLISE DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS” de autoria do aluno **Rodrigo Damaceno Dutra Santos**, como requisito final para obtenção do certificado e especialista em *Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis*. A citada Comissão examinou o trabalho e, por unanimidade, concluiu que a monografia atende às exigências para a obtenção do Certificado de Conclusão do Curso, atribuindo ao trabalho o conceito (95/A) e recomenda que seja encaminhado 01 (um) exemplar para o Repositório da UFMG, após as correções sugeridas.

Belo Horizonte, 22 de dezembro de 2025


Prof. Dr. Glaucinei Rodrigues Corrêa
orientador-Presidente


Prof. Dr. Leonardo Geraldo de Oliveira Gomes
membro titular interno

Dedico este trabalho especialmente a meus pais: Maria Desterro Damaceno (em memória) e José Cirilo Dutra Santos (desaparecido no momento da criação desta obra).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela oportunidade que me concedeu de adentrar no curso de Pós-graduação em Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis, da Universidade Federal de Minas Gerais, o que inclui também, a oportunidade que me deu de cursar a graduação em design, na referida instituição.

Agradeço ao professor Glaucinei Rodrigues Corrêa, que aceitou me apoiar na orientação do trabalho de conclusão de curso, tanto da graduação, quanto nesse da pós-graduação, que representa uma sequência do outro projeto realizado. Em nome do qual estendo meus agradecimentos a todos os competentes professores da UFMG, em especial, os que fazem parte do programa de especialização em sustentabilidade.

Sou grato também, aos colegas de turma que tive o prazer de conhecer, que assim como os da graduação, me ajudaram em meu desenvolvimento e aprendizado. Agradeço, em especial, pela oportunidade que me proporcionaram de viver a experiência de ser o líder de turma, para que assim pudesse contribuir nas questões relacionadas ao colegiado e em informações relevantes ao curso.

Agradeço à minha família, minha mãe, Maria Desterro Damaceno, meu pai, José Cirilo Dutra Santos e minha irmã, Débora Damaceno Dutra Santos, que durante os anos de estudo, sempre me deram forças para continuar, fisicamente ou espiritualmente.

Agradeço aos meus amigos, que não poderei dizer nomes pela grande quantidade, que me ajudaram a passar por momentos difíceis em minha vida e por conta disso, me mantive firme e pude concluir mais esse sonho. Alguns deles, amigos que conheço desde o ensino fundamental e médio e dessa forma, puderam perceber minha evolução no decorrer dos anos para chegar nessa etapa de pós-graduação.

A todos que de alguma forma contribuíram e fizeram parte desse projeto e de minha formação acadêmica, direta ou indiretamente, meus sinceros agradecimentos.

Resumo

O cimento é um produto amplamente utilizado em todo o mundo, entretanto, sua embalagem apresenta sérias deficiências no que concerne à ergonomia e manuseio. O trabalho acadêmico “Redesign da embalagem de cimento” surgiu justamente para desenvolver um novo design de embalagem para sanar essas questões. A conclusão do projeto apresentado foi uma embalagem de cimento com configuração cilíndrica e possuindo tampas com formato octogonal, para vedação, manuseio e empilhamento. O presente projeto de pesquisa representa a continuação desse trabalho, direcionado em analisar materiais sustentáveis para a fabricação dessas tampas. Fazendo uso de pesquisa bibliográfica, documental e técnica, foi realizado um estudo detalhado dos principais materiais sustentáveis utilizados para a concepção de embalagens industriais, além de suas características físicas, ambientais e econômicas. Como resultado de todo esse processo, ao final, utilizando-se de critérios específicos e método de comparação e seleção, é realizada a escolha do material mais adequado para a produção das tampas. Destaca-se que o trabalho não teve como objetivo fabricar as tampas, seja com os materiais investigados, seja com o material que foi selecionado, o foco foi analisar os insumos mais adequados, do ponto de vista da sustentabilidade, para a produção das tampas da embalagem de cimento.

Importante destacar que esse projeto teve desenho industrial protegido (nº BR3020220011746) e patente de Invenção de modelo de utilidade registrada (nº BR1020220172137), pela Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica (CTIT) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Palavras-chave: sustentabilidade; tampas de embalagem; material sustentável; embalagem de cimento.

Abstract

Cement is a widely used product worldwide; however, its packaging presents serious deficiencies regarding ergonomics and handling. The academic work "Redesign of Cement Packaging" arose precisely to develop a new packaging design to address these issues. The conclusion of the presented project was a cement container with a cylindrical configuration and octagonal-shaped lids for sealing, handling, and stacking. This research project represents a continuation of that work, focused on analyzing sustainable materials for the manufacture of these lids. Using bibliographic, documentary, and technical research, a detailed study was conducted of the main sustainable materials used for the design of industrial packaging, as well as their physical, environmental, and economic characteristics. As a result of this entire process, using specific criteria and a comparison and selection method, the most suitable material for the production of the lids is chosen. It is important to highlight that the work did not aim to manufacture the lids, either with the materials investigated or with the material that was selected; the focus was on analyzing the most suitable inputs, from a sustainability perspective, for the production of cement packaging lids.

It is important to note that this project had a protected industrial design (n° BR3020220011746) and a registered utility model invention patent (n° BR1020220172137), by the Coordination of Technology Transfer and Innovation (CTIT) of the Federal University of Minas Gerais (UFMG).

Keywords: sustainability; packaging caps; sustainable material; cement packaging.

Sumário

INTRODUÇÃO.....	9
OBJETIVOS	19
CAPÍTULO 1: TIPOS DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS	20
1.1 Polpa Moldada	21
1.1.1 Tipos de polpa moldada	24
1.1.2 Análise física da polpa moldada	27
1.1.3 Análise ambiental da polpa moldada	29
1.1.4 Análise econômica da polpa moldada	30
1.2 Plástico reciclado	31
1.2.1 Tipos de plástico reciclável.....	33
1.2.2 Análise física do plástico reciclado	37
1.2.3 Análise ambiental do plástico reciclado	38
1.2.4 Análise econômica do plástico reciclado	39
1.3 Bioplástico	40
1.3.1 Tipos de bioplástico.....	42
1.3.2 Análise física do bioplástico.....	47
1.3.3 Análise ambiental do bioplástico.....	49
1.3.4 Análise econômica do bioplástico.....	50
1.4 Biocompósito	51
1.4.1 Tipos de biocompósito.....	53
1.4.2 Análise física do biocompósito	54
1.4.3 Análise ambiental do biocompósito	55
1.4.4 Análise econômica do biocompósito.....	56
1.5 Menção ao micélio de fungo	57
CAPÍTULO 2: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MATERIAIS.....	59
2.1 Resistência	60
2.1.1 Resistência da polpa moldada.....	60
2.1.2 Resistência do plástico reciclado.....	61
2.1.3 Resistência do bioplástico (PLA como referência).....	62
2.1.4 Resistência do biocompósito (PLA + fibras naturais).....	62
2.2 Sustentabilidade ambiental.....	63
2.2.1 Critérios sustentáveis da polpa moldada	63
2.2.2 Critérios sustentáveis do plástico reciclado	64
2.2.3 Critérios sustentáveis do bioplástico (PLA).....	64

2.2.4 Critérios sustentáveis do biocompósito.....	64
2.3 Custo médio de produção	65
2.3.1 Custo médio de produção da polpa moldada.....	65
2.3.2 Custo médio de produção do plástico reciclado.....	66
2.3.3 Custo médio de produção do bioplástico (estimativa brasileira do PLA)	67
2.3.4 Custo médio de produção do biocompósito (matriz PLA + fibras naturais)	68
2.4 Análise comparativa e seleção do material.....	68
CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

INTRODUÇÃO

O cimento é um produto amplamente utilizado. O concreto, material composto resultante da mistura do cimento a outros componentes, é o segundo produto mais consumido no mundo, ficando atrás somente da água (SAMPAIO; SOUZA; GOUVEIA, 2014), deixando claro a sua importância no que se refere à evolução tecnológica da sociedade. Da simples reforma de uma casa a significativos projetos da construção civil, como parques, hospitais, estádios, pontes, estradas, universidades, monumentos e grandes arranha-céus, usa-se o cimento como requisito obrigatório e de extrema importância. Trata-se de um produto indispensável, estando presente do início da obra até a etapa de acabamento (HELENE; ANDRADE, 2005).

Conforme Rodrigues (2018), o cimento é, basicamente, um pó fino, utilizado como um material ligante, obtendo em sua composição produtos provenientes do calcário, além da mistura de outros materiais. Suas propriedades aglomerantes e aglutinantes o fazem enrijecer-se ao entrar em contato com a água e, após estar em estado endurecido, ele não volta a se desfazer, mesmo que seja submetido à água novamente.

Figura 1: Pó de cimento.



Fonte: Engenharia compartilhada, 2023. Disponível em:

https://www.engenhariacompartilhada.com.br/noticia/exibir/7113920_o-que-e-preciso-saber-sobre-o-cimento-portland

Acesso em: 23 ago. 2025.

Trata-se de um material de extrema importância na construção civil devido a sua elevada resistência, quando unido a outros materiais. Seu processo de fabricação é bastante complexo, passando por diversas etapas. Inicialmente ocorre a extração da principal matéria-prima, o calcário, em jazida natural, para que posteriormente seja submetido ao processo de britagem e trituração (SELLITTO et al., 2013, p.148).

Seguindo o raciocínio e a estrutura sistêmica de Sellitto et al. (2013), as próximas etapas após a extração, são: homogeneização do calcário para reduzir a variabilidade da sua propriedade química, seguido de processo para diminuir a granulometria da matéria-prima. Após isso, ocorre a moagem, onde o produto passa a se chamar farinha. A próxima etapa é a homogeneização dessa farinha através de mistura, seguido de queima em fornos.

Depois da etapa de queima, a farinha passa a se chamar clínquer e será estocado em hangares para armazenamento a céu aberto. Após isso, ocorre nova moagem, desta vez, do clínquer, juntamente com gesso, calcário com baixo teor de carbonato e inorgânicos, como por exemplo, cinzas de carvão e a sílica. Por fim, chega-se à etapa de ensacamento do pó de cimento em embalagens de papel.

Importante destacar que as fábricas de produção do cimento, obrigatoriamente, devem se localizar próximo às áreas de extração da matéria-prima, para facilitar o transporte do calcário pesado até a área industrial de fabricação, minimizando assim, perdas de materiais e gastos energéticos desnecessários (SELLITTO et al., 2013).



Fonte: Maringá Post, 2021. Disponível em:

<https://maringapost.com.br/engenharia/2021/08/11/fabricacao-do-cimento-os-tipos-e-as-finalidades-de-cada-um/>

Acesso em: 23 ago. 2025.

Além do produto em si, para compreensão dos objetivos dessa pesquisa, é de suma importância realizar uma análise sobre a embalagem do produto, entendendo suas características e propriedades. Segundo Simões et al. (2023), o pó do cimento é protegido por uma embalagem feita de papel Kraft multifoliado, material produzido a partir de fibras de celulose de madeira macia. Esse material é um dos poucos que revela elevada resistência às altas temperaturas que o cimento apresenta ao ser

produzido, principalmente, devido a sua composição de fibras longas e curtas de celulose (BILLERUD, 2015).

Esse tipo de papel é mais comum de ser encontrado na cor marrom e é utilizado em diversos tipos de embalagens e produtos: envelopes para correspondência, pequenas caixas para cosméticos e bijuterias, etiquetas, caixas personalizadas, sacolas, dentre outros. A embalagem de cimento utiliza esse material na gramatura de 80 gramas, normalmente com três ou quatro folhas. O papel Kraft é um tipo de material considerado sustentável e sua decomposição na natureza demora de três a seis meses (BILLERUD, 2015). A embalagem é comercializada possuindo dois pesos líquidos: 50 kg (mais comum de encontrar) e 25 kg, todas possuindo o mesmo formato.

Figura 3: Embalagem de cimento 50kg - papel Kraft - marca Votoran.



Fonte: Clipper, s.d. Disponível em: <https://www.cclipper.com.br/cimentos/cimento-votoran-cp-2-32>

Acesso em: 29 ago. 2025.

As embalagens de cimento possuem o mesmo formato, independente de seu peso ou marca. Isso inclui embalagens raras de cimento de 50 kg, encontradas somente fora do Brasil, construídas com um material considerado mais prejudicial ao meio ambiente e menos sustentáveis em comparação ao papel Kraft, apesar de também apresentar elevada resistência (COSTA et al., 2016), o chamado Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE), mostrada na figura 4.

Figura 4: Embalagem de cimento 50 kg feita de PEAD - marca Ambuja.



Fonte: Indiamart, s.d. Disponível em: https://www.indiamart.com/proddetail/ambuja-cement-2853407902548.html?srsId=AfmBOoq8v_B9KD0jppOj65Hnn6LhnyEN5gJRzvriEdhvPmBU7ZCNtLTr

Acesso em: 29 ago. 2025

O foco principal da presente pesquisa é dar continuidade na melhoria da embalagem de cimento do projeto “Redesign da embalagem de cimento”, apresentado ao curso de graduação em Design, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), à disciplina de “Trabalho de Conclusão de Curso”. Na pesquisa, foi abordado as principais características do cimento e de sua embalagem. Utilizando-se do método de inovação “Duplo Diamante” pertencente ao Design Thinking (EAUX CONSULTING, 2020) e de outras ferramentas e metodologias do design, foi feito uso das principais etapas que levou ao resultado final, como pesquisas, análises, entrevistas, observações, desenhos, testes, correções e modelagens. Apesar das embalagens de cimento possuírem formatos padrões, o foi apresentado um formato com desenho totalmente diferente.

Com o objetivo de melhorar a ergonomia e o manuseio para os usuários, o produto final apresentado possui formato cilíndrico, contendo duas tampas, uma na parte superior e outra na parte inferior, em formato octogonal, usadas para manuseio e também para empilhamento. O pacote desenvolvido possui 12,5 kg e seu material permanece sendo o papel Kraft multifoliado. A figura 5 exhibe a embalagem desenvolvida.

Figura 5: Projeto de redesign da embalagem de cimento: embalagem com tampas.



Fonte: O autor

Além das tampas que comportam uma única embalagem, foi apresentado outro modelo, capaz de sustentar dois pacotes juntos, totalizando um peso líquido de 25 kg. Esse outro design, assim como a anterior, possui a função de manuseio ergonômico para os usuários e de empilhamento das embalagens, seja na horizontal ou vertical. A imagem a seguir exibe o resultado obtido.

Figura 6: Embalagens de cimento com tampas duplas.



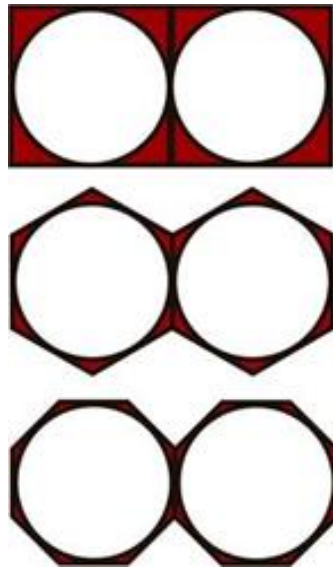
Fonte: O autor

Além do aperfeiçoamento ergonômico e funcional do recipiente para os usuários, outro requisito importante para a construção do produto foi o custo, a sustentabilidade e o meio ambiente. Dessa forma, nas pesquisas e testes realizados, foi mantido o papel Kraft como o material das embalagens, pelo fato de nenhum outro apresentar melhor resistência às altas temperaturas do cimento após ser produzido, além de ser um papel sustentável e apresentar um significativo custo-benefício.

Além de desenvolver uma embalagem de papel Kraft com formato diferente da comercializada atualmente, também foi incrementado tampas à embalagem com

funcionalidades para o manuseio ergonômico e para o empilhamento. Após diversos estudos de formatos para as tampas, chegou-se ao formato hexagonal, que funcionou bem para as tampas com embalagem única, entretanto, não foram eficientes para as tampas com dupla embalagem, devido ao empilhamento na horizontal. Dessa maneira, após análise e estudo de formatos geométricos possíveis, chegou-se ao formato octogonal. A figura 7 exibe o estudo de formatos possíveis.

Figura 7: Análise de formatos geométricos que permitem o empilhamento horizontal.



Fonte: O autor

Essas tampas, tanto as que comportam embalagem única como as de embalagem dupla, possuem em seu centro um local para que o usuário manuseie. Trata-se de um local para que o usuário de fato possa pegar a embalagem, com formato arredondado, pois, após testes e observações práticas, este mostrou ser o formato mais ergonômico e confortável. Outro local que necessitou de atenção foram as quinas do octógono, que precisaram ser arredondadas, para o conforto do usuário. A figura 8 mostra testes e protótipos manuais feitos com o material isopor.

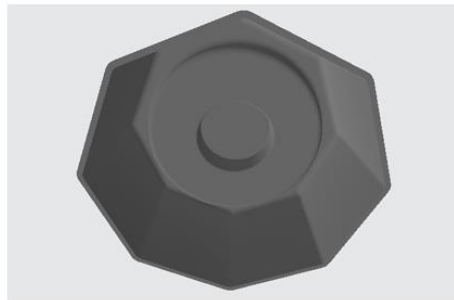
Figura 8: Protótipo, em isopor, de tampa octogonal para a embalagem.



Fonte: O autor

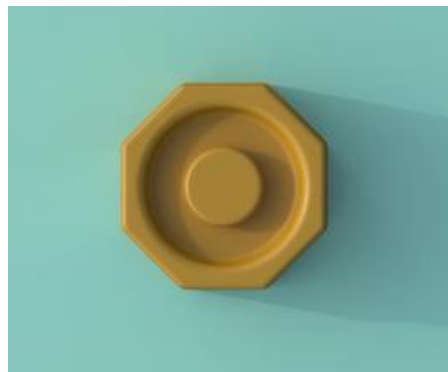
Após concluído os testes com protótipos físicos das tampas, utilizou-se de software de modelagem 3D para criar as tampas digitalmente, acrescentando os detalhes necessários que atendessem aos critérios ergonômicos observados nos testes práticos manuais e estabelecidos no briefing do projeto. As figuras a seguir mostram os resultados obtidos.

Figura 9: Modelagem de tampa única vista inferior.



Fonte: O autor

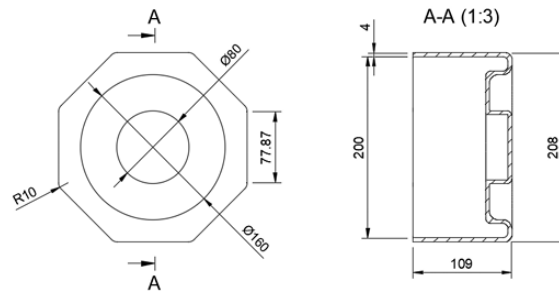
Figura 10: Render de tampa única vista superior.



Fonte: O autor

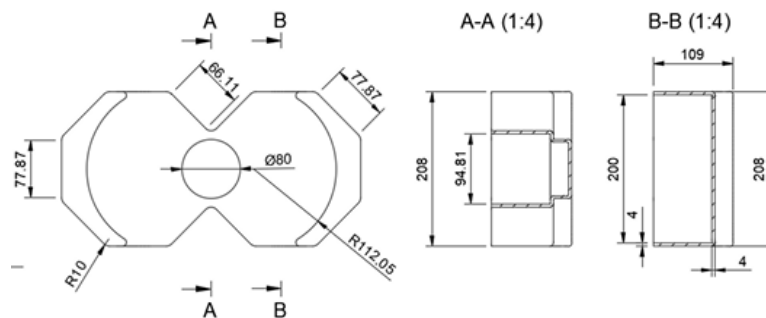
Além da representação dos modelos digitais das tampas, também foi feito o desenho técnico com as medidas, em milímetros, de cada detalhe, tanto da tampa para comportar uma embalagem, quanto para a tampa dupla. Os resultados obtidos podem ser vistos nas imagens a seguir.

Figura 11: Medidas, em mm, de tampa octogonal única.



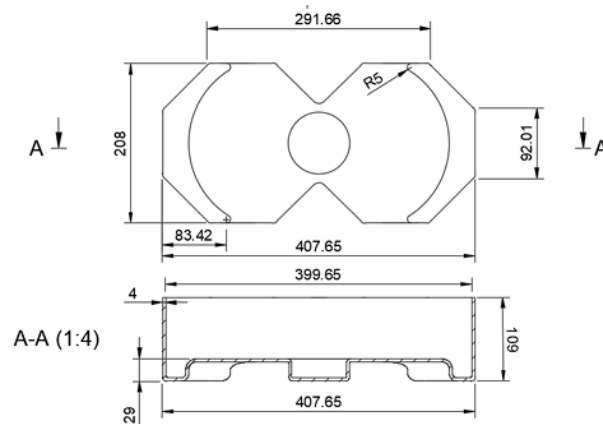
Fonte: O autor

Figura 12: Medidas, em mm, de tampa octogonal dupla.



Fonte: O autor

Figura 13: Mais medidas de tampa octogonal dupla.



Fonte: O autor

Após ter desenvolvido o desenho técnico das tampas e as imagens realistas em software, realizou-se a impressão da embalagem, em papel com cor que remetesse ao papel Kraft, enquanto as tampas, para a apresentação do produto final, foram confeccionadas através da impressão 3D. Esse, por sua vez, trata-se de um processo em que uma impressora funde um material de filamento plástico e imprime algum objeto desenvolvido em programa de software tridimensional, tornando-o físico e manipulável (BASNIAK; LIZIERO, 2017). As figuras 14 e 15 mostram o resultado obtido para ambos os modelos de tampas.

Figura 14: Embalagem final e tampa única em impressão 3D.



Fonte: O autor

Figura 15: Embalagem final e tampa dupla em impressão 3D.



Fonte: O autor

No que se refere ao material das tampas, através de orientação e objetivando seguir o conceito de construir um redesign de embalagem que fizesse uso de materiais sustentáveis e econômicos, foi apontado como uma possível opção, que elas fossem construídas com a chamada polpa moldada. Trata-se de um produto obtido a partir da separação das fibras de papel, que quando misturadas à água e à produtos químicos, formam uma massa, que dará origem a diversos produtos, como bandejas, embalagens de produtos, protetores de quinas e até cadeiras, apresentando elevada resistência mecânica e satisfatório custo-benefício (MOURAD; VILELA 2006). Outro motivo que foi considerado para a escolha desse insumo é pelo fato dele ser depositado em moldes para obter formas, isto é, trata-se de um material capaz de ser moldado (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022), requisito essencial, tendo em vista a face externa (superfície voltada para fora da embalagem) e a face interna (superfície voltada para dentro da embalagem) obtidas no design das tampas. A figura 16 mostra um exemplo de uso do material.

Figura 16: Exemplo de utilização da polpa moldada: embalagem de produtos.



Fonte: Leoweick, 2013. Disponível em:

[100% Reciclado e Biodegradável | pulp molding , polpa moldada](#)

Acesso em: 03 set. 2025

Com o objetivo de manter requisitos de proteção ao meio ambiente e baixo custo, estabelecidos no briefing do projeto, mas também mantendo a premissa de resistência à peso, necessário para o manuseio da embalagem de cimento, materiais como o plástico comum feito de petróleo, o alumínio e até mesmo a madeira, foram desconsiderados, indicando como opção a polpa moldada.

Entretanto, esse material fornecido como opção para a fabricação das tampas representa apenas uma sugestão abrangente, genérica, necessitando de um estudo mais aprofundado de outras opções de materiais sustentáveis para verificar qual a alternativa ideal. Assim sendo, enquanto o foco da pesquisa do trabalho acadêmico “Redesign da embalagem de cimento” foi a construção de um novo modelo de empacotamento para o cimento, nesse novo projeto, o propósito é focar exclusivamente nas tampas desenvolvidas, estudando e analisando tecnicamente tipos de materiais sustentáveis utilizados na criação de diferentes produtos (e isso inclui a própria polpa moldada), para identificar qual o mais apropriado para o conceito central do projeto.

Justifica-se a realização desse trabalho por tornar-se cada vez mais importante o pensamento crítico relacionado à preocupação com o meio ambiente e com a sustentabilidade. Um setor que demanda dessa atenção é o da construção civil. O projeto “Redesign da embalagem de cimento” demonstrou essa preocupação, apresentando um produto utilizado por essa esfera, não somente melhorando a experiência do usuário ao manusear a embalagem de cimento, como também, procurando manter em mente critérios relacionados à sustentabilidade, o ecodesign e o baixo custo de produção.

Dessa forma, tornou-se importante dar prosseguimento às idéias relacionadas ao projeto, realizando um estudo detalhado dos materiais sustentáveis existentes, indicando qual o mais apropriado para uso na embalagem, especialmente em suas tampas.

OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto é analisar diferentes tipos de materiais sustentáveis aplicáveis no desenvolvimento de embalagens, a fim de identificar o mais apropriado na fabricação das tampas da nova embalagem de cimento desenvolvida, observando requisitos de adequação técnica, ambiental e econômica.

No que se refere a objetivos específicos, pode-se listar:

- Identificar e caracterizar os principais tipos de materiais sustentáveis utilizados na produção de embalagens industriais.
- Analisar as propriedades físicas, ambientais e econômicas de materiais selecionados, considerando sua aplicabilidade nas tampas das embalagens de cimento.
- Comparar os materiais analisados e indicar aquele que apresente melhor equilíbrio entre desempenho técnico, resistência, sustentabilidade ambiental e custo de produção.

A justificativa é que se obtenha uma análise completa das melhores opções de materiais ecológicos, econômicos e sustentáveis, para que seja corretamente aplicado na produção da nova embalagem de cimento desenvolvida, em especial, em suas tampas.

CAPÍTULO 1: TIPOS DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS

Para que se defina o melhor material para a produção das tampas, foi importante investigar os tipos de materiais sustentáveis existentes, especialmente para a confecção de embalagens industriais. Através de pesquisa bibliográfica e documental, foi realizado um levantamento dos principais componentes e elementos considerados ecológicos para a produção de diferentes produtos e pacotes utilizados no mercado. O objetivo deste capítulo é justamente apresentar e analisar os insumos selecionados durante o processo de pesquisa.

Importante salientar que a pesquisa se deparou com outros materiais considerados sustentáveis utilizados para a confecção de embalagens ecológicas e inovadoras, entretanto, que não cumpriam com os requisitos necessários para utilização no tipo de tampa proposta, a exemplo, materiais carentes de resistência mecânica (mais adequados para serem utilizados em invólucros de produtos alimentícios e outras aplicações) ou insumos que não são possíveis de serem moldados ou processo similar. Esses por sua vez, após análise e estudo das características e propriedades, foram desconsiderados, sendo alguns deles: papelão ondulado, lã e seda natural, tecidos orgânicos, papel semente, papel de arroz, madeira certificada, algas marinhas, cera de abelha, nanocelulose, dentre outros.

Além desses insumos, que em geral são usados para produzir embalagens com baixa rigidez ou que apesar de serem capazes de fabricar produtos resistentes (que é o caso do papelão ondulado e a madeira certificada), não são apropriados para que sejam utilizados em moldes para confecção de tampas, a pesquisa bibliográfica também se deparou com opções de materiais classificados como sustentáveis que, apesar de também serem resistentes, por questão de segurança ao usuário, tendo em vista o modo de utilização e aplicação do saco de cimento no ambiente de trabalho, transporte e estocagem, não foram selecionados, dentre eles pode-se citar o vidro reciclado e o alumínio reciclado. Esses e outros foram rejeitados por apresentar riscos aos consumidores e ao produto no momento de utilização.

1.1 Polpa Moldada

Tendo em vista que no projeto “Redesign da embalagem de cimento”, a chamada polpa moldada, sem nenhuma análise aprofundada, foi o material mencionado para que fosse uma possível opção para a produção das tampas, este será o primeiro elemento a ser apresentado e analisado.

Conforme Mourad e Vilela (2006), este é um produto obtido a partir da desagregação das fibras de aparas de revistas, jornais, papelão, restos da indústria de cartonagem e de outros tipos de papéis, que quando misturados à água e a produtos químicos diversos, formam uma massa natural ou em cores. De acordo com os autores, por ser formada através de aparas de pós-consumo, muitas empresas têm desenvolvido projetos de embalagem com esse material.

A BRACELPA (2005) - Associação Brasileira de Celulose e Papel - afirma que a polpa moldada se revela como um material que pode ser adquirido através da desagregação das fibras de fragmentos de insumos, especialmente os feitos de papel e celulose, que são misturados a produtos químicos e água, formando uma massa apropriada para manipulação, a fim de que se produza produtos ecológicos e sustentáveis, como bandejas para acondicionamento, calços para eletroeletrônicos, proteção para hortifrutigranjeiros, dentre outros. A figura 17 exhibe a matéria-prima deste material em fábrica.

Figura 17: Aparas de papel, matéria-prima da polpa moldada.



Fonte: tissue online, 2024. Disponível em:

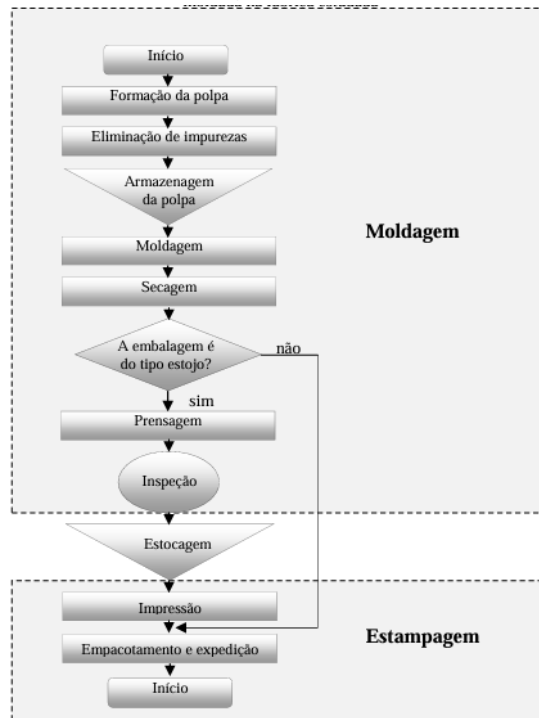
[Testes comprovam benefícios do uso do desagregador de aparas tipo longa vida – tipo Tetra Pak – Lotus Química](#)

Acesso em: 09 set. 2025

Após receber a matéria-prima no galpão para estocagem, ela é transportada para o interior da fábrica, para a produção da polpa. Os papéis são misturados com água e agentes químicos com objetivo de melhorar o processo de mistura e permitir que se chegue a cor desejada. O equipamento para este objetivo é chamado de Hidrapulper (MARTÍNEZ, 2013). De acordo com o autor, após isso, a polpa então passa por um sistema de purificação e limpeza, constituído por um conjunto de peneiras vibratórias, para que seja retirado sujeiras e impurezas mais evidentes da polpa. Na etapa seguinte, a massa segue para o tanque de armazenagem para que posteriormente, a fibra seja de fato moldada.

Na etapa de moldagem da fibra, a massa segue por uma máquina que trabalha com dois rotores sincronizados, que dão forma ao produto desejado, absorvendo o excesso de água por sucção (MARTÍNEZ, 2013). A figura 18 mostra um fluxograma das etapas de produção de embalagens de polpa de papel moldada, em determinada fábrica estudada pelo autor.

Figura 18: Processo de fabricação de embalagens de polpa moldada.



Fonte: Martínez, 2013. Disponível em:
[Dissertação de Mestrado Versão Final - Cópia](#)
 Acesso em: 09 set. 2025

A variedade de tipos de embalagens que é possível produzir com esse material são diversas, podendo ir de simples bandejas para produtos alimentícios e cosméticos à calços para equipamentos eletroeletrônicos e eletrodomésticos¹. A figura a seguir exibe um exemplo de produto construído com polpa de papel moldada.

Figura 19: Exemplo de embalagem feita com polpa moldada.



Fonte: BonitoPack. Disponível em: <https://bonitopak.com/pt/produtos-de-polpa-de-papel-moldada-por-termoformagem-a-base-de-fibra/>
 Acesso em: 23 set. 2025

¹Informação verbal fornecida em vídeo no YouTube: *Como é produzida a polpa de papel moldada?*. Publicado pelo canal "PackTalk", 2022. Disponível em:
<https://youtu.be/e3JZXFRcT5c?si=fHMN1wrxo9NIWiPH>. Acesso em: 16 set. 2025

1.1.1 Tipos de polpa moldada

Mourad e Vilela (2006) destacam que existem diferentes tipos de polpa moldada, conforme a aplicação e o tipo de produto a ser desenvolvido. De acordo com os autores:

Em função das diferenças significativas existentes entre os produtos de polpa moldada, classificou-os em quatro tipos para criar uma forma simplificada de explicar tais diferenças e auxiliar potenciais usuários a identificar quais os tipos que melhor satisfazem suas necessidades de aplicação. (MOURAD; VILELA, 2006, p.4).

Os quatro tipos de produtos que podem ser obtidos, mencionados pelos autores são: a Polpa Moldada Tipo 1, (de parede espessa), a Tipo 2 (moldados por transferência), a Tipo 3 (fibra termoformada) e por fim, a Tipo 4 (processada). A Polpa Moldada Tipo 1, de parede espessa, geralmente tem espessura variando entre 5mm e 13mm e são aplicadas basicamente para embalagens de suporte. A superfície dessa classe costuma ser bastante áspera em uma face e moderadamente lisa na face contrária. Ainda é destacado pelos autores que o custo é relativamente baixo, utilizando-se para sua produção especialmente mistura de aparas de papéis reciclados resultante do processo de fabricação do papel kraft (o mesmo material utilizado na produção das embalagens de cimento tradicionais e também, no pacote com o novo design). Produtos que fazem uso de polpa Tipo-1 são empregados em objetos pesados, peças automotivas e industriais, bandejas de paletes, calços técnicos, cantoneiras, dentre outros.

Figura 20: Exemplo de produto de Polpa Moldada do Tipo 1.



Fonte: Colepack. Disponível em:

<https://www.colepack.com.br/>

Acesso em: 21 out 2025

Prosseguindo com a análise, a Polpa Moldada Tipo 2, em que os materiais são moldados por transferência, é relatada pelos autores como produtos cuja espessura normalmente é diminuta, variando entre 2mm a 5mm e são bastante utilizadas. O processo utiliza formação através de moldes de transferência, gerando peças com superfícies relativamente lisas em uma das faces e bastante lisa na face oposta, com notável definição. Nesse caso, utiliza-se as aparas de jornais, em alta porcentagem ou exclusivamente. Os artefatos confeccionados com esse processo tipicamente são utilizados para embalar telefones celulares, peças de computador, bebidas, ovos, frutas, itens de escritório, etc.

Figura 21: Exemplo de embalagem de Polpa Moldada Tipo 2.



Fonte: Global Source. Disponível em:

<https://portuguese.globalsources.com/Embalagem-de/Caixa-de-papel-1207137245p.htm>

Acesso em: 21 out 2025

A Polpa Moldada Tipo 3, de fibra termoformada, faz uso de tecnologia denominada *cure-in-the-mold*, isso é, curado dentro do molde e possui a melhor qualidade dentre as opções de baixa espessura disponíveis. Após formado, o produto é colocado em moldes aquecidos que comprimem e densificam o material.

O resultado da aplicação desse processo são produtos de polpa moldada mais resistentes, com superfícies lisas, bem definidas e de alta precisão, possuindo aparência similar ao material plástico. Mourad e Vilela (2006) destacam ainda que, os itens produzidos já são retirados do molde prontos, não necessitando de secagem em forno ou natural em estufa. Os produtos que utilizam desse tipo de polpa são embalagens que vão diretamente para o ponto de venda, necessitando de boa aparência e acabamento refinado, como por exemplo, proteções para garrafas de vinho, produtos de beleza, dentre outros.

Figura 22: Exemplo de embalagem de Polpa Moldada Tipo 3.



Fonte: Blog embalagens em polpa moldada. Disponível em:

<https://embalagensempolpamoldada.blogspot.com/2019/10/polpa-moldada-na-embalagem-de-perfumes.html>

Acesso em: 24 out 2025

Por fim, o último modelo de polpa moldada, é o Tipo 4, classificado como processado. Produtos dessa classe, por regra, receberam algum tratamento ou processamento secundário, fornecendo um aspecto diferente ou complementar ao processo normal de produção do material. Dessa forma, pode ser aplicado em qualquer um dos três tipos de polpa mencionados. Processados como esse incluem: impressão, prensagem a quente, corte, vinco, utilização de corantes, aditivos especiais, dentre outros (MOURAD; VILELA, 2006).

Figura 23: Exemplo de produto de Polpa Moldada Tipo 4.



Fonte: BonitoPak. Disponível em:

<https://bonitopak.com/pt/embalagem-de-caixa-de-celulose-moldada-por-prensagem-umida-sem-plastico/>

Acesso em: 24 out. 2025

Apesar dos variados exemplos de insumos de polpa moldada existentes e de haver registros de utilização desse material para concepção de embalagens e proteções desde 1930, no Brasil, os produtos mais conhecidos e populares são as

bandejas para comportar ovos e frutas, além dos suportes para sanduíches, batatas e copos de lanchonetes das redes de *fast food* (MOURAD; VILELA, 2006). Os autores destacam ainda que devido a crescente preocupação ambiental e com questões de sustentabilidade, a polpa de papel moldada tem tido sua aplicação expandida no mercado mundial, especialmente por fazer uso de recursos simples e recicláveis, como as aparas de jornais, mostrando significativa e relevante participação na produção de materiais para proteção de maquinários, equipamentos eletrônicos, calços industriais e caixas personalizadas.

1.1.2 Análise física da polpa moldada

A análise de elementos sustentáveis para uso em embalagens requer a consideração de diversas informações sobre as propriedades físicas e mecânicas do material, entre elas, densidade aparente, resistência, capacidade de amortecimento e absorção de umidade. A polpa moldada, independente do tipo, tem se destacado no mercado para a produção de embalagens e peças de proteção devido ao seu adequado e benéfico desempenho físico e técnico (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022).

A densidade da polpa moldada varia de acordo com o tipo de fibra e o processo de moldagem, normalmente situando-se entre $0,28 \text{ g/cm}^3$ e $0,69 \text{ g/cm}^3$, o que proporciona equilíbrio entre leveza e resistência estrutural e mecânica (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022). Tal equilíbrio mostra-se importante pelo fato de permitir redução no peso das embalagens, porém, sem comprometer a segurança e a integridade dos produtos durante o transporte e o armazenamento. Em relação a resistência mecânica, as estruturas de polpa de papel moldada podem suportar esforços elevados e consideráveis, alcançando valores de até 47 MPa (Mega Pascal), especialmente quando as fibras utilizadas passam por processos de refino que aumentam sua coesão (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022).

Além disso, Dislaire et al. (2021) destaca que o material produzido demonstra um bom comportamento em relação a rigidez e elasticidade, características que auxiliam para sua durabilidade e eficiência no uso de embalagens e produtos industriais. No que se refere a absorção da umidade, responsável por influenciar diretamente no desempenho mecânico, peças sem tratamento podem reter até 50% de água, enquanto materiais com aditivos químicos, como amido catiônico e resinas,

podem ter sua taxa significativamente reduzida (PUBMED, 2022). Faz-se necessário destacar também a estrutura porosa da polpa moldada, capaz de proporcionar uma favorável capacidade de amortecimento e absorção contra impactos, tornando-a uma alternativa viável, ecológica e sustentável para substituir isopor e espumas sintéticas em embalagens de proteção (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022). As figuras a seguir exemplificam o material sendo utilizado para absorção de impactos e de proteção.

Figura 24: Polpa moldada sendo utilizada para absorção de impacto em embalagem.



Fonte: Colepack. Disponível em:

<https://www.colepack.com.br/>

Acesso em: 26 out. 2025

Figura 25: Polpa moldada utilizada para proteção de extremidades de peça.



Fonte: Colepack. Disponível em:

<https://www.colepack.com.br/>

Acesso em: 26 out. 2025

Assim sendo, no que se refere a propriedades físicas, resistência, leveza, estabilidade e desempenho ambiental faz da polpa moldada um dos materiais mais promissores entre as soluções sustentáveis atualmente disponíveis.

1.1.3 Análise ambiental da polpa moldada

A polpa moldada origina-se majoritariamente de fibras celulósicas renováveis e frequentemente de materiais reciclados, o que reduz bastante a demanda por matéria-prima virgem e favorece a chamada economia circular, sistema econômico que visa minimizar o desperdício e a poluição, fazendo com que um produto passe pelos processos de renovação, reutilização, reciclagem e reparo (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022).

Em função de sua composição à base de celulose, a polpa moldada é reciclável na cadeia de papel e passível de compostagem industrial, desde que não contenha revestimentos ou aditivos incompatíveis com o fluxo de destino (SEMPLE, 2022). No que se refere ao ciclo de vida, estudos de avaliação indicam que, para muitos cenários funcionais, produtos de polpa moldada apresentam menor potencial de aquecimento global e menor dependência de combustíveis fósseis quando comparados a alternativas como o EPS (Poliestireno Expandido), especialmente considerando o fim de vida do material através de reciclagem ou compostagem (SKINNER, 2024). A imagem a seguir mostra um exemplo de embalagem de polpa moldada, com acabamento rústico, após ser utilizada.

Figura 26: Embalagem de polpa moldada pós-uso.



Fonte: LinkedIn. Disponível em:

<https://pt.linkedin.com/pulse/embalagem-celul%C3%B3sica-de-polpa-moldada-luciano-r-oliveira>

Acesso em: 27 out. 2025.

Entretanto, o desempenho ambiental é sensível a fatores como transporte, origem das fibras, consumo energético e uso de revestimentos e tratamentos superficiais. A utilização de fibras recicladas ou provenientes de resíduos agrícolas, como bagaço de cana, palha de trigo e fibra de bambu, tende a reduzir os impactos

ambientais, enquanto o uso de madeira virgem sem manejo sustentável aumenta as emissões associadas à extração e ao processamento (DEBNATH; SARDER; HUBBE, 2022). O processo de polpação e secagem também exerce papel central, podendo representar até 60% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) equivalente quando utiliza energia de origem fóssil, por outro lado, o uso de biomassa ou vapor recuperado reduz significativamente essas emissões (PEANTHAM, 2024).

Outra vantagem é a menor persistência no ambiente: em condições apropriadas o material se biodegrada muito mais rápido do que plásticos convencionais, reduzindo a persistência de resíduos e os riscos de microplásticos, embora a biodegradação depende das condições (solo, composteira industrial, mar, etc) e da formulação do produto (SONG, 2009; USDA AMS, 2025). Por fim, aplicações com revestimentos, lacas ou agentes de reforço à base de polímeros sintéticos podem comprometer tanto a reciclabilidade quanto a compostabilidade, portanto, a escolha de tratamentos compatíveis com rotas de fim de vida sustentáveis é determinante para preservar os benefícios ambientais da polpa moldada (DEBNATH et al., 2022; ZHANG, 2022).

1.1.4 Análise econômica da polpa moldada

A aplicabilidade da polpa moldada para embalagens apresenta vantagens econômicas relevantes, como a possibilidade de utilizar matérias-primas de baixo custo (por exemplo, papel reciclado ou resíduos agrícolas) o que pode reduzir o custo da matéria-prima comparado a plásticos virgens (PW CONSULTING, 2024). O autor ainda destaca que, ao mesmo tempo, embora a embalagem de polpa moldada inicialmente possa custar cerca de 10 a 15% a mais por unidade em relação a plásticos convencionais devido a menores volumes de produção e ferramentas específicas, essa diferença tende a se amortizar por economias em logística e marketing sustentáveis.

A leveza e o design adequado da polpa moldada permitem reduções de custo de transporte e manuseio (por exemplo, estima-se uma diminuição de até 20 a 40% no custo de frete em cenários de exportação) o que melhora o custo total da cadeia. Por outro lado, há custos de investimento inicial mais elevados, especialmente para moldes personalizados e linhas automatizadas, que podem exigir payback mais longo para empresas de pequeno porte (LIAN INDUSTRIAL, 2024). Além disso, a

volatilidade dos preços da fibra reciclada ou dos resíduos agrícolas e o consumo energético relativamente elevado em etapas de secagem e moldagem podem pressionar margens, exigindo uma boa escala de produção ou integração vertical para garantir competitividade (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2025).

Embora o custo unitário de uma peça de polpa moldada possa ser comparável ou ligeiramente maior que alternativas plásticas em alguns casos, o custo total de propriedade (incluindo transporte, armazenagem, marcação “sustentável” e fim de vida) frequentemente favorece a polpa moldada — sobretudo quando há redução de custos logísticos pela otimização do design e proximidade de produção ao mercado (GRAND VIEW RESEARCH, 2024; BIORESOURCES, 2022). A tendência de crescimento do mercado global de embalagens em polpa moldada (estimada para alcançar cerca de US\$ 7 a 8 bilhões por volta de 2030) gera oportunidades de escala, redução de custos e difusão de tecnologia, o que melhora a viabilidade econômica do setor (MORDOR INTELLIGENCE, 2025).

1.2 Plástico reciclado

O plástico reciclado refere-se ao material polimérico que, após cumprir uma primeira vida útil como produto ou embalagem, é coletado, separado, limpo e submetido a processos de recuperação para ser reintroduzido como matéria-prima em novos produtos ou aplicações, por exemplo, através de reciclagem mecânica ou química (GEYER et al., 2017; SCHYNS & SHAVER, 2021). A reciclagem plástica engloba, portanto, uma etapa de “reprocessamento em produtos, materiais ou substâncias” e não apenas a recuperação de energia, de modo a manter valor material e evitar o descarte prematuro (NÈVE et al., 2025).

Entretanto, o plástico reciclado normalmente apresenta algumas perdas em desempenho ou limitações tecnológicas, como redução da massa molecular, contaminação ou mistura de polímeros diferentes, o que exige etapas avançadas de triagem, limpeza, separação e, em muitos casos, o uso de aditivos ou métodos especiais para recuperar qualidade (JIANG & BATEER, 2025; SCHYNS & SHAVER, 2021).

Figura 27: Flocos de plástico pós-uso, matéria-prima para o plástico reciclado.



Fonte: Primeplas. Disponível em:

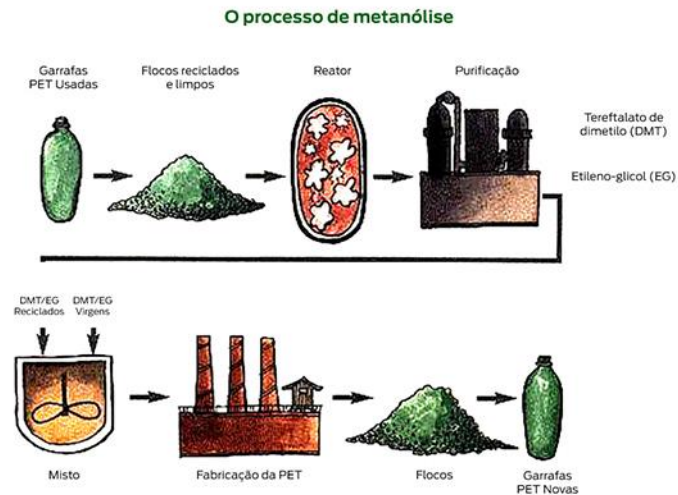
<https://primeplas.com.br/plastico-pp-e-reciclavel-saiba-mais-sobre-esse-residuo/>

Acesso em: 04 nov. 2025

O processo de fabricação do plástico reciclado envolve várias etapas. Primeiro, há a coleta dos resíduos plásticos pós-consumo ou pós-industrial, que são encaminhados para instalações de reciclagem para dar início ao tratamento. Em seguida, ocorre a triagem e separação, na qual os plásticos são separados por tipo de polímero, cor, presença de contaminantes ou itens estranhos, o que é essencial para assegurar a qualidade do material reciclado (DELVA et al., 2019; SCHYNS & SHAVER, 2021). Após essa etapa, procede-se à limpeza (lavagem, remoção de adesivos, rótulos, resíduos orgânicos, metais ou outros materiais) e à fragmentação (tritramento ou granulação) para reduzir o volume e o tamanho das partículas, facilitando o processamento seguinte (JIANG & BATEER, 2025; DELVA et al., 2019).

Em seguida, o material triturado é submetido à secagem e, frequentemente, à separação adicional por densidade ou outros meios para eliminar ainda mais impurezas (NAFIU et al., 2024). Por fim, ocorre a etapa de reprocessamento: o material limpo e fragmentado é fundido ou extrudado, muitas vezes filtrado ou tratado para remover contaminantes finais, e convertido em pellets ou em produtos acabados (BEZERAJ et al., 2025). Essa cadeia de etapas transforma o resíduo plástico em matéria-prima reciclada apta a ser utilizada em novos produtos, fechando o ciclo material e reduzindo o descarte e uso de matérias-primas virgens.

Figura 28: Exemplo simplificado do processo de reciclagem do plástico.



Fonte: Odin Plast. Disponível em:
<https://odinplast.com.br/processos/>
 Acesso em: 07 nov. 2025

1.2.1 Tipos de plástico reciclável

A classificação técnica dos plásticos recicláveis considera sete categorias comumente identificadas pelo código de resina, cada uma com propriedades físicas e químicas distintas que influenciam seu ciclo de reaproveitamento (GREEN CHEMISTRY, 2024; MATERIALS HORIZONS, 2023). O poliéster tereftalato - PET (código 1) é largamente utilizado em garrafas de bebidas e embalagens rígidas, apresenta boa transparência e alta densidade relativa ($\sim 1,35\text{--}1,38\text{ g/cm}^3$) e destaca-se entre os polímeros mais bem reciclados mecanicamente (GREEN CHEMISTRY, 2024; MATERIALS HORIZONS, 2023).

Figura 29: Garrafas de poliéster tereftalato - PET (código 1).



Fonte: eplast. Disponível em:

<https://eplast.com.br/produtos/diferencas-entre-o-plastico-pet-e-o-plastico-pp/>

Acesso em: 07. nov 2025

O polietileno de alta densidade - HDPE ou PEAD (código 2) empregado em frascos de detergentes e de leite, tem cadeia linear pouco ramificada, densidade $\sim 0,94\text{--}0,96\text{ g/cm}^3$, o que facilita a separação por flutuação, e é considerado de reciclagem mais madura (MATERIALS HORIZONS, 2023; GREEN CHEMISTRY, 2024). O cloreto de polivinila - PVC (código 3) usado em tubulações, janelas e cabos, possui átomos de cloro em sua cadeia, o que complica processos mecânicos de reciclagem e exige tratamento químico especializado. Sua taxa de recuperação é muito baixa (GREEN CHEMISTRY, 2024; COMPARATIVE ANALYSIS, 2023). Exemplos de embalagens de ambos os tipos de plásticos podem ser visualizados nas imagens abaixo.

Figura 29: Embalagens de polietileno de alta densidade - HDPE (código 2).



Fonte: MR Importadora. Disponível em:

<https://mrimportadora.com.br/produto/pead-polietileno-de-alta-densidade/>

Acesso em: 07 nov. 2025

Figura 30: Embalagens de cloreto de polivinila - PVC (código 3).



Fonte: Plastic Molding Solutions. Disponível em:

<https://plasticmoldingsolutions.com/pt/polyvinyl-chloride-pvc/>

Acesso em: 07 nov. 2025

O polietileno de baixa densidade - LDPE (código 4) que aparece em sacolas plásticas, filmes finos e embalagens flexíveis, tem densidade $\sim 0,91\text{--}0,93\text{ g/cm}^3$ e

estrutura ramificada que dificulta a separação e prejudica o rendimento e qualidade dos reciclados (MATERIALS HORIZONS, 2023). O polipropileno - PP (código 5) utilizado em tampas, potes, utensílios domésticos e componentes automotivos, apresenta ponto de fusão elevado, boa resistência química e térmica, mas baixa taxa de coleta e reciclagem mecânica. (GREEN CHEMISTRY, 2024). Ambos podem ser vistos nas imagens a seguir.

Figura 31: Embalagens de polietileno de baixa densidade - LDPE (código 4).



Fonte: Petro Resinas. Disponível em:

<https://www.petroresinas.com.br/blog/polietileno-de-baixa-densidade/conheca-as-caracteristicas-do-polietileno-de-baixa-densidade/>

Acesso em: 07 nov. 2025

Figura 32: Embalagens de polipropileno - PP (código 5).



Fonte: Neuplast. Disponível em:

<https://www.neuplast.com.br/produtos/pp-polipropileno/>

Acesso em: 07 nov. 2025

O poliestireno - PS (código 6) encontrado em copos descartáveis, bandejas de isopor (EPS), tem estrutura aromática relativamente estável, densidade $\sim 1,03\text{--}1,06$ g/cm³, porém sua volumetria elevada (no caso do EPS) e baixo valor de mercado limitam a viabilidade da reciclagem convencional (MATERIALS HORIZONS, 2023;

GREEN CHEMISTRY, 2024). Finalmente, a categoria “Outros” (código 7) engloba misturas poliméricas, bioplásticos e resinas especiais, cuja reciclabilidade depende de tecnologias emergentes e de mercados pouco estabelecidos. As figuras 33 e 34 exemplificam o uso desses insumos reciclados.

Figura 33: Embalagem de poliestireno - PS (código 6).



Fonte: Attitude. Disponível em:

<https://www.attitude.ind.br/blog/embalagens-de-poliestireno/comparacao-entre-embalagens-de-poliestireno-e-outros-materiais-plasticos/>

Acesso em: 07 nov. 2025

Figura 34: Exemplo de embalagens de plástico reciclável de código 7.



Fonte: Interplast. Disponível em:

<https://www.interplast.pt/Artigos/317910-Ampacet-lanca-composto-mate-BOPP-para-embalagem-flexivel.html>

Acesso em: 07 nov. 2025

Em todos os casos, a correta classificação, separação e limpeza dos materiais se revelam condições essenciais para que o processo de reciclagem opere com eficiência, maximizando a reinserção desses plásticos na cadeia produtiva e reduzindo a geração de rejeitos (MATERIALS HORIZONS, 2023).

1.2.2 Análise física do plástico reciclado

A reutilização de polímeros pós-consumo modifica de forma significativa as suas propriedades físicas e mecânicas, de modo que a introdução de plásticos reciclados em compósitos revela alterações no módulo de elasticidade, na resistência à tração, na fluidez e na estabilidade térmica em relação aos materiais virgens (DUARTE et al., 2023; ABDULLAH e CHE ASLAN, 2019). No caso do Polipropileno reciclado, observa-se que a adição até cerca de 40% à matriz de PP comercial não resulta em queda expressiva na resistência à tração, embora o índice de fluidez aumente e o alongamento até a ruptura apresenta elevação em função de menor cristalinidade ou de contaminação (RIBEIRO et al., 2024).

De modo similar, ensaios com Polietileno Tereftalato reciclado mostram que, em compósitos com agregados ou cargas minerais, a resistência à compressão pode decair entre 10% e 17% em comparação ao PET virgem, porém a diferença torna-se viável para aplicações de menor exigência técnica (QUINTERO et al., 2019). No geral, o desempenho do plástico reciclado permanece funcional para diversas aplicações, mas depende fortemente da qualidade da matéria-prima (contaminantes, degradação térmica), da processabilidade (fusão, extrusão, moldagem) e das condições de uso final, de forma que o planejamento adequado da reciclagem e da formulação do material são cruciais para atender os requisitos técnicos (DUARTE et al., 2023).

Outro aspecto importante sobre o comportamento físico do plástico reciclado está relacionado à sua morfologia superficial e integridade estrutural. Estudos recentes indicam que, após sucessivos ciclos de reciclagem, há aumento da rugosidade superficial, presença de micro trincas e porosidades decorrentes da degradação térmica e da perda de homogeneidade molecular, o que reduz a resistência à fadiga e favorece a absorção de umidade (VILAPLANA e KARLSSON, 2008; RAGAERT, DELVA E VAN GEEM, 2017).

Figura 35: Flocos de plástico reciclado.



Fonte: Azulpack. Disponível em:

<https://www.azulpack.com.br/blog/reciclagem-de-plastico/>

Acesso em: 08 nov. 2025

1.2.3 Análise ambiental do plástico reciclado

O plástico reciclado apresenta vantagens ambientais significativas em comparação aos polímeros virgens, sobretudo pela redução da demanda por recursos fósseis e pela diminuição das emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida do material (RAGAERT, DELVA e VAN GEEM, 2017). A reciclagem mecânica, principal rota de reaproveitamento, possibilita reduzir em até 30% a 70% o consumo energético e a geração de dióxido de carbono equivalente, dependendo do tipo de resina e da eficiência do processo (HOPEWELL, DVORAK e KOSIOR, 2009).

Além disso, o uso de plásticos reciclados em embalagens e produtos de uso curto contribui para a mitigação do acúmulo de resíduos sólidos urbanos e para o avanço da economia circular, ao prolongar a vida útil dos materiais e evitar sua disposição em aterros ou no meio ambiente (GEYER, LORINCZ e AUER, 2017). No entanto, as propriedades ambientais do plástico reciclado dependem fortemente da pureza e da separação adequada dos polímeros, pois a contaminação e a mistura de resinas podem gerar degradação química e comprometer a reciclabilidade (AL-SALEM et al., 2017).

Outro fator relevante é que a reciclagem sucessiva pode levar à oxidação e degradação térmica, reduzindo a estabilidade do material e exigindo o uso de aditivos estabilizantes e compatibilizantes para manter o desempenho ambiental e funcional (VILAPLANA e KARLSSON, 2008). Dessa forma, o plástico reciclado representa um material de elevado potencial ecológico, mas seu impacto ambiental positivo depende de cadeias de reciclagem eficientes, gestão adequada de resíduos e controle tecnológico do processo produtivo (SANTOS, FERREIRA e MELO, 2021).

Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida indicam que a substituição de resinas virgens por recicladas pode diminuir em até 80% a pegada de carbono de determinados produtos, dependendo do tipo de polímero e do método de reciclagem empregado (ZHONG et al., 2022). Atualmente, avanços em reciclagem química e enzimática vêm ampliando o potencial ecológico dos polímeros reciclados, permitindo a recuperação de monômeros originais e a produção de materiais com qualidade equivalente aos virgens. Dessa forma, o plástico reciclado consolida-se como um elemento estratégico na transição para uma economia circular e de baixo carbono, promovendo benefícios ambientais mensuráveis e reduzindo a dependência de matérias-primas não renováveis (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020; RIBEIRO et al., 2024).

Figura 36: Variedade de lixo plástico em área urbana.



Fonte: BRK ambiental. Disponível em:

<https://blog.brkambiental.com.br/lixo-plastico/>

Acesso em: 08 nov. 2025

1.2.4 Análise econômica do plástico reciclado

Do ponto de vista econômico, o plástico reciclado apresenta vantagens significativas em termos de custo de produção e de uso de recursos, especialmente quando comparado aos polímeros virgens obtidos de fontes petroquímicas. Estudos indicam que o reaproveitamento de resíduos plásticos pode reduzir em até 60% os custos de matéria-prima, além de diminuir despesas com energia e transporte, principalmente quando a reciclagem é realizada em âmbito local (RAGAERT, DELVA e VAN GEEM, 2017; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020). A produção de resinas recicladas também contribui para a valorização econômica dos resíduos

sólidos urbanos, ao inserir materiais descartados em novos ciclos produtivos e fomentar cadeias de logística reversa (SANTOS, FERREIRA e MELO, 2021).

Além disso, a substituição parcial de polímeros virgens por reciclados em segmentos como embalagens, construção civil e automotivo tem se mostrado economicamente viável, pois reduz a dependência de petróleo e mitiga os efeitos da volatilidade dos preços internacionais (AL-SALEM et al., 2017). No entanto, a rentabilidade do plástico reciclado depende da qualidade do material coletado, da eficiência da triagem e da pureza do polímero, fatores que influenciam diretamente o valor de mercado e o custo do reprocessamento (VILAPLANA e KARLSSON, 2008). Assim, a consolidação da reciclagem plástica como alternativa economicamente sustentável requer investimentos em tecnologia, infraestrutura e políticas públicas de incentivo, de modo a integrar os benefícios ambientais e econômicos em um modelo circular de produção (HOPEWELL, DVORAK e KOSIOR, 2009; RIBEIRO et al., 2024).

A análise econômica do plástico reciclado também deve considerar os desafios estruturais e os custos indiretos que influenciam a viabilidade do setor. Embora o material reciclado apresente menor custo energético e de matéria-prima, a logística de coleta, triagem e transporte ainda representa um dos principais entraves econômicos, especialmente em países em desenvolvimento, onde a infraestrutura de gestão de resíduos é limitada. Além disso, a competitividade com o plástico virgem (cujo preço é fortemente vinculado ao custo do petróleo) faz com que, em períodos de baixa no mercado de combustíveis fósseis, o material reciclado perca espaço por apresentar custos de processamento mais elevados (AL-SALEM et al., 2017). Também é relevante observar que a formalização e inclusão socioeconômica de catadores e cooperativas contribuem não apenas para o aumento da eficiência da coleta seletiva, mas também para a geração de empregos e renda, integrando benefícios sociais à sustentabilidade econômica do setor (SANTOS, FERREIRA e MELO, 2021).

1.3 Bioplástico

O outro material considerado promissor que a pesquisa bibliográfica e documental se deparou é o bioplástico, também chamado de plástico verde. Com o objetivo de minimizar os danos ambientais causados pelos plásticos convencionais

feitos de petróleo (matéria-prima não renovável), cientistas desenvolveram uma tecnologia de material conhecida como bioplástico².

Diferente do plástico convencional, trata-se de um material produzido a partir de matérias-primas renováveis, podendo essas ser de diferentes insumos naturais: cana-de-açúcar, amido de milho, mandioca, batata, óleos vegetais, dentre outros (TELLES; SARAN; TREVISOLLI, 2011), podendo incluir no processo de fabricação, até mesmo, microorganismos. Representa um modelo de produção bastante eficaz e ecológica, pois, em relação ao plástico usual de polietileno proveniente do petróleo, possui um baixo custo de fabricação, permanece sendo reciclado, é compostável, biodegradável e não dissolve produtos químicos no solo no processo de descarte e pós-consumo, sendo um produto atóxico para o meio ambiente (ALMEIDA et al., 2020).

Além das questões destacadas, ainda segundo Almeida et al. (2020), ao utilizar os recursos renováveis e naturais do ambiente para a produção do bioplástico, o país se torna cada vez menos dependente de petróleo proveniente de outros países, representando uma enorme vantagem econômica. A figura 27 exhibe o amido de milho, uma das tantas matérias-primas utilizadas para a confecção do bioplástico.

O processo de produção de bioplásticos inicia-se com a preparação da biomassa ou fonte renovável, que pode incluir extração, purificação e acondicionamento da matéria-prima como amido, celulose ou resíduos orgânicos. Em seguida, há etapas de fermentação ou hidrólise em que açúcares ou outros precursores são transformados em monômeros ou polímeros biológicos, por exemplo por microorganismos ou por reações químicas (ALMEIDA et al., 2020).

A etapa subsequente é a polimerização e/ou moldagem, onde esses monômeros são convertidos em polímeros (como o Ácido Láctico e o Polihidroxialcanoato) e depois transformados em produtos plásticos por extrusão, moldagem por injeção ou extensão térmica. Finalmente, ocorre o acabamento e controle de qualidade, bem como eventuais modificações físico-químicas (adição de plastificantes, agentes de reforço, secagem) para conferir propriedades desejadas, antes do produto final (ALMEIDA et al., 2020).

² Informação verbal fornecida em vídeo no Youtube: *Bioplástico substitui material poluente com matéria-prima biodegradável*. Publicado pelo canal "Revista Novo Tempo", 2024. Disponível em: https://youtu.be/H3G4Ebm1KaE?si=O7U_vf3QOt815plb. Acesso em: 02 out. 2025

Figura 27: Amido de milho, uma das matérias-primas para o bioplástico.



Fonte: Empório Mais Vida. Disponível em:

https://www.emporiomaisvida.com.br/amido-de-milho?srsId=AfmBOoqQx_7xO1uPVLTKdNZERJkcHxBCor9jr2n4sfLK6U_N4KvB2bH-

Acesso em: 10 out. 2025

Existe uma diversidade de tipos e classificações de bioplásticos e biopolímeros em testes e em produção no mercado, como o Polihidroxialcanoato (PHA), o Polilático (PLA), o Polihidroxibutirato (PHB), o Poliglicolatos (PGA), dentre outros (SERAFIM; LEMOS; REIS, 2003). Os autores destacam ainda que os PHAs, em especial, possuem propriedades químicas e físicas muito semelhantes às do polipropileno (PP), produzido com petróleo, o que os tornam, gradualmente, prováveis candidatos na sua substituição em diversas aplicações. A figura 28, vista a seguir, mostra um exemplo de embalagem sustentável de bioplástico, feita da fécula da mandioca.

Figura 28: Embalagem desenvolvida com bioplástico.



Fonte: Nosso Impacto. Disponível em:

<https://nossoimpacto.com.br/historias/startup-de-embalagens-de-mandioca-aposta-na-demanda-por-opcoes-biodegradaveis-para-substituir-plasticos-de-uso-unico/>

Acesso em: 10 out. 2025

1.3.1 Tipos de bioplástico

O ácido polilático (PLA) é um poliéster termoplástico produzido a partir de recursos renováveis como amido de milho, cana-de-açúcar ou beterraba, e possui o atributo de ser biodegradável e compostável em condições industriais (MUKHERJEE e KAO, 2011; RSC ADVANCES, 2023). De acordo com Mukherjee e Kao (2011), o

PLA já representa uma fração significativa da produção mundial de bioplásticos, sendo amplamente utilizado em embalagens alimentícias, utensílios descartáveis e impressões 3D (WENG et al., 2023). Apesar de ser considerado um bioplástico sustentável, o PLA apresenta limitações, como baixa resistência térmica e degradação lenta em ambientes marinhos e de aterro, o que restringe seu desempenho em determinadas aplicações (MUKHERJEE e KAO, 2011).

Figura 29: Copos feitos de ácido poliláctico (PLA).



Fonte: BIOleard. Disponível em:

<https://www.bioleaderpack.com/pt/copos-de-acido-polilactico-pla-a-alternativa-ecologica-ao-plastico/>

Acesso em: 10 out. 2025.

Os polihidroxicanoatos (PHAs) constituem uma família de poliésteres produzidos por microrganismos por meio da fermentação de açúcares ou óleos vegetais, sendo completamente biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis (MUKHERJEE e KAO, 2011; PUBMED, 2023). Esses biopolímeros possuem propriedades ajustáveis — desde materiais rígidos até elastômeros — dependendo da cepa bacteriana e das condições de cultivo (WENG et al., 2023). Um diferencial importante é sua capacidade de degradar até mesmo em ambientes marinhos, o que os torna mais ambientalmente vantajosos que o PLA (MUKHERJEE e KAO, 2011). Contudo, o custo elevado e a produção em menor escala ainda são entraves para a competitividade dos PHAs frente aos plásticos convencionais (PUBMED, 2023).

frequentemente empregado em filmes compostáveis, sacolas e aplicações agrícolas (WENG et al., 2023). Embora apresente boa flexibilidade e resistência, seu custo e a necessidade de infraestrutura adequada de compostagem ainda são obstáculos para seu uso generalizado (PUBMED, 2024).

Figura 32: Exemplo de embalagem de Polibutileno adipato-tereftalato (PBAT).



Fonte: Mundo do plástico. Disponível em:

<https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/artigos/raio-x-dos-materiais-pbat/>

Acesso em: 10 out. 2025

Os bioplásticos à base de amido (TPS – *Thermoplastic Starch*) são obtidos a partir de fontes renováveis como milho, mandioca, batata ou trigo, e tornam-se termoplásticos quando o amido é processado com plastificantes como glicerol sob calor e pressão (AVÉROUS e POLLET, 2012). Esse tipo de bioplástico apresenta excelente biodegradabilidade e baixo custo, o que o torna um dos mais atrativos para substituição de plásticos convencionais em embalagens e filmes. Contudo, o TPS possui limitações quanto à resistência à umidade e à estabilidade mecânica, sendo comum o seu uso em misturas com outros polímeros, como o PLA e o PBAT, para melhorar suas propriedades (AVÉROUS e POLLET, 2012; SCAFFARO et al., 2020).

Figura 33: Copo feito de bioplástico de amido.



Fonte: A Lavoura. Disponível em:

<https://www.alavoura.com.br/pesquisa-inovacao/biotecnologia/amido-de-mandioca-se-transforma-em-copinhos-e-plasticos-biodegradaveis/>

Acesso em: 11 out. 2025

Os bioplásticos derivados da celulose são obtidos por modificação química de fibras vegetais (como madeira e algodão), originando materiais como o acetato e o nitrato de celulose (SIRACUSA, 2019). Esses materiais destacam-se pela alta transparência, rigidez e resistência térmica, além de serem biodegradáveis em condições adequadas (KHALIL et al., 2016). Segundo Siracusa (2019), as aplicações mais comuns incluem filmes para embalagens, revestimentos e produtos médicos. Apesar do potencial ambiental positivo, o processo de modificação da celulose ainda envolve solventes e reagentes químicos que podem impactar a sustentabilidade global do material (KHALIL et al., 2016; SIRACUSA, 2019).

Figura 34: Copo de bioplásticos de celulose.



Fonte: Nord West. Disponível em:

<https://www.nordwest.ind.br/blog/plastico-de-nanofibras-de-celulose-e-uma-realizacao-brasileira/>

Acesso em: 11 out. 2025

O polietileno verde (PE Verde) é quimicamente idêntico ao polietileno convencional, porém é produzido a partir de etanol obtido da cana-de-açúcar, sendo, portanto, um polímero de origem renovável, mas não biodegradável (BRASKEM, 2023). Essa alternativa contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, já que o CO₂ absorvido pela cana durante o cultivo compensa parcialmente as emissões geradas no processo produtivo (PEREIRA et al., 2021). De acordo com Braskem (2023), o PE verde mantém as mesmas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira do polietileno tradicional, o que facilita sua integração na cadeia industrial sem necessidade de adaptações técnicas.

Figura 35: Embalagens de polietileno verde (PE Verde).



Fonte: Precisão absoluta. Disponível em:

https://www.precisaoabsoluta.com.br/produto/frasco-reagente-pe-polietileno-verde-250ml-nalgon/?srsitid=AfmBOopr6_3b1n_uErPHTlhcqWt04abeEGyG3LuVttKJtYaZPsq9C1z4

Acesso em: 11 out. 2025

Esses representam os principais tipos de bioplásticos existentes no mercado. Eles constituem um conjunto diversificado de materiais com propriedades físicas, químicas e ambientais distintas, que os tornam alternativas promissoras aos plásticos convencionais derivados do petróleo (MUKHERJEE E KAO, 2011; WENG et al., 2023). Enquanto alguns, como o PLA, PHA e PBS, destacam-se por sua biodegradabilidade e aplicabilidade em embalagens, outros, como o PE verde e o Bio-PET, oferecem vantagens relacionadas à redução da pegada de carbono, sem necessariamente serem biodegradáveis (BRASKEM, 2023; PEREIRA et al., 2021). A escolha do bioplástico mais adequado depende, portanto, das características exigidas pelo produto final, do ambiente de descarte e das condições de processamento, evidenciando a necessidade de análise integrada de sustentabilidade, funcionalidade e viabilidade econômica (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2024; ÁVILA E ROMANO, 2015). Assim, a compreensão detalhada dos diferentes tipos de bioplásticos é essencial para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes no design de embalagens e produtos industriais.

1.3.2 Análise física do bioplástico

Os bioplásticos são materiais produzidos a partir de fontes renováveis e que podem se decompor naturalmente no meio ambiente. Eles possuem propriedades físicas e técnicas que variam de acordo com o tipo de matéria-prima usada na sua fabricação. Em algumas formulações, como as feitas com quitosana e lignina, os

bioplásticos apresentaram boa resistência e rigidez, alcançando cerca de 34,82 MPa de resistência à tração (NINGRUM et al., 2025). Já os produzidos a partir de amido de mandioca e *tannia* mostraram-se mais flexíveis, com resistência menor, entre 0,81 e 1,33 MPa, mas com maior alongamento antes da ruptura (CHRISTWARDANA; ISMOJO; MARSUDI, 2021).

Além da resistência, também se observam diferenças em aspectos como a espessura, a absorção de água, a permeabilidade ao vapor e o comportamento térmico, que podem variar conforme o tipo de amido e os aditivos utilizados (CHRISTWARDANA; ISMOJO; MARSUDI, 2021). Segundo uma revisão recente, os bioplásticos costumam ser menos resistentes que os plásticos tradicionais, mas apresentam vantagens por serem mais sustentáveis e versáteis, dependendo do material usado (RSC ADVANCES, 2025).

Em outros estudos, verificou-se que a densidade e a rigidez dos bioplásticos feitos com farinha de mandioca mudam conforme a temperatura e a pressão aplicadas durante o processo de moldagem (NAVIA PORRAS; BEJARANO ARANA, 2014). Essas características físicas e técnicas influenciam diretamente o uso dos bioplásticos, que podem ser aplicados em embalagens, filmes de cobertura e outros produtos, desde que se escolha a composição e o método de produção mais adequados (PUTRI; RIANJANU; SIPAHUTAR, 2024).

Figura 36: Produto de bioplástico com resistência mecânica e térmica.



Fonte: Bioplastic news. Disponível em:

<https://bioplasticnews.blogspot.com/2009/01/bioplastico-com-maior-poder-de-impacto.html>

Acesso em: 02 nov. 2025

1.3.3 Análise ambiental do bioplástico

Os bioplásticos englobam uma família diversa de materiais que podem ser bio-baseados, biodegradáveis ou ambos, apresentando propriedades físico-mecânicas e térmicas que variam amplamente conforme a matriz polimérica e aditivos utilizados; enquanto alguns tipos (por exemplo, PLA e determinados PHA) oferecem rigidez e boa processabilidade para embalagens, outros exigem modificações para alcançar resistência e durabilidade comparáveis aos polímeros fósseis (DI BARTOLO; INFURNA; DINTCHEVA, 2021).

Do ponto de vista ambiental, avaliação por Análise do Ciclo de Vida mostram que bioplásticos podem reduzir a pegada de carbono quando o biocombustível/biomassa de origem e o processamento são otimizados, mas esses ganhos dependem fortemente do sistema energético e das etapas industriais (pré-tratamento e fermentação, por exemplo) que frequentemente consomem muita energia e químicos, podendo aumentar impactos como consumo de água e ecotoxicidade em certas rotas produtivas (SENILĂ et al., 2024). Além disso, a biodegradabilidade é condicionada a ambientes e normas específicas (muitos bioplásticos só se degradam rapidamente em instalações de compostagem industrial, não necessariamente em ambientes marinhos ou em aterros) o que cria riscos de contaminação por fragmentos e confusão no manejo de resíduos se a sinalização e infra-estrutura forem inadequadas (COMISSÃO EUROPEIA, s.d.; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2024). Assim, embora apresentem potencial ecológico promissor, o impacto real dos bioplásticos depende da integração entre o design do material, a infraestrutura de compostagem e políticas de gestão de resíduos, de modo a garantir que sua biodegradabilidade e origem renovável se traduzam efetivamente em benefícios ambientais (NASER et al., 2021). Em outras palavras, certificações e uma análise de ciclo de vida completa (incluindo impactos de uso da terra, eutrofização e custos sociais) são essenciais para avaliar se a substituição de plásticos fósseis por bioplásticos representa, na prática, um benefício ambiental ou apenas um deslocamento de impactos para outras partes da cadeia (DI BARTOLO et al.; SENILĂ et al.).

Figura 37: Sequência mostrando biodegradação do bioplástico no ambiente.



Fonte: Olhar Digital. Disponível em:

<https://olhardigital.com.br/2023/10/11/ciencia-e-espaco/bioplastico-o-que-e-e-para-que-serve/>

Acesso em: 09 nov. 2025

1.3.4 Análise econômica do bioplástico

Do ponto de vista econômico, os bioplásticos apresentam um cenário em expansão, mas ainda enfrentam desafios significativos relacionados ao custo de produção e à competitividade frente aos polímeros convencionais (PHILP; RITCHIE; GUY, 2013). Os autores ainda destacam que, embora o setor venha crescendo de forma contínua (com aumento da capacidade produtiva mundial e diversificação das matérias-primas renováveis), o custo médio de fabricação de bioplásticos, como o ácido polilático (PLA) e o polihidroxialcanoato (PHA), ainda é 30% a 80% superior ao dos plásticos derivados de petróleo, em função do preço das biomoléculas precursoras, da menor escala industrial e da necessidade de processos biotecnológicos mais complexos.

No entanto, esse diferencial tende a diminuir com a ampliação da produção e o avanço de tecnologias de conversão mais eficientes, como o uso de resíduos agroindustriais e lignocelulósicos como substrato, reduzindo custos de matérias-primas e impactos ambientais (CARUS; DAMMER, 2018). Além disso, análises de mercado e estudos econômicos indicam que o valor agregado dos bioplásticos não se limita apenas ao custo de produção: há benefícios indiretos, como a redução de taxas ambientais, incentivos fiscais, geração de empregos e fortalecimento de cadeias produtivas locais, especialmente em países com base agrícola sólida (SPIERLING et al., 2018). Ainda assim, a viabilidade econômica plena dos bioplásticos depende de políticas públicas de incentivo, padronização regulatória e investimentos em inovação,

fatores que determinam a consolidação do setor em uma economia circular global (PIEMONTE; GIRONI, 2011).

1.4 Biocompósito

Os biocompósitos são materiais formados pela combinação de uma matriz polimérica (que pode ser de origem natural ou sintética biodegradável) com um reforço de origem natural, geralmente fibras vegetais, como sisal, bambu, juta, linho ou bagaço de cana. Essa associação resulta em um material com propriedades mecânicas aprimoradas, menor impacto ambiental e boa relação custo-benefício em comparação aos compósitos convencionais à base de fibras sintéticas (MOHANTY, MISRA E DRZAL, 2005).

A matriz tem a função de unir e proteger as fibras, enquanto o reforço é responsável por conferir resistência e rigidez, tornando os biocompósitos adequados para aplicações em setores como embalagens, construção civil, automotivo e bens de consumo (FARUK et al., 2012). Além de suas vantagens técnicas, os biocompósitos apresentam benefícios ambientais significativos, pois utilizam recursos renováveis e contribuem para a redução de resíduos plásticos e emissões de carbono (ASHORI, 2008). Sua biodegradabilidade e capacidade de substituição de polímeros derivados do petróleo os tornam opções promissoras dentro da economia circular e do desenvolvimento sustentável. No entanto, desafios como a variabilidade das propriedades das fibras naturais e a compatibilidade entre matriz e reforço ainda demandam pesquisas e avanços tecnológicos para otimizar o desempenho desses materiais (THAKUR et al., 2014).

Figura 38: Esquema necessário para a confecção de biocompósitos.



Fonte: Bio4plas. Disponível em:

<https://bio4plas.com/biocompositos-e-biopolimeros/>

Acesso em: 09 nov. 2025

No que se refere ao processo de produção dos biocompósitos, as ações envolvem uma série de etapas que visam garantir a adequada integração entre a matriz polimérica e o material de reforço natural. Inicialmente, realiza-se a preparação das fibras naturais, que podem ser submetidas a processos de limpeza, secagem e tratamento químico para remoção de impurezas e melhoria da aderência à matriz (JOSEPH et al., 2020). Em seguida, ocorre a preparação da matriz polimérica, que pode ser constituída por polímeros de origem biológica, como o PLA ou o PHA, sendo aquecida até atingir o estado de fusão adequado para mistura (MOHAN; KHAN, 2021).

A etapa de mistura consiste na homogeneização das fibras com a matriz por meio de extrusoras ou misturadores mecânicos, a fim de assegurar uma boa dispersão do reforço (SAHEB; JOG, 1999). Posteriormente, o material é moldado por processos como compressão, injeção ou extrusão, de acordo com as especificações desejadas do produto final (KALIA et al., 2011). Após a moldagem, o biocompósito pode passar por tratamentos térmicos ou mecânicos complementares, que visam aprimorar suas propriedades estruturais e de desempenho. Assim, o processo de fabricação é altamente dependente da compatibilidade entre os componentes e das condições de processamento, fatores que influenciam diretamente as propriedades mecânicas e ambientais do material final (SINGH; SHARMA, 2022).

Figura 39: Plástico descartado sendo utilizado para a fabricação de biocompósito.



Fonte: Inovação Tecnológica. Disponível em:

<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=plastico-descartado-fabricacao-biocompositos&id=010125120114>

Acesso em: 09 nov. 2025

1.4.1 Tipos de biocompósito

Os biocompósitos podem ser classificados em diferentes tipos conforme a origem de seus constituintes e a finalidade de aplicação. De modo geral, dividem-se em biocompósitos parcialmente verdes e biocompósitos totalmente verdes. Os parcialmente verdes são formados pela combinação de uma matriz polimérica sintética, geralmente derivada do petróleo, com reforços de origem natural, como fibras vegetais (FARUK et al., 2012). Já os totalmente verdes são compostos por uma matriz biopolimérica (como o ácido polilático, PLA, ou o polihidroxialcanoato, PHA, mencionados no item de bioplásticos) associada a fibras naturais, resultando em materiais de maior sustentabilidade, pois todos os seus componentes são de origem renovável e potencialmente biodegradáveis (MOHANTY, MISRA e DRZAL, 2005).

Figura 40: Produtos feitos de biocompósito.



Fonte: Diário do Rio. Disponível em:

<https://diariodorio.com/tecnologia-criada-no-rio-de-janeiro-transforma-caroco-de-acai-em-bioplastico-100-compostavel/>

Acesso em: 09 nov. 2025

Além disso, os biocompósitos também podem ser diferenciados pelo tipo de reforço utilizado, que pode assumir a forma de fibras curtas, longas, tecidos ou partículas, influenciando diretamente suas propriedades mecânicas, térmicas e de processamento. Essa diversidade estrutural permite adaptar os biocompósitos a distintas aplicações industriais, como na fabricação de embalagens, componentes automotivos e materiais de construção (PICKERING et al., 2016).

1.4.2 Análise física do biocompósito

As propriedades físicas dos biocompósitos variam conforme os tipos de matriz e reforço empregados, mas de modo geral apresentam boa resistência mecânica, baixo peso específico e elevada rigidez, tornando-se alternativas competitivas frente aos compósitos convencionais à base de fibras sintéticas. As fibras naturais utilizadas como reforço (como sisal, juta, linho e bambu) contribuem para o aumento da resistência à tração, ao impacto e à flexão, além de reduzirem a densidade do material final (FARUK et al., 2012).

A interface entre a matriz e as fibras é um fator determinante para o desempenho técnico do biocompósito, influenciando diretamente sua durabilidade e estabilidade térmica (JOSEPH et al., 2009). O teor de umidade, o tipo de tratamento superficial aplicado às fibras e o método de processamento também afetam propriedades como absorção de água, condutividade térmica e resistência à fadiga (PICKERING et al., 2016). Assim, os biocompósitos combinam leveza, resistência e sustentabilidade, sendo aplicáveis em setores como embalagens, construção civil e indústria automotiva.

Além das propriedades mecânicas e físicas citadas, os biocompósitos apresentam excelente desempenho acústico e boas propriedades de isolamento térmico, o que amplia suas aplicações em setores como construção civil e transporte (SABA et al., 2017). Sua baixa densidade contribui para a redução de peso estrutural em componentes industriais, favorecendo a eficiência energética em produtos como veículos e equipamentos (KORONIS, SILVA e FONTUL, 2013). Entretanto, esses materiais ainda enfrentam limitações técnicas, principalmente quanto à absorção de umidade e à estabilidade dimensional, uma vez que as fibras naturais são hidrofílicas e podem comprometer a integridade do compósito em ambientes úmidos (DITTENBER E GANGARAO, 2012).

Figura 41: Bloco de biocompósito de impressão 3D.



Fonte: Manufatura Digital. Disponível em:

<https://www.manufaturadigital.com/estudios-de-design-criam-biocomposito/>

Acesso em: 09 nov. 2025

1.4.3 Análise ambiental do biocompósito

Os biocompósitos apresentam propriedades ambientais e ecológicas de grande relevância, principalmente por contribuírem para a redução do impacto ambiental associado aos materiais sintéticos tradicionais. Por serem constituídos, total ou parcialmente, por recursos renováveis, esses materiais promovem menor dependência de derivados de petróleo e podem ser biodegradáveis ou recicláveis, dependendo da matriz utilizada (MOHANTY, MISRA e DRZAL, 2005). Além disso, o uso de fibras naturais como reforço resulta em menor emissão de gases de efeito estufa durante a produção, devido à capacidade das plantas de fixar carbono atmosférico durante seu crescimento (JOSHI et al., 2004).

Outra vantagem ambiental é a eficiência energética do processo produtivo, uma vez que a obtenção e o processamento das fibras vegetais exigem menos energia em comparação com fibras sintéticas, como vidro ou carbono (FARUK et al., 2012). Por essas razões, os biocompósitos são considerados materiais ecologicamente sustentáveis, alinhados aos princípios da economia circular e da produção limpa, favorecendo a substituição progressiva de materiais convencionais por alternativas ambientalmente responsáveis (PICKERING et al., 2016).

Além de reduzirem o uso de recursos fósseis e a emissão de gases poluentes, os biocompósitos se destacam por favorecerem a valorização de resíduos agroindustriais, já que muitas fibras utilizadas como reforço (como o bagaço de cana, a casca de arroz e o farelo de coco) são subprodutos de cadeias agrícolas e agroindustriais (BLEDZKI E GASSAN, 1999). O aproveitamento desses resíduos contribui para a diminuição do volume de descarte sólido e para a geração de renda

em comunidades rurais, promovendo benefícios socioambientais (JOHN e THOMAS, 2008).

Figura 42: Algumas fibras e materiais de biocompósitos.



Fonte: Ciceco. Disponível em:

https://www.ciceco.ua.pt/?tabela=geral_article&menu=255&language=pt&id_article=420

Acesso em: 09 nov. 2025

1.4.4 Análise econômica do biocompósito

Os biocompósitos apresentam propriedades econômicas favoráveis que os tornam alternativas viáveis em relação aos materiais convencionais, especialmente devido ao baixo custo das fibras naturais utilizadas como reforço e à disponibilidade abundante de matérias-primas renováveis (BLEDZKI E GASSAN, 1999). Ainda de acordo com os autores, essas fibras, muitas vezes oriundas de resíduos agrícolas como bagaço de cana, casca de arroz e fibra de coco, possuem custo significativamente inferior ao das fibras sintéticas, como vidro ou carbono, o que reduz o preço final do compósito.

Além disso, o uso de insumos locais diminui os custos logísticos e favorece o desenvolvimento econômico regional, principalmente em países com forte produção agroindustrial (JOSHI et al., 2004). Outro aspecto relevante é que o processo de fabricação dos biocompósitos requer menor consumo energético e equipamentos menos onerosos, resultando em redução dos custos de produção (KORONIS, SILVA e FONTUL, 2013). O crescente interesse de indústrias automotivas, de embalagens e de construção civil por materiais sustentáveis tem ampliado o potencial de mercado e o valor econômico agregado dos biocompósitos, tornando-os importantes aliados na transição para uma economia mais verde e circular (FARUK et al., 2012).

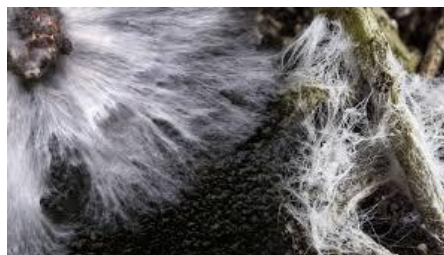
Além do custo reduzido das matérias-primas e da energia envolvida no processamento, os biocompósitos apresentam vantagens econômicas indiretas, como a geração de emprego e renda em áreas rurais e o estímulo a cadeias produtivas locais sustentáveis, uma vez que o cultivo e o beneficiamento das fibras naturais envolvem atividades agrícolas e industriais de baixo investimento inicial (JOHN E THOMAS, 2008).

1.5 Menção ao micélio de fungo

Outro material considerado sustentável e que apresenta um certo grau de resistência, além de ser possível de ser moldado para a concepção de embalagens e produtos, encontrado durante a pesquisa, é o micélio de fungo. Entretanto, apesar de já existir aplicações comerciais iniciais, trata-se de um material ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, carecendo de informações suficientes para análise na utilização das tampas da embalagem de cimento. Ainda sim, para conhecimento e por se tratar de um insumo com características da mesma classe dos que foram selecionados, o material terá seu conceito apresentado.

O micélio de fungo é a estrutura vegetativa dos fungos, composta por uma rede de filamentos denominados hifas, que crescem formando uma matriz tridimensional densa e coesa (JONES et al., 2020). Essa estrutura apresenta propriedades naturais de adesão, leveza e resistência, permitindo sua utilização como um biomaterial sustentável em diferentes aplicações. Ainda de acordo com Jones et al. (2020), o micélio tem sido amplamente estudado por sua capacidade de colonizar substratos orgânicos (como resíduos agrícolas, serragem e fibras vegetais), transformando-os em materiais compósitos biodegradáveis.

Figura 43: Micélio de fungo em ambiente.

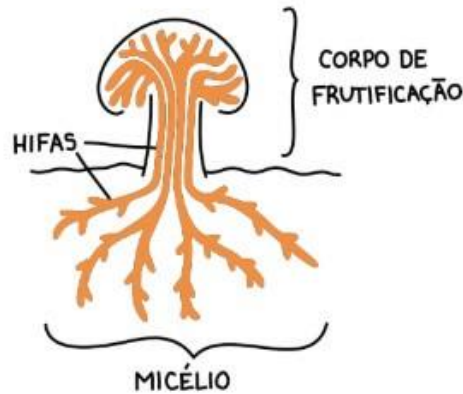


Fonte: A nova floresta. Disponível em:

<https://anovafloresta.com/os-fungos-a-rede-do-solo/>

Acesso em: 10 nov. 2025

Figura 44: Ilustração explicando o micélio de fungo.



Fonte: Resumos para o ENEM. Disponível em:

<https://resumos.mesalva.com/introducao-fungos/>

Acesso em: 10 nov. 2025

Appels et al. (2019) destacam que, ao controlar as condições de crescimento, é possível moldar o micélio em diferentes formatos e densidades, resultando em produtos de desempenho variado, que podem substituir polímeros sintéticos convencionais. De acordo com Islam et al. (2018), o material vem sendo aplicado principalmente na produção de embalagens ecológicas, isolantes térmicos e acústicos, revestimentos e alternativas ao couro animal, além de apresentar potencial para o uso em componentes estruturais leves e design sustentável. As figuras 45 e 46 exemplificam um tipo de uso do material como embalagem. Dessa forma, o micélio de fungo representa uma alternativa promissora e de baixo impacto ambiental, alinhada aos princípios da bioeconomia e da economia circular, embora ainda esteja em fase de desenvolvimento tecnológico e otimização de propriedades.

Figura 45: Embalagem de bebida feita de micélio de fungo.



Fonte: Stylo Urbano. Disponível em:

<https://www.stylourbano.com.br/embalagens-compostaveis-feitas-de-micelio-e-canhamo-podem-substituir-o-isopor/>

Acesso em: 10 nov. 2025

Figura 46: Embalagem de micélio de fungo.



Fonte: Vegan Business. Disponível em:

<https://veganbusiness.com.br/embalagem-de-micelio-2/>

Acesso em: 10 nov. 2025

Considerando os requisitos e as características obrigatórias para o material que será utilizado para a fabricação das tampas da embalagem de cimento desenvolvida, como por exemplo, a capacidade de suportar peso, tendo em vista os 12,5 kg e 25 kg que cada modelo de pacote possui, levando em consideração que, muito mais que somente uma tampa para vedação, o artefato produzido também desempenha o papel de alça para manuseio, transporte e mensuração do produto, os materiais sustentáveis analisados que foram selecionados durante a pesquisa bibliográfica e documental, foram esses: polpa moldada, plástico reciclado, bioplástico e biocompósito.

CAPÍTULO 2: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MATERIAIS

A seleção dos materiais para fabricação das tampas da embalagem de cimento levou em conta, além da capacidade de ser moldado, os seguintes requisitos: insumo classificado como sustentável ambientalmente, ser resistente (devido ao peso da embalagem de cimento) e por fim, apresentar um baixo custo de produção. O objetivo deste capítulo é dar continuidade na análise, dessa vez filtrando as informações coletadas, acrescentando novas que sejam pertinentes e realizando a escolha do material mais apropriado ao produto, levando em conta os requisitos baseados na sustentabilidade. Dessa forma, para fins de comparação, será apresentado, dados quantitativos e numéricos para mensurar os requisitos utilizados em cada material selecionado.

2.1 Resistência

A resistência de um material pode ser compreendida como a sua capacidade de suportar esforços ou tensões aplicadas sem sofrer deformações permanentes ou rupturas (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). De acordo com os autores, tal fator está diretamente relacionado à tensão máxima que um material pode suportar antes de falhar, sendo um dos principais parâmetros mecânicos para avaliação de desempenho estrutural. Ashby e Jones (2012) destacam ainda que, a resistência depende da natureza do material, de sua microestrutura e das condições de carregamento, podendo ser classificada em resistência à tração, compressão, flexão e cisalhamento. Assim, a resistência traduz o comportamento do material diante de esforços, sendo um dos critérios centrais na seleção de materiais para aplicações industriais e estruturais.

Em termos gerais, Callister e Rethwisch (2020) destacam que a resistência à tração costuma ser considerada a propriedade mais importante e representativa para definir a resistência de um material, especialmente quando se trata de metais, polímeros, compósitos e cerâmicas estruturais. Isso ocorre porque o ensaio de tração permite avaliar diversos parâmetros fundamentais, como o módulo de elasticidade, o limite de escoamento, o limite de resistência e a deformação na ruptura, fornecendo uma visão ampla do comportamento mecânico global do material (CALLISTER & RETHWISCH, 2020). Assim sendo, utilizando-se de pesquisa bibliográfica e técnica, para cada insumo indicado, será apresentado dados quantitativos em relação a sua resistência mecânica e estrutural, para que seja possível a comparação entre os materiais selecionados.

2.1.1 Resistência da polpa moldada

Conforme observado na análise bibliográfica em relação às propriedades físicas, a resistência mecânica da polpa moldada é fortemente influenciada pela densidade, tipo de fibra e grau de refino das fibras celulósicas empregadas. Estudos demonstram que a resistência à tração desses materiais pode variar entre 5 e 47 Megapascal (MPa), dependendo da compactação e da adição de agentes de ligação (JACOBSON et al., 2016; GURAV et al., 2020). O módulo de elasticidade situa-se geralmente entre 0,5 e 3 Gigapascal (GPa), indicando rigidez inferior à de polímeros

convencionais, porém adequada para aplicações de embalagem (GURAV et al., 2020).

Análise com produtos de polpa moldada híbrida, compostos de fibras de cana-de-açúcar e bambu, observou-se resistência à tração média de 35,0 MPa e módulo de Young (elasticidade) de aproximadamente 3,25 GPa, valores superiores aos do poliestireno expandido (PS), que apresentou apenas 15,6 MPa (LIU et al., 2020). Revisões indicam que polpas de papel kraft não refinadas têm resistências à tração em torno de 5 MPa, podendo atingir 37 a 47 MPa após processos de refino e densificação (JACOBSON, 2016 apud DISLAIRE et al., 2021). Dislaire et al. (2021) também verificaram que papéis moldados com fibras termomecânicas alcançaram 49,3 MPa de tração e módulo de 1,2 GPa, demonstrando que, embora variável, a polpa moldada pode atingir desempenho próximo ao de polímeros leves, especialmente em produtos de alta densidade.

2.1.2 Resistência do plástico reciclado

Os plásticos reciclados, como o polietileno de alta densidade (HDPE) e o politereftalato de etileno (rPET), que tiveram suas características físicas analisadas no capítulo anterior, apresentam propriedades mecânicas reduzidas em comparação aos polímeros virgens devido à degradação térmica e à oxidação durante os ciclos de reprocessamento (ÁVILA et al., 2015). A resistência à tração típica varia entre 20 e 55 MPa, enquanto o módulo de Young situa-se entre 2 e 4 GPa, dependendo da origem e do grau de contaminação do material (MÁRQUEZ et al., 2021).

Mesmo com essa perda de desempenho, o plástico reciclado mantém níveis de resistência semelhantes aos de polímeros comerciais de uso geral, sendo adequado para aplicações estruturais leves, como embalagens e peças técnicas de baixa sollicitação mecânica (ÁVILA et al., 2015; MÁRQUEZ et al., 2021). Amostras de PET submetidas à moldagem por extrusão apresentaram resistência à tração média de 51,4 MPa e módulo de elasticidade de 3,63 GPa, valores próximos aos de polímeros virgens (YILMAZ et al., 2023). Testes de compressão com PET puro mostraram resistência de 52,0 MPa, confirmando bom desempenho estrutural mesmo sem aditivos (VAVRIK et al., 2023).

2.1.3 Resistência do bioplástico (PLA como referência)

Utilizando o poliácido láctico (PLA) como referência, um dos bioplásticos mais estudados, tal material apresenta resistência à tração média entre 40 e 70 MPa e módulo de elasticidade de 2,5 a 4 GPa, valores comparáveis ou superiores aos de polímeros petroquímicos como o polietileno tereftalato (rPET) (FARAH; ANDERSON; LAIRD, 2016). Segundo Henton et al. (2021), o PLA cristalino pode alcançar resistências próximas a 75 MPa, enquanto formulações amorfas permanecem em torno de 50 MPa, demonstrando boa rigidez, porém menor tenacidade.

Apesar de sua fragilidade e baixa resistência ao impacto, o bioplástico PLA se destaca por seu elevado desempenho em tração e flexão, sendo apropriado para embalagens rígidas, utensílios e componentes biodegradáveis, consolidando-se como um dos biopolímeros mais robustos disponíveis comercialmente (FARAH; ANDERSON; LAIRD, 2016). Estudos com PLA puro mostram resistências próximas de 51,8 MPa e módulos em torno de 2,3 GPa, reforçando sua adequação para embalagens rígidas e peças de engenharia de baixa solicitação (LI et al., 2024).

2.1.4 Resistência do biocompósito (PLA + fibras naturais)

Como analisado no capítulo anterior, os biocompósitos são resultantes da combinação de uma matriz biopolimérica (como o PLA) com fibras vegetais (como sisal, linho, cânhamo, etc), além disso apresentam desempenho mecânico superior ao da matriz pura. A resistência à tração do PLA aumentou de 60 MPa para até 75 MPa com adição de 30% de fibras de sisal, enquanto o módulo de elasticidade passou de 3 GPa para valores próximos de 6 GPa, refletindo o reforço estrutural proporcionado pela fase fibrosa (SAMOUH, 2019; CHAITANYA e SINGH, 2018). Os autores ainda mostram que biocompósitos com fibras de coco e sisal atingiram resistências de até 75,36 MPa, revelando que esses materiais podem igualar ou superar compósitos sintéticos como polipropileno (PP) reforçado.

De acordo com Mohanty, Misra e Drzal (2005), os biocompósitos podem atingir resistências superiores a 100 MPa quando otimizados com tratamento superficial das fibras e compatibilizantes, tornando-se uma alternativa competitiva aos compósitos sintéticos convencionais, com a vantagem de serem renováveis e biodegradáveis. Dessa forma, de acordo com os autores, os biocompósitos de PLA e fibras naturais demonstram resistência média de tração entre 60 e 80 MPa e módulos de Young de

5 a 8 GPa, representando uma solução sustentável com alta rigidez e desempenho estrutural competitivo.

2.2 Sustentabilidade ambiental

A sustentabilidade é definida como um princípio que busca equilibrar o desenvolvimento econômico, a preservação ambiental e o bem-estar social, garantindo que as necessidades do presente sejam atendidas sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprirem suas próprias necessidades (WCED, 1987). Nesse sentido, autores como Elkington (1998) destacam o conceito de *triple bottom line* ou resultado triplo, que estabelece a interdependência entre os pilares ambiental, social e econômico como base para práticas sustentáveis.

Segundo nessa linha, um material é considerado sustentável quando apresenta baixo impacto ambiental ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até o descarte ou reciclagem, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e a redução de emissões poluentes (ASHBY; JOHNSON, 2013). Ainda segundo Manzini e Vezzoli (2002), materiais sustentáveis são aqueles cuja produção e utilização demandam menor consumo de energia e geram menor quantidade de resíduos, possibilitando ainda a reutilização, a reciclagem ou a biodegradação ao final de sua vida útil. Dessa maneira, utilizando-se de pesquisa bibliográfica e técnica, para cada insumo escolhido, será apresentado dados quantitativos em relação a critérios sustentáveis, para que seja possível a comparação entre os materiais selecionados.

2.2.1 Critérios sustentáveis da polpa moldada

Além da análise ambiental realizada, é importante destacar que a produção de embalagens de polpa moldada apresenta desempenho ambiental superior em comparação a materiais poliméricos convencionais: estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) demonstram emissões médias de 0,6 a 0,8 CO₂ por quilograma de produto, em contraste com 3,5 a 4,5 CO₂/kg observados em poliestireno expandido (EPS), representando uma redução de até 80% nas emissões de gases de efeito estufa (EEA, 2023). Além disso, o consumo de energia primária na produção da polpa moldada situa-se em torno de 201 MJ/kg, valor significativamente inferior ao dos polímeros sintéticos (MYHRE; SMITH, 2023). Estudos complementares indicam ainda

que o consumo de água e energia elétrica pode ser 40% a 50% menor em comparação a materiais plásticos convencionais, especialmente quando se utiliza fibra reciclada ou certificada (HÉBERT; DUFRESNE, 2022).

2.2.2 Critérios sustentáveis do plástico reciclado

Os plásticos reciclados, em especial o polietileno tereftalato reciclado (rPET), apresentam ganhos quantitativos expressivos em sustentabilidade. Estudos de ACV conduzidos na Europa indicam uma pegada de carbono média de 0,45 CO₂ /kg de rPET, comparada a 2,15 CO₂ /kg para PET virgem, resultando em uma redução de aproximadamente 79% das emissões (PAPONG et al., 2020).

Outras análises estimam emissões entre 0,68 e 0,93 CO₂ /kg, dependendo da eficiência do processo de reciclagem (PLASTICS EUROPE, 2021). Além disso, a demanda cumulativa de energia para produção do rPET é cerca de 52% inferior à observada no PET virgem, demonstrando economia significativa de recursos fósseis (BROCKHAUS; FISCHER; GRIES, 2021).

2.2.3 Critérios sustentáveis do bioplástico (PLA)

A análise quantitativa dos bioplásticos, especialmente do ácido polilático (PLA), revela vantagens e limitações conforme o estágio do ciclo de vida. Estudos de ACV relatam que a produção de 1 kg de PLA requer, em média, 46 MJ de energia não renovável, enquanto a emissão total de gases de efeito estufa situa-se entre 1,3 e 1,8 CO₂ /kg (VINK; DAVIES, 2020). No entanto, durante a degradação anaeróbica em aterros, as emissões podem aumentar de 16% a 163%, dependendo das condições ambientais e da taxa de biodegradação (GIRONI; PIEMONTE, 2011). Em contrapartida, quando o descarte ocorre por compostagem industrial, a recuperação energética e o ciclo fechado do carbono biogênico permitem reduções significativas na pegada global (MADIVAL et al., 2021).

2.2.4 Critérios sustentáveis do biocompósito

Os biocompósitos, constituídos por matriz polimérica como base e fibras naturais, apresentam ganhos ambientais relevantes. Um estudo comparativo mostrou que um compósito de fibras de linho com PLA possui uma pegada de carbono de 1,19

kg CO₂ /kg, enquanto um compósito convencional de poliamida 66 com fibra de vidro apresenta 9,14 kg CO₂ /kg, o que representa uma redução de quase 87% das emissões (JOSHI et al., 2020). Outro trabalho, com bagaço de cana, verificou reduções em aquecimento global, escassez de recursos fósseis e acidificação, com emissões totais variando entre 1,0 e 3,0 CO₂ /kg, a depender da matriz e proporção de reforço (SHEN; PATEL, 2019).

2.3 Custo médio de produção

Outro critério importante para se observar é o custo médio de produção de cada material. Utilizando-se de pesquisa bibliográfica, estudos de caso industriais e anúncios comerciais, será apresentado dados quantitativos em relação ao custo de produção de cada insumo, para que seja possível a comparação entre eles.

Além dessa pesquisa, foi realizado também, orçamentos com algumas empresas locais. Para que obtivesse maior exatidão nas informações e para que houvesse um diálogo direto com o estudo realizado, foi utilizado o próprio modelo das tampas da embalagem de cimento e suas medidas, para a análise de custos de produção. É importante salientar que os valores apresentados são variáveis, conforme tecnologia, material, localização, período, etc.

2.3.1 Custo médio de produção da polpa moldada

A produção de embalagens em polpa moldada costuma apresentar baixos custos unitários em produção em escala de linha (ex.: bandejas para ovos): estudos de caso industriais e anúncios comerciais indicam custos unitários típicos entre R\$0,09 e R\$0,22 por unidade para bandejas (dependendo da capacidade e da região), o que, para uma bandeja de ovos de 100g, equivale aproximadamente de R\$0,90 a R\$2,20 por kg do produto acabado, esses valores incluem matéria-prima (aparas/papelão reciclado), energia e mão de obra com automação média (MARTÍNEZ, 2015; anúncio de equipamento/estudo de caso³, 2024).

Como informado, além da pesquisa bibliográfica e outros mecanismos de busca, foram realizados orçamentos para análise de custo de produção, utilizando o

³ Informação de anúncio comercial/estudo de caso. Publicado pela página da internet MFRURAL, 2024. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/161024/maquina-de-polpa-moldada-bandejas-porta-ovos?srsId=AfmBOoqk78wAMhcqBBZIAAU-JANS>. Acesso em: 13 nov. 2025

próprio desenho das tampas para cálculo de valores. Importante destacar que foi feito o orçamento não apenas da produção das tampas em polpa moldada, como também, da produção dos moldes para elas. A média de valores para produção das tampas, segundo orçamentos realizados, foram as seguintes:

Tampa única: Molde (R\$9.500). Produto (R\$2,75).

Tampa dupla: Molde (R\$14.500). Produto (R\$5,30).

Foi possível de serem realizados orçamentos com duas empresas de produção em polpa moldada e a média de valores entre elas para fabricação das tampas foram esses valores.

2.3.2 Custo médio de produção do plástico reciclado

Para plástico reciclado (rPET), o custo operacional é fortemente influenciado pelo preço da sucata (matéria-prima) e pela eficiência da triagem. No Brasil, preços observados para sucata de PET pós-consumo variam tipicamente entre R\$3,50 e R\$5,50/kg (preço pago a cooperativas/sucateiros, dependendo da localidade e qualidade), e a resina reciclada pós-processamento costuma ser comercializada no mercado entre R\$4,0 e R\$7,0/kg entre 2024 e 2025 (com episódios em que rPET chegou a custar mais que o virgem por escassez), portanto, um custo de produção direto (matéria-prima + operação) pode ficar entre R\$4 e R\$6/kg para plantas de reciclagem mecanizadas de porte médio (dados de mercado e relatórios setoriais, 2024-2025). A relação típica entre reciclado e virgem indicada pela indústria coloca o reciclado na faixa de 70 a 110% do preço do virgem dependendo da oferta/demanda (setor plástico, 2024-2025).

No que se refere a orçamentos realizados em fábricas e locais de produção e reciclagem de plástico, utilizando-se do próprio design das tampas de embalagem de cimento para cálculo, a média de valores para produção, foram os seguintes:

Tampa única: Molde (R\$20.000). Produto (R\$13,50).

Tampa dupla: Molde (R\$30.000). Produto (R\$27,00).

Foi possível de serem realizados orçamentos com três empresas de produção em plástico reciclado e a média de valores entre elas para fabricação das tampas foram esses valores.

2.3.3 Custo médio de produção do bioplástico (estimativa brasileira do PLA)

Um estudo técnico-econômico brasileiro que modelou uma planta integrada (escala de referência: 16.000 t/ano de PLA) calculou os custos anuais e detalhou custos variáveis (R\$69.353.680/ano) e custos fixos (R\$135.080.102/ano) no cenário avaliado; somando custos variáveis + fixos obteve-se um custo de produção agregado de aproximadamente R\$204.433.782/ano, que dividido pela produção (16.000 t = 16.000.000 kg) resulta em um valor próximo de R\$12,78/kg (BARCELLOS; PACHECO, 2021).

Esse valor é para uma planta em escala industrial integrada. Custos em escala menor, importação de resina ou compra de PLA comercial para transformação mostram preços de varejo bem mais altos (ex.: filamento para PLA, custo médio: R\$80 a R\$140/kg), o que confirma que o custo de produção industrial modelado (R\$12,8/kg) é plausível, mas sensível a fatores como preço da matéria-prima, custo de utilidades, etc (BARCELLOS; PACHECO, 2021).

No que se refere a orçamentos realizados em empresas de fabricação de produtos em bioplástico, utilizando-se do próprio modelo das tampas de embalagem de cimento para cálculo, a média de valores para produção, foram os seguintes:

Tampa única: Molde (R\$20.000). Produto (R\$85,00).

Tampa dupla: Molde (R\$30.000). Produto (R\$115,00).

Foi viável de serem realizados orçamentos com duas empresas de produção em bioplástico e a média de valores entre elas para fabricação das tampas foram esses valores.

2.3.4 Custo médio de produção do biocompósito (matriz PLA + fibras naturais)

Os biocompósitos agregam o custo da matriz (PLA) e o custo das fibras naturais e do processamento. Tomando como base custo de produção do PLA aproximadamente R\$12,8/kg (planta de 16.000 t/ano) e considerando fibras naturais industriais (ex.: sisal, cânhamo, juta) com preço de mercado em faixa ampla entre R\$3 e R\$30/kg segundo disponibilidade e qualidade, um biocompósito com 50% de PLA e 50% de fibra natural, teria custo de material bruto aproximado de $(0,5 \times R\$12,8) + (0,5 \times R\$3-30) = R\$7,9-R\$21,4/kg$ apenas em matéria-prima (BARCELLOS e PACHECO, 2021; CONAB, s.d; UTFPR, 2023). Estudos acadêmicos brasileiros e dissertações de caráter experimental destacam que o custo da matriz (PLA) é o componente dominante, sendo a principal barreira econômica frente a compósitos convencionais à base de matriz fóssil (UTFPR, 2023; UFRGS, 2022; GESSI, 2022).

Em relação a orçamentos realizados em empresas de fabricação de produtos em biocompósitos, utilizando-se do próprio desenho das tampas de embalagem de cimento para cálculo, o valores médios para produção, foram os seguintes:

Tampa única: Molde (R\$25.000). Produto (R\$92,00).

Tampa dupla: Molde (R\$35.000). Produto (R\$135,00).

Foi possível de ser realizado apenas um orçamento com empresa de produção em biocompósito e os valores médios informados para fabricação das tampas de embalagem de cimento, de acordo com as medidas, foram esses.

2.4 Análise comparativa e seleção do material

Através de pesquisas bibliográficas, trabalhos acadêmico/científicos, documentos técnicos, estudos de caso, dados de mercado e orçamentos realizados, foi possível reunir informações e média de referências numéricas em relação aos requisitos necessários para a confecção das tampas da embalagem de cimento desenvolvidas. Para cada um dos insumos selecionados - Polpa moldada, Plástico reciclado, Bioplástico e Biocompósito - foi apresentado informações conceituais sobre questões físicas, ambientais e econômicas, além de valores numéricos em relação a resistência mecânica, emissão de poluentes e custo de produção de cada material.

Após a coleta dessas informações, foi construída uma tabela para a organização dos principais dados reunidos, que pode ser visualizado na figuras 47 e também na figura 48, a continuação da tabela. Para a resistência, foi priorizado a tração, tendo em vista que, na engenharia de materiais, a resistência à tração é uma das grandezas fundamentais para avaliar a resistência mecânica de um material, pois representa seu comportamento diante de esforços que tendem a analisá-los até a ruptura e é um dos parâmetros mais utilizados na seleção e projeto de componentes estruturais (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; GERE; GOODNO, 2012), além de ser uma informação adquirida para todos os materiais, tornando-se assim, passível de comparação.

Para questões de sustentabilidade ambiental e meio ambiente, foram priorizadas as informações com relação às emissões de dióxido de carbono na atmosfera no processo de produção, informação adquirida para os quatro insumos selecionados. Além disso, a literatura de Avaliação do Ciclo de Vida enfatiza que a quantificação das emissões de dióxido de carbono é essencial para compreender os impactos ambientais associados à produção de um material ou produto, pois o CO₂ é um dos principais contribuintes para o aquecimento global e permite comparar alternativas produtivas com base em seu desempenho climático (ISO, 2006; IPCC, 2014; GRAEDEL; ALLENBY, 2010).

Por fim, foi apresentado na tabela os custos médios de produção, tanto dos valores para cada quilograma de material (adquiridos em pesquisas documentais), como também, dos valores adquiridos em orçamentos realizados em empresas, tanto para a produção da tampa única, como da tampa dupla, tal como para a fabricação de seus moldes. Vale ressaltar novamente, que grande parte dos valores apresentados se trata de uma média relativa, tendo em vista que depende de diversos fatores, como tipo de matéria-prima, regionalidade, modelo de produção, dentre outros.

Figura 47: Tabela sobre a resistência e a sustentabilidade ambiental dos materiais.

Materiais	Resistência (tração)	Sustent. Ambiental (emissão CO ₂)
Polpa moldada	5 a 47 MPa (m. 26 MPa)	0,6 a 0,8/kg (m. 0,7/kg)
Plástico reciclado	20 a 55 MPa (m. 37,5 MPa)	0,68 a 0,93/kg (m. 0,8/kg)
Bioplástico	40 a 70 MPa (m. 55 MPa)	1,3 a 1,8/kg (m. 1,5/kg)
Biocompósito	60 a 80 MPa (m. 70 MPa)	1,0 a 3,0/kg (m. 2,0/kg)
m. = média / T.U = Tampa única / T.D = Tampa Dupla		

Fonte: O autor

Figura 48: Tabela dos custos de produção de cada material.

Materiais	Custo m. (R\$/kg)	Custo m. Produto (orç.)	Custo m. Molde (orç.)
Polpa moldada	0,09 a 0,22 (m. R\$0,15)	T.U. R\$2,75 / T.D. R\$5,30	T.U. R\$9.5k / T.D. R\$14.5k
Plástico reciclado	4,00 a 6,00 (m. R\$5)	T.U. R\$13,50 / T.D. R\$27	T.U. R\$20k / T.D. R\$30k
Bioplástico	(m. R\$12,80)	T.U. R\$85 / T.D. R\$115	T.U. R\$20k / T.D. R\$30k
Biocompósito	7,9 a 21,4 (m. R\$14,65)	T.U. R\$92 / T.D. R\$ 135	T.U. R\$25k / T.D. R\$35k
m. = média / T.U = Tampa única / T.D = Tampa Dupla			

Fonte: O autor

Obtendo as principais informações de cada material organizadas em tabela, foi utilizada a ferramenta Matriz de decisão (também utilizada no projeto de redesign da embalagem de cimento, para a seleção da melhor alternativa a ser escolhida para seguir em frente no projeto). Trata-se de uma estrutura que auxilia na comparação sistemática de alternativas por meio da definição de critérios, pesos e pontuações, permitindo selecionar a opção mais adequada de forma transparente e racional (PUGH, 1991; SILVA; COSTA, 2016). Assim sendo, trata-se de um método de apoio na decisão e que permite análise de aspectos relevantes.

No caso em questão, foi desenvolvida a matriz de decisão entre os materiais selecionados e os requisitos escolhidos, atribuindo-lhes pesos, que podiam ir de 1 a 5, sendo 5 o de maior relevância e 1 o de menor relevância, conforme a necessidade do projeto em questão. Os valores foram multiplicados com os pesos, somados e obteve-se o resultado final. A matriz pode ser vista na figura 49.

É importante destacar que, comparando com a tabela para organização das informações, os dados de custo de produção por kg de produto foi desconsiderado na matriz de decisão, por representar uma informação redundante, tendo em vista que os orçamentos de valores de fabricação das tampas, satisfatoriamente coincidiram com esses valores adquiridos durante a pesquisa técnica e bibliográfica.

Figura 49: Matriz de decisão para selecionar o material mais adequado.

Requisitos	Peso	Polpa moldada	Plástico reciclado	Bioplástico	Biocompósito
Resistência (tração)	5	2	3	4	5
Sustent. Ambiental (kg/CO ₂)	4	5	5	4	3
Custo do produto	4	5	4	3	2
Custo do molde	4	5	4	4	3
Total		70	67	64	57

Fonte: O autor

Dessa forma, através da utilização da matriz de decisão e da organização das informações coletadas durante a pesquisa, a pontuação total obtida para cada material ficou sendo: Polpa moldada, 70 pontos, Plástico reciclado, 67 pontos, Bioplástico, 64 pontos e Biocompósito, 57 pontos. A polpa moldada adquiriu um maior valor comparativo pelo fato de, embora possua a menor resistência média entre os materiais apresentados, nos outros requisitos apresentou resultados superiores em relação aos demais insumos, sendo considerado o material mais adequado para utilização nas tampas octogonais das embalagens de cimento desenvolvidas.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após identificar os principais materiais sustentáveis aplicados na confecção de embalagens, foi realizada a classificação daqueles que cumpriam critérios importantes para utilização nas tampas octogonais da embalagem de cimento, produzidas no projeto “Redesign da embalagem de cimento”, que inclusive, possuem desenho industrial protegido e Invenção de modelo de utilidade registrada. Dentre os requisitos principais, destaca-se: material rígido e resistente, ecológico, que permita que o usuário manuseie com segurança, além da capacidade de ser utilizado em moldes para a fabricação de produtos.

Os cinco materiais sustentáveis que se mostraram promissores para o projeto, cumprindo os critérios de seleção, foram a polpa moldada, o plástico reciclado, o bioplástico, o biocompósito e o micélio de fungo. Este último, por sua vez, foi desconsiderado, por ainda representar um insumo em estágio inicial de experimentações e estudos, com informações de mercado e de utilização bastante limitadas. Os outros quatro tiveram suas características físicas, ambientais e econômicas conceitualmente analisadas, além das informações numéricas que foram apresentadas. Após isso, através da matriz de decisão, a polpa moldada foi a opção de material mais adequado para utilização nas tampas do produto.

É de fundamental importância destacar que, a diferença de pontuação entre a polpa moldada e o plástico reciclado é diminuta, tendo em vista que a polpa alcançou 70 pontos enquanto o plástico reciclado obteve 67 pontos (a pequena diferença pode ser observada não somente na pontuação final, como também, nas pontuações em cada requisito, isoladamente), o que demonstra que este material, em situações específicas, pode ser perfeitamente utilizado nas tampas da embalagem de cimento em substituição ao insumo selecionado. Sem mencionar que grande parte dos critérios escolhidos, em cada material, possuem valores relativos, definidos de acordo com métodos de produção, região de fabricação, matéria-prima empregada, economia, dentre outros, podendo assim, ocorrer situações em que o plástico reciclado de fato se mostre mais adequado ao produto do que a polpa moldada.

Outra questão importante a ser tratada é o tipo do material a ser utilizado. Como foi apresentado, todos os insumos selecionados possuem uma classificação que os diferenciam, no caso da polpa moldada, através de estudos, foi possível classificar

quatro modelos: Tipo 1 (de parede espessa), 2 (moldados por transferência), 3 (fibra termoformada) e 4 (processada). Para as tampas de embalagem de cimento desenvolvidas, que muito mais que apenas tampas para vedação do produto, trata-se de um artefato utilizado para manuseio e transporte realizado pelo usuário, pelas características expostas, a categoria mais apropriada seria a do tipo 3. Isso porque, trata-se de uma classe de polpa moldada que apresenta elevada resistência, além de possuir superfícies lisas, bem definidas e de alta precisão, possuindo aparência similar ao material plástico.

Como se trata de um produto utilizado para manuseio constante, faz-se necessário que a superfície de contato possua esse tratamento e cuidado especial, para o real conforto do usuário. Vale ressaltar que no caso da polpa moldada do tipo 2, necessitaria de uma análise prática para verificar se também poderia ser adequada para uso nos tampos da embalagem de cimento, tendo em vista que segundo a pesquisa realizada, trata-se de uma classe que além de possuir uma certa resistência, gera peças com superfícies relativamente lisas em uma das faces e bastante lisa na face oposta, com notável definição, podendo, assim como o tipo 3, serem promissoras para utilização nas tampas.

Além do tipo 3, outro modelo que pode ser utilizado nas tampas é o tipo 4, considerando que esse pode ser aplicado em qualquer uma das outras classes de polpa moldada. Produtos do tipo 4 receberam algum tratamento ou processamento secundário, fornecendo uma aparência diferente ou complementar ao processo normal de produção do material. No caso das tampas, pode ser a impressão da identidade visual do cimento, corte e vinco para o adequado manuseio, utilização de corantes especiais para um distinto aspecto visual, dentre outros.

No caso do plástico reciclado, caso as tampas sejam feitas desse material, os tipos mais apropriados poderiam ser os feitos com a reciclagem do polietileno de alta densidade (HDPE) ou até mesmo, o polipropileno (PP), tipos de polímeros rígidos e com elevada resistência mecânica. Vale lembrar que as propriedades físicas do plástico reciclado, o que inclui a sua resistência, são inferiores às do plástico virgem constituído de petróleo, devido a degradação do polímero e a menor pureza, necessitando de aditivos especiais e reforços químicos para que se obtenha design e propriedades físicas satisfatórias.

É importante destacar que, embora o projeto de pesquisa tenha sido bastante detalhado, abordando critérios físicos, ambientais e econômicos de cada material e

fazendo-se uso de método comparativo justo para a seleção do insumo mais adequado na aplicação das tampas da nova embalagem de cimento produzida, deve-se considerar que, para uma análise completa e uma conclusão efetiva, é perfeitamente aceitável que deve ser realizado testes e experimentos com o material selecionado e também com os demais, caso seja necessário, aplicados em formato e tamanho real ao das tampas (tanto a versão única quanto a versão dupla), especialmente para análise de resistência e adequação ao produto.

Apesar que o projeto de pesquisa apresentado não tenha realizado esse estágio final de análise (produção das tampas com o material selecionado), o mesmo detalhou questões importantes da polpa moldada que no estudo anterior, de “redesign da embalagem de cimento” não abordou, como os tipos de polpa moldada existentes, questões importantes acerca da sustentabilidade ambiental do insumo, resistência física, além de orçamentos e investigação acerca do custo para produção do material. Além disso, a proposta de pesquisa analisou outros materiais sustentáveis juntamente com a polpa moldada, oferecendo assim, um relatório completo com diversas opções para testes tanto na utilização das tampas do pacote de cimento, quanto em outros produtos e embalagens da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil – Perfil ABIPLAST 2023**. São Paulo: ABIPLAST, 2024. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2024/09/PERFIL_ABIPLAST_2023.pdf. Acesso em: 17 nov. 2025.

ABIPLAST. **Índices de Reciclagem Mecânica de Plásticos Pós-Consumo no Brasil – Relatório 2024 (Ano-base 2023)**. São Paulo: ABIPLAST, 15 out. 2024. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/indices-de-reciclagem-mecanica-de-plasticos-pos-consumo-no-brasil/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

ABIPLAST; PICPLAST. **Índices de reciclagem 2023: relatório setorial da indústria do plástico**. São Paulo: ABIPLAST/PICPlast, 2024. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2024/10/Indices_Reciclagem2023_PICPlast2024-Divulgacao_-2.pdf. Acesso em: 17 nov. 2025.

ABULLAH, M. Z.; CHE ASLAN, N. H. **Performance evaluation of composite from recycled polypropylene reinforced with Mengkuang leaf fiber**. *Resources*, v. 8, n. 2, p. 97, 2019. DOI:10.3390/resources8020097.

Agência Brasil. **Produção de plástico reciclado no Brasil cresceu 8% em 2024; faturamento do setor reciclador foi de R\$4 bilhões**. 29 set. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-09/producao-de-plastico-reciclado-no-brasil-cresceu-8-em-2024>. Acesso em: 17 nov. 2025.

ALMEIDA, Amanda Aparecida de; BORGES, Anamable Reque; PAULA, Fernanda Batista de; MARQUES, Geovana Oliveira; LOPES, Karen Felix; BEGNINI, Mauro Luiz. **Produção de bioplástico feito a partir de resíduos orgânicos**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 12471–12478, mar. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n3-201.

AL-SALEM, S. M.; LEBERT, A.; BOURKE, G.; LADHARI, N. **Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review**. *Waste Management*, v. 68, p. 367–390, 2017.

APPELS, F. V. W. et al. **Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites**. *Materials & Design*, v. 161, p. 64–71, 2019.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design**. 4th ed. Oxford: Elsevier, 2012.

ASHORI, Alireza. **Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries.** *Bioresource Technology*, v. 99, n. 11, p. 4661–4667, 2008.

AVÉROUS, L.; POLLET, E. **Environmental Silicate Nano-Biocomposites.** Springer, Londres, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4471-4108-2.

ÁVILA, A. F.; ROMANO, C. A. **Biopolímeros: conceitos e aplicações.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 25, n. 1, p. 9–20, 2015.

BARCELLOS, Renato Malbar Musiello; PACHECO, André Luiz Teixeira de Araújo. **Estudo de viabilidade técnica e econômica da produção de poliácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar de forma integrada à indústria açucareira.** 124 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 07 jun. 2021.

BILLERUDKORSNÄS. **Sack Solutions: Handbook for Sack Kraft Papers and Paper Sacks.** Solna: BillerudKorsnäs, 2015. 61 p. Disponível em: [arquivo fornecido pelo usuário]. Acesso em: 10 julho. 2025.

BASNIAK, Maria Ivete; LIZIERO, André Rafael. **A impressora 3D e novas perspectivas para o ensino: possibilidades permeadas pelo uso de materiais concretos.** *Revista Observatório*, Palmas, v. 3, n. 4, p. 445–466, jul./set. 2017. DOI: 10.20873/uft.2447-4266.2017v3n4p445.

BEDOR, P. B. A. et al. **Advances and perspectives in the use of polymers in the environmental area: a specific case of PBS in bioremediation.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 30, n. 2, 2020.

BEZERAJ, E. et al. **“State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling.”** *Sustainable Materials & Technologies*, 2025.

BIORESOURCES. **Molded pulp products for sustainable packaging: production rate, challenges and product opportunities.** 2022.

BLEDZKI, Andrzej K.; GASSAN, Jochen. **Composites reinforced with cellulose based fibres.** *Progress in Polymer Science*, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999.

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Anuário estatístico 2004/2005.** São Paulo, 2005.

BRASKEM. **Polietileno Verde I'm green: inovação e sustentabilidade.** 2023. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/imgreen>

BROCKHAUS, S.; FISCHER, D.; GRIES, N. **Comparative Life Cycle Assessment of Virgin and Recycled PET Bottles.** *Journal of Cleaner Production*, v. 319, p. 128–146, 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 9. ed. New York: Wiley, 2018.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

CARUS, M.; DAMMER, L. **The Circular Economy and Bioeconomy — Partners or Competitors?**. Nova-Institute, 2018.

CHAITANYA, S.; SINGH, I. *Sisal fiber-reinforced green composites: Effect of ecofriendly fiber treatment*. *Polymer Composites*, v. 39, n. 12, p. 4310–4321, 2018.

CHRISTWARDANA, M.; ISMOJO, I.; MARSUDI, S. **Physical, Thermal Stability, and Mechanical Characteristics of New Bioplastic Elastomer from Blends Cassava and Tannia Starches as Green Material**. *Molekul*, v. 16, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doaj.org/article/c6c06a0ca12c433eae1d2f2cc5dc0a41>

COMERCIAL JUTA. **Comercialização de fibras naturais - página institucional (catálogo / informações de produto)**. Disponível em: <https://comercialjuta.com.br/>.

COMISSÃO EUROPEIA — European Commission. **Biobased, biodegradable and compostable plastics**. s.d. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PLASTIC WASTE MANAGEMENT OPTIONS SUSTAINABILITY PROFILES. **PMC – Public Library of Science**, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12349220/>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Histórico mensal - Sisal: preços e indicadores**. s.d.

COSTA, Helson Moreira da; RAMOS, Valéria Dutra; ANDRADE, Mônica Calixto de; NUNES, Paola da Silva Richter Quintana. **Análise térmica e propriedades mecânicas de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD)**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 26, n. esp., p. 75–81, 2016. DOI: 10.1590/0104-1428.2104.

DEBNATH, M.; SARDER, R.; PAL, L.; HUBBE, M. A. **Molded pulp packaging review**. *BioResources*, v. 17, n. 2, p. 3810-3870, 2022.

DELVA, Laurens; VAN KETS, Karen; KUZMANOVIĆ, Maja; DEMETS, Ruben; HUBO, Sara; MYS, Nicolas; DE MEESTER, Steven; RAGAERT, Kim. **Mechanical recycling of polymers for dummies**. Ghent: Centre for Polymer & Material Technologies, 2019.

DI BARTOLO, A.; INFURNA, G.; DINTCHEVA, N. T. **A Review of Bioplastics and Their Adoption in the Circular Economy**. *Polymers*, v. 13, n. 8, art. 1229, 2021.

DISLAIRE, C.; SEANTIER, B.; MUZY, M.; GROHENS, Y. **Mechanical and Hygroscopic Properties of Molded Pulp Products Using Different Wood-Based Cellulose Fibers**. *Polymers*, v. 13, n. 19, art. 3225, 2021.

DITTENBER, David B.; GANGARAO, Hota V. S. **Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure.** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 43, n. 8, p. 1419–1429, 2012.

DUARTE, G.; PELLERIN, M.; JÚNIOR, J.; SANTOS, A.; RIELLA, H.; FIORI, M. **Mechanical properties of recycled compounds of polypropylene for building products.** *Journal of Materials Science Research*, v. 12, n. 3, 2023.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). **Environmental Impacts of Packaging Materials: Comparative Analysis of Plastic and Fiber-Based Options.** Copenhagen: EEA, 2023.

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business.** Oxford: Capstone Publishing, 1998.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The circular economy in detail.** Cowes, UK: EMF, 2020.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics market.** Berlin: European Bioplastics Association, 2024. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org>.

EUAX CONSULTING. **Duplo Diamante: entenda o que é o método e aprenda a desmistificar o design thinking.** São Paulo, 2020. Disponível em: . Acesso em: 02 Set. 2025.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LAIRD, E. D. **Physical and mechanical properties of polylactic acid (PLA) and its blends.** *Advances in Drug Delivery Reviews*, v. 107, p. 367–392, 2016.

FARUK, Omar et al. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.** *Progress in Polymer Science*, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FUTURE MARKET INSIGHTS. **Molded Pulp Packaging Market Size and Share Forecast Outlook 2025 to 2035.** 2025.

GESSI, Livia Carolina (ou Gessi, L. C.). **Desenvolvimento de biocompósitos poliméricos de PLA e lignina obtida a partir da serragem e do bagaço da cana-de-açúcar.** Dissertação / Trabalho acadêmico - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/255807>.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. **Mechanics of Materials.** 8. ed. Boston: Cengage Learning, 2012.

GEYER, Roland; LORINCZ, Gwen; AUER, Andre. **Production, use, and fate of all plastics ever made.** *Science Advances*, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

GIRONI, F.; PIEMONTE, V. **Environmental assessment of polylactide (PLA) production.** *Journal of Cleaner Production*, v. 19, p. 1483–1494, 2011.

GRAEDEL, T.; ALLENBY, B. **Industrial Ecology and Sustainable Engineering**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

GRAND VIEW RESEARCH. **Molded Pulp Packaging Market Size & Share Report**. 2024.

GREEN CHEMISTRY. **Fundamental, technical and environmental overviews of plastic chemical recycling**. *Green Chemistry*, v. 26, p. 11444-11467, 2024.

GURAV, S. P. et al. **Mechanical and physical characterization of molded pulp packaging materials**. *Cellulose*, v. 27, n. 5, p. 2545–2558, 2020.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Túlio. **Concreto de cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2005. v. 1, p. 907–947.

HÉBERT, C.; DUFRESNE, A. **Life cycle analysis of molded pulp packaging using recycled fibers**. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 32, p. e00471, 2022.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. **Plastics recycling: challenges and opportunities**. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 2009.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014.

ISLAM, M. R. et al. **Mycelium-based bio-composites for sustainable construction material: A review**. *Journal of Bionanoscience*, v. 12, n. 1, p. 1–10, 2018.

ISO. **ISO 14040:2006 – Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

JACOBSON, J. A.; TAN, L. T.; YANG, D. **Molded pulp products for sustainable packaging applications**. *BioResources*, v. 11, n. 2, p. 3446–3460, 2016.

JIANG, Xiaoli; BATEER, Buhe. **A review of methods and data on the recycling of plastics**. *Materials*, v. 10, n. 4, p. 148, 2025.

JOHN, M. J.; THOMAS, Sabu. **Biofibres and biocomposites**. *Carbohydrate Polymers*, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.

JONES, M. et al. **Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics**. *Journal of Bionic Engineering*, v. 17, p. 665–691, 2020.

JOSEPH, K. et al. **Natural fiber reinforced composites: A review on material, processing and properties.** *Journal of Natural Fibers*, v. 17, n. 9, p. 1181–1202, 2020.

JOSEPH, Kuruvilla et al. **Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Composites.** In: MOHANTY, Amar K.; MISRA, Manjusri; DRZAL, Lawrence T. (org.). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Boca Raton: CRC Press, 2009. p. 522–553.

JOSHI, S. V. et al. **Environmental life cycle assessment of flax fiber reinforced PLA composites.** *Composites Part B: Engineering*, v. 200, p. 108316, 2020.

JOSHI, S. V. et al. **Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?.** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 35, n. 3, p. 371–376, 2004.

KALIA, S. et al. **Natural fiber reinforced composites: Processing, properties and applications.** *Journal of Polymer Engineering*, v. 31, n. 5, p. 325–342, 2011.

KHALIL, H. P. S. A. et al. **A review on cellulose-based nanocomposites for packaging applications.** *Cellulose*, v. 23, p. 2379–2395, 2016.

KORONIS, Georgios; SILVA, Athanasios; FONTUL, Mihail. **Green composites: A review of adequate materials for automotive applications.** *Composites Part B: Engineering*, v. 44, n. 1, p. 120–127, 2013.

LI, x. et al. **Mechanical characterization of neat PLA and PLA-based blends.** *Polymers*, v. 16, n. 13, p. 1868, 2024.

LIAN INDUSTRIAL. **Advantages of Molded Pulp Packaging for Export Goods.** 2024.

LIU, Y. et al. **Biodegradable, hygienic, and compostable molded pulp materials from bamboo and sugarcane fibers.** *Green Chemistry*, v. 22, p. 6873–6884, 2020.

MADIVAL, S. et al. **Life cycle assessment of biopolymers—Comparative analysis of PLA and PET bottles.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 170, p. 105–117, 2021.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **Desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais.** São Paulo: Edusp, 2002.

MÁRQUEZ, R. A. et al. **Mechanical performance of recycled HDPE and PET blends for packaging applications.** *Polymer Testing*, v. 94, p. 107012, 2021.

MARTÍNEZ, J. **Análise de custos na produção de embalagens em polpa moldada.** *Revista de Tecnologia de Embalagem*, v. 20, n. 3, p. 45–58, 2015.

MARTÍNEZ, Karim Yaneth Pérez. **Planejamento da produção na indústria de embalagens em polpa moldada.** 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Sorocaba, 2013.

MATERIALS HORIZONS. **Recent development of end-of-life strategies for plastic in industry and academia: bridging their gap for future deployment.** *Materials Horizons*, 2023. DOI:10.1039/D2MH01549H.

MERCADO MINEIRO. **Pesquisa de preços de recicláveis: lata de alumínio, PET e papel.** 2024. Disponível em: <https://www.mercadomineiro.com.br/pesquisa/lata-aluminio-pet-papel-pesquisa-precos>. Acesso em: 17 nov. 2025.

MDPI. **Biodegradability of Bioplastics in Managed and Unmanaged Environments: A Comprehensive Review.** *Materials*, v. 18, n. 10, 2024.

MOHAN, T.; KHAN, A. **Advances in bio-based polymer composites: Processing and characterization.** *Polymer Composites*, v. 42, n. 6, p. 2345–2360, 2021.

MOHANTY, Amar K.; MISRA, Manjusri; DRZAL, Lawrence T. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites.** Boca Raton: CRC Press, 2005.

MORDOR INTELLIGENCE. **Molded Pulp Packaging Market Size, Growth, Share & Trends Report 2030.** 2025.

MOURAD, Anna Lúcia; VILELA, Gustavo Braz. **Embalagens de polpa moldada.** *Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens (ITAL)*, Campinas, v. 18, n. 1, p. 1–5, jan./mar. 2006.

MUKHERJEE, A.; KAO, W.-J. **Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review.** *RSC Advances*, v. 11, n. 23, p. 14104–14128, 2021. DOI:10.1039/D1RA02390J.

MYHRE, M.; SMITH, R. **Energy and resource analysis of molded pulp and EPS packaging.** *Journal of Packaging Technology*, v. 14, n. 3, p. 212–225, 2023.

NAFIU, S. A. et al. **Waste plastic management: Recycling and the Waste Manag.** 2024.

NÈVE, Nicolas; MACKRÉ-DELANNOY, Xavier; FAYOLLE, Bruno; GERVAIS, Matthieu; POMPIDOU, Stéphane; CHARBUILLET, Carole; SOLLOGOUB, Cyrille; PERRY, Nicolas. **A Review of Methods and Data on the Recycling of Plastics from the European Waste Stream of Electric and Electronic Equipment.** *Recycling*, v. 10, n. 4, p. 148, 2025. DOI: 10.3390/recycling10040148.

NASER, A. Z. et al. **A Review on Biodegradation of Polylactic Acid (PLA) and Its Composites.** *Processes*, v. 9, n. 2, 2021.

NAVIA PORRAS, D. P.; BEJARANO ARANA, N. **Evaluation of Physical Properties of Thermopressing Bioplastics Made from Cassava Flour.** FAO AGRIS, 2014.

NINGRUM, P. et al. **Characteristics of Bioplastics Based on Chitosan and Kraft Lignin Derived from Acacia mangium**. *Journal of Renewable Materials*, v. 13, n. 7, p. 1367–1388, 2025. Disponível em: <https://www.techscience.com/jrm/v13n7/63066>

QUINTERO, Y.; RUIZ FIGUEROA, D.; GIL, H.; ZULETA, A. A. **Physical and mechanical properties of recycled PET composites**. *Stavební obzor – Civil Engineering Journal*, 2019. DOI:10.14311/CEJ.2019.04.0045.

PAPONG, S.; MALAKUL, P.; PAVANICHKUL, T. **Comparative assessment of virgin and recycled PET bottles**. *Environmental Engineering Science*, v. 37, n. 5, p. 402–411, 2020.

PEANTHAM, P. et al. **Life Cycle Assessment of Palm Empty Fruit Bunch Fiber-Molded Punnets**. *SN Applied Sciences*, v. 6, n. 5, art. 335, 2024.

PEREIRA, P. H. F. et al. **Life cycle assessment of bio-based polyethylene derived from sugarcane in Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, v. 316, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128372.

PHILP, J. C.; RITCHIE, R. J.; GUY, K. **Biobased Plastics in a Bioeconomy: Innovation, Investment, and Policy Issues for Bio-Based Plastics**. *Industrial Biotechnology*, v. 9, n. 6, p. 259–271, 2013.

PICKERING, Kim L. et al. **Review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 83, p. 98–112, 2016.

PIEMONTE, V.; GIRONI, F. **Measures of Economic and Environmental Performance of Bioplastics: A Case Study of Biopolyethylene**. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 4, p. 390–398, 2011.

PLÁSTICOS EM REVISTA. **Novos investimentos na reciclagem de PET devem ser anunciados este ano, acena Auri Marcon, da ABIPET**. 2025. Disponível em: <https://plasticosemrevista.com.br/novos-investimentos-na-reciclagem-de-pet-devem-ser-anunciados-este-ano-acena-auri-marcon-da-abipet/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

PLASTICS EUROPE. **Plastics – The Facts 2021: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data**. Brussels: PlasticsEurope, 2021.

PUBMED. **Improving Mechanical Strength and Water Barrier Properties of Pulp Molded Product by Wet-End Added Polyamide Epichlorohydrin/Cationic Starch.**, 2022.

PUBMED. **PHA: the Greenest Plastic So Far: Advancing Microbial Synthesis, Recovery, and Sustainable Applications for Circularity**. PubMed, 2023.

PUGH, S. **Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering**. Wokingham: Addison-Wesley, 1991.

PUTRI, F. A.; RIANJANU, A.; SIPAHUTAR, W. S. **Cellulose Impact on Bioplastic Performance: A Study on Mechanical Strength, Physical Properties, and Degradation of Water Hyacinth and Kepok Banana Peel-derived Materials.** *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, v. 12, n. 2, 2024.

PW CONSULTING (Chemical & Energy Research Center). **Molded Fiber Pulp Primary Packaging Market.** 2024.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. **Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste.** *Waste Management*, v. 69, p. 24–58, 2017.

RECICLASAMPA. **Estação Preço de Fábrica reajusta valores dos recicláveis.** 2024. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/estacao-preco-de-fabrica-reajusta-valores-dos-reciclaveis>. Acesso em: 17 nov. 2025.

REPOSITÓRIO UFBA. Dissertação (Exemplo: compósitos com fibra de sisal) — dissertação consultada no repositório institucional da UFBA. 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/18462/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Final.pdf>.

RIBEIRO, L. S.; SILVA, A. L. N. d.; AMARIO, M.; STOLZ, C. M.; HADDAD, A. N.; BOER, D. T. **Reuse of Steel Residue in Polypropylene Matrices for the Production of Plastic Wood, Aiming at Decarbonization.** *Sustainability*, v. 16, n. 11, p. 4505, 2024. DOI:10.3390/su16114505.

RODRIGUES, Elias da Conceição. **Um modelo constitutivo fenomenológico irreversível para descrição reológica de pastas de cimento.** 2018. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

RSC ADVANCES. **Vegetative and Microbial Proteins for Bioplastics Applications – A Review in the Indian Context.** *RSC Advances*, 2025.

RSC PUBLISHING. **Polybutylene succinate (PBS) and its blends: advances in structure, processing and applications.** *Green Chemistry*, 2025.

SABA, N.; JAWAID, M.; AL-OTHMAN, O. Y. **Recent advances in epoxy-based hybrid composites reinforced with natural fibres: Review.** *Composites Part B: Engineering*, v. 122, p. 150–170, 2017.

SAHEB, D. N.; JOG, J. P. **Natural fiber polymer composites: A review.** *Advances in Polymer Technology*, v. 18, n. 4, p. 351–363, 1999.

SAMOUH, Z. et al. **Mechanical and thermal characterization of sisal fiber reinforced polylactic acid composites.** *Polymers for Advanced Technologies*, v. 30, p. 529–537, 2019.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. **Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos.** *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 7, n. 4, p. 626-647, 2014.

SANTOS, R. G.; FERREIRA, A. D. S.; MELO, L. R. **Reciclagem e propriedades de polímeros pós-consumo no contexto da economia circular.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 31, n. 2, p. 1–11, 2021.

SCAFFARO, R. et al. **Thermoplastic starch and PLA blends with improved interfacial compatibility and enhanced performance.** *Polymer Testing*, v. 82, 2020. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106316.

SCHYNS, Zoë O. G.; SHAVER, Michael P. **Mechanical recycling of packaging plastics: a review.** *Macromolecular Rapid Communications*, v. 42, n. 3, 2021.

SELLITTO, Miguel Afonso; KADEL JR., Nelson; BORCHARDT, Miriam; PEREIRA, Giancarlo Medeiros; DOMINGUES, Jeferson. **Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento.** *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 141–162, jan./mar. 2013.

SEMPLE, K. E. **Moulded pulp fibers for disposable food packaging** (review), 2022.

SENILĂ, L. et al. **Life Cycle Assessment (LCA) of Bioplastics Production from Lignocellulosic Waste (Study Case: PLA and PHB).** *Polymers*, v. 16, 3330, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/23/3330>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SERAFIM, Luísa S.; LEMOS, Paulo C.; REIS, Maria AM. **Produção de bioplásticos por culturas microbianas mistas.** 2003.

SHEN, L.; PATEL, M. K. **Life cycle assessment of natural fiber composites.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 141, p. 93–103, 2019.

SILVA, A. M.; COSTA, H. G. **Matriz de decisão aplicada à seleção de alternativas: uma abordagem multicritério.** *Revista Produção Online*, v. 16, n. 3, p. 1094–1116, 2016.

SIMÕES, R. M. S.; FERREIRA, C. I. A.; PIRES, F.; MARTINS, M.; RAMOS, A.; SOUSA, A. P. M.; PINTO, P. C. R.; JORGE, R. **Recycling performance of softwood and hardwood unbleached kraft pulps for packaging papers.** *TAPPI Journal*, v. 2, p. 73–86, 2023.

SINGH, R.; SHARMA, N. **Development and characterization of biodegradable composites: A review.** *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 2528–2534, 2022.

SIRACUSA, V. **Microbial Degradation of Synthetic Biopolymers Waste.** *Polymers*, v. 11, n. 6, 2019. DOI: 10.3390/polym11061069.

SKINNER, C. **Life cycle assessment of pulp-moulded and thermoformed trays** (exemplo de LCA). 2024.

SONG, J. H. et al. **Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics — discussão sobre condições de compostagem e limites da biodegradabilidade.** 2009.

SPIERLING, S. et al. **Bio-Based Plastics – A Review of Environmental, Social and Economic Impact Assessments.** *Journal of Cleaner Production*, v. 185, p. 476–491, 2018.

USDA / AMS. **Limited Scope Technical Report — Compostable Materials (normas e critérios para rotulagem e requisitos ASTM/EN).** 2025.

THAKUR, Vijay Kumar et al. **Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 2, n. 5, p. 1072–1092, 2014.

TELLES, Mariana Robiati; SARAN, Luciana Maria; TREVISOLLI, Sandra Helena. **Produção, propriedades e aplicações de bioplástico obtido a partir da cana-de-açúcar.** *Ciência & Tecnologia: FATEC-JB, Jaboticabal*, v. 2, n. 1, p. 52–63, 2011. ISSN 2178-9436.

UFRGS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Produção e caracterização de filmes de poli(ácido láctico)** - Trabalho / Dissertação UFRGS (2022/2023). Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/10183/256052/1/001157720.pdf>.

UTFPR — UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (Repositório Institucional). **Seleção de fibras naturais para compósitos - relatório técnico / trabalho acadêmico.** 2023. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/33714/1/selecaofibrasnaturaiscompositos.pdf>

VAVRIK, D. et al. **Compressive strength of recycled PET for structural applications.** *Central European Journal of Engineering*, v. 13, n. 2, p. 145–154, 2023.

VILAPLANA, F.; KARLSSON, S. **Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: a review.** *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 293, n. 4, p. 274–297, 2008.

VINK, E.; DAVIES, S. **Environmental impact of PLA production and disposal: a life cycle perspective.** *Industrial Biotechnology*, v. 16, n. 4, p. 248–257, 2020.

WCED – World Commission on Environment and Development. **Our Common Future.** Oxford: Oxford University Press, 1987.

WENG, Y. et al. **An insight on sources and biodegradation of bioplastics: a review.** *3 Biotech*, v. 13, n. 7, 2023.

YILMAZ, G.; KARAHAN, S.; AYDOGDU, S. **Mechanical and thermal characterization of recycled PET filaments for additive manufacturing.** *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, v. 7, n. 1, p. 65–74, 2023.

ZHANG, Y. **Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics (mini-review)**. ScienceDirect / J. of Bioresources summary., 2022.

ZHONG, H.; et al. **Life-cycle assessment of recycled plastics: environmental benefits and trade-offs**. *Journal of Cleaner Production*, v. 360, p. 132203, 2022.