

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO PEREIRA DA SILVA

**RECICLAGEM AMBIENTAL DE EMBALAGENS CARTONADAS:
MÉTODOS E DESAFIOS NA DESTINAÇÃO SUSTENTÁVEL**

MEDIANEIRA

2024

RODRIGO PEREIRA DA SILVA

**RECICLAGEM AMBIENTAL DE EMBALAGENS CARTONADAS:
MÉTODOS E DESAFIOS NA DESTINAÇÃO SUSTENTÁVEL**

**ENVIRONMENTAL RECYCLING OF CARDBOARD PACKAGING:
METHODS AND CHALLENGES IN SUSTAINABLE DESTINATION**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RODRIGO PEREIRA DA SILVA

**RECICLAGEM AMBIENTAL DE EMBALAGENS CARTONADAS: MÉTODOS E
DESAFIOS NA DESTINAÇÃO SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Tecnólogo em Gestão Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/fevereiro/2025

Laercio Mantovani Frare
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ivonei Ottobelli
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciano Moura de Souza
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força, sabedoria e paciência ao longo desta jornada. À minha família, por seu apoio incondicional, e à minha namorada, pelo carinho e incentivo nos momentos mais difíceis. Minha gratidão eterna à minha irmã, cuja lembrança me inspira todos os dias. Ao Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare, pela orientação e dedicação fundamentais para a realização deste trabalho.

RESUMO

A reciclagem de embalagens cartonadas, amplamente utilizadas para acondicionamento de alimentos e bebidas, representa um desafio ambiental devido à sua composição multicamada de papel, plástico e alumínio. Este trabalho investiga métodos para reciclagem dessas embalagens, com foco na obtenção do alumínio presente no material, utilizando processamento químico com ácido sulfúrico. A metodologia envolve experimentos laboratoriais para a separação dos componentes das embalagens e análise da eficiência do sulfato de alumínio obtido como agente floculante em testes de clarificação de água. Os resultados indicam que a separação prévia dos materiais, especialmente pelo método de hidrapulpação, contribui significativamente para a viabilidade do processo de reciclagem. O estudo reforça a importância da integração de tecnologias inovadoras na gestão de resíduos sólidos, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Soluções de reciclagem; Gestão de resíduos; Embalagens cartonadas; Reciclagem ambiental

ABSTRACT

Recycling of carton packaging, widely used for food and beverage storage, represents an environmental challenge due to its multilayer composition of paper, plastic, and aluminum. This study investigates methods for recycling these packages, focusing on obtaining the aluminum present in the material through chemical processing with sulfuric acid. The methodology involves laboratory experiments for separating the packaging components and analyzing the efficiency of the obtained aluminum sulfate as a flocculating agent in water clarification tests. The results indicate that prior separation of the materials, especially through the hydropulping method, significantly contributes to the feasibility of the recycling process. The study reinforces the importance of integrating innovative technologies in solid waste management, contributing to the circular economy and environmental sustainability.

Keywords: Recycling solutions; Waste management; Carton packaging; Environmental recycling

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Composição de material seco e recuperado de RSU em 2019	13
Figura 2 – Composição de materiais de uma embalagem cartonada	14
Figura 3 – Responsabilidade compartilhada.....	17
Gráfico 4 – Disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2021	18
Gráfico 5 – Disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil.....	19
Gráfico 6 – Distribuição de publicações por área de pesquisa.....	20
Figura 7 – Processo de reciclagem de latas de alumínio.....	22
Figura 8 – Ciclo de vida das embalagens cartonadas longa vida.....	25
Gráfico 9 – Porcentagem de ocorrência dos impactos ambientais de acordo com o total de EIA's analisados.....	26
Figura 10 – Composição detalhada das embalagens cartonadas.....	29
Gráfico 11 – Materiais recuperados pela logística reversa em 2021.....	32
Gráfico 12 – Materiais recuperados pela logística reversa em 2022.....	33
Figura 13 – Materiais recuperados em diferentes etapas.....	34
Figura 14 – Processo de hidrapulpação: a) antes da desagregação e b) após desagregação.....	35
Figura 15 – Polietileno antes e depois da operação de extração de fibras.....	35
Figura 16 – Ilustração das separações entre as peças da tampa.....	38
Figura 17 – Vista geral (original e com camadas parcialmente separadas).....	38
Figura 18 – Visão geral (peças plásticas residuais: PET – esquerda; PE pintado – direita).....	39
Figura 19 – Fluxograma do processamento químico das embalagens Tetra Pak	43
Figura 20 – Processo de reciclagem química das embalagens Tetra Pak	44
Fotografia 21 – Amostras para desenvolvimento dos experimentos e preparo de soluções	46
Gráfico 22 – Fatores que influenciam a solubilização do alumínio	47
Fotografia 23 – Agitação das amostras.....	49
Fotografia 24 – Separação plástico-alumínio.....	49
Fotografia 25 – Solução saturada	50
Fotografia 26 – Teste em cone Imhoff	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média dos Parâmetros no Processo de Dissolução do Alumínio.....	48
Tabela 2 - Cronograma das Etapas de Solubilização do Alumínio.....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 O PROBLEMA DAS EMBALAGENS NO BRASIL.....	13
3.2 PANORAMA ATUAL NO BRASIL.....	15
3.2.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	15
3.2.2 Disposição Final de Resíduos Sólidos no Brasil.....	18
3.2.3 Indicadores Bibliométricos Como Propagadores de Conhecimento Sobre GRS.....	19
3.2.4 Logística reversa como Instrumento da GRS.....	21
3.3 IMPACTO AMBIENTAL DO DESCARTE INADEQUADO E DA EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	22
3.3.1 Aspectos da degradação lenta e Contaminação dos Ecossistemas e Saúde Pública.....	22
3.3.2 Impactos da Extração de Matéria Prima.....	24
3.4 DESAFIOS DA RECICLAGEM DAS EMBALAGENS TETRAPAK	28
3.4.1 Dificuldades na Reciclagem das Embalagens Cartonadas.....	28
3.4.2 Desafios da Logística Reversa aplicada a Resíduos no Brasil.....	31
3.5 MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA A SEPARAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DE EMBALAGENS CARTONADAS	33
3.5.1 Delaminação de Embalagens por Meio de Solvente.....	33
3.5.2 Processado e não Processado por Hidrapulpa.....	34
3.5.3 Recuperação de Hidrogênio de Resíduos de Compósitos de Alumínio- Plástico Tratados com Solução Alcalina.....	36
4 METODOLOGIA	41
4.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	41
4.2 REAGENTES E VIDRARIAS.....	41
4.3 METODOLOGIA DE PREPARO DE SOLUÇÕES.....	41
4.4 METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	42
4.5 TESTE DE FLOCULAÇÃO UTILIZANDO O CONE IMHOFF COM SULFATO DE ALUMÍNIO RECICLADO DE EMBALAGENS TETRA PAK.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o impacto ambiental dos resíduos sólidos tem levado a sociedade e a indústria a buscarem alternativas sustentáveis para a gestão e o tratamento de resíduos. Nesse contexto, a reciclagem tem se destacado como uma prática essencial para reduzir a quantidade de lixo encaminhado aos aterros sanitários e para a conservação dos recursos naturais. Entre os resíduos que apresentam desafios significativos para a reciclagem estão as embalagens cartonadas, amplamente utilizadas para o acondicionamento de alimentos e bebidas.

As embalagens cartonadas são compostas por três materiais principais: papel, plástico e alumínio. Essa composição heterogênea torna o processo de reciclagem complexo, pois exige a separação dos materiais constituintes antes que eles possam ser reciclados de forma eficaz. A dificuldade em realizar essa separação resulta em uma taxa de reciclagem baixa para esse tipo de embalagem, aumentando a quantidade de resíduos descartados de forma inadequada no meio ambiente.

Diante desse problema, este trabalho analisa uma tecnologia alternativa para a reciclagem de embalagens cartonadas utilizando o processamento químico. O objetivo geral deste estudo foi avaliar um método eficiente para a reciclagem dessas embalagens, com foco na obtenção de sulfato de alumínio, um produto utilizado no tratamento de efluentes. Além disso, este trabalho objetivou realizar a separação dos materiais constituintes das embalagens como um pré-requisito essencial para o subsequente processamento químico. A metodologia utilizada envolve a reação do alumínio presente nas embalagens com ácido sulfúrico, resultando na produção de sulfato de alumínio. Este processo não só facilita a separação dos componentes das embalagens como também agrega valor ao transformar um resíduo em um produto útil.

Este estudo é de grande importância, pois aborda a questão do descarte inadequado de embalagens cartonadas e propõe uma solução viável que pode ser implementada em larga escala. Além disso, ao obter sulfato de alumínio, contribui-se para a sustentabilidade e a economia circular, promovendo a reutilização de materiais que, de outra forma, seriam descartados como resíduos

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Explorar os desafios ambientais associados às embalagens cartonadas, analisar e avaliar possíveis soluções para mitigar seus impactos negativos pós consumo.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a separação dos materiais constituintes das embalagens como um pré-requisito essencial para o subsequente processamento químico de reciclagem.
- Analisar uma solução para a reciclagem dessas embalagens, considerando que atualmente são descartadas em aterros sanitários.

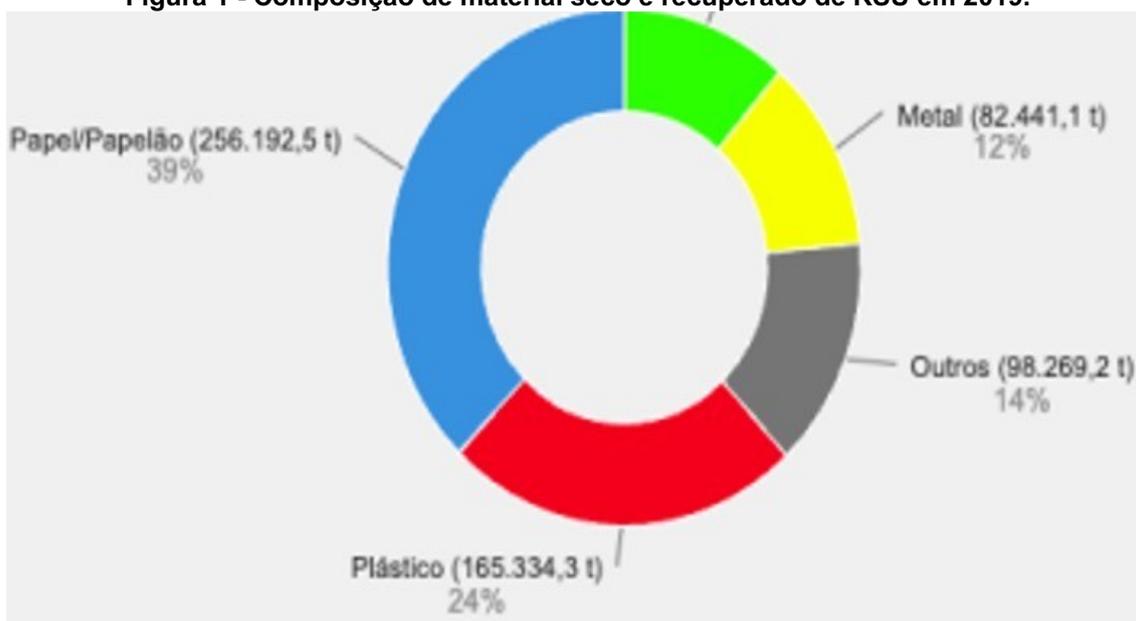
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Problema das Embalagens no Brasil

As embalagens, de qualquer natureza, são muito utilizadas na economia atual com a função de garantir a proteção, a preservação e o transporte seguro de produtos. Para cada produto, a indústria desenvolve uma embalagem específica. Isso tem causado um aumento de resíduos e, conseqüentemente, uma crescente preocupação ambiental devido à disposição inadequada e à baixa taxa de reciclagem de embalagens, especialmente aquelas compostas por plástico, papel e alumínio conhecidas como cartonadas ou tetrapak.

Atualmente, as frações de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil apresentam uma composição que pode variar de acordo com a região do país. Na Figura 1 pode-se observar a composição de material seco recuperado de RSU em 2019 (Sinir, 2019).

Figura 1 - Composição de material seco e recuperado de RSU em 2019.



Fonte: Sinir (2019)

Dentre as atividades que apresentaram influência na produção de embalagem, os setores de Alimentos e Agropecuária, apresentaram comportamento positivo no ano de 2023 (Abre, 2023).

Estas embalagens são utilizadas para guardar produtos alimentícios como sucos, leite e seus derivados e conservá-los por um longo período sem necessidade de resfriamento. Um dos principais produtos da Tetra Pak é o Tetra Brik Aseptic (TBA) que é

o tipo de embalagem mais presente nas prateleiras de supermercado (Ferreira, 2019). A Figura 2 representa as camadas compostas por plástico, alumínio e papel.

Figura 2 - Composição de materiais de uma embalagem cartonada.



Fonte: TetraPak (s/d)

Essas embalagens se caracterizam por sua composição, na qual 75% do material é composto por papel, 5% por alumínio, e os 20% restantes consistem em um polímero denominado polietileno. É essencial separar esses materiais para permitir o processo de reciclagem adequado (Fernandes et al., 2014).

O papel, responsável por 75% da massa da embalagem, é utilizado para ajudar a garantir a forma rígida do produto, bem como para aumentar a resistência do material. A folha de alumínio é utilizada devido às suas excelentes propriedades de barreira para agentes como luz, oxigênio, vapor de água, odores e microorganismos. O polietileno, utilizado, tem diversas funções: protege a camada de papel do contato com a água; protege a camada de alumínio do contato direto com o conteúdo da embalagem; une as camadas e permite a selagem térmica (Zawadiak et al., 2017).

3.2 Panorama Atual No Brasil

3.2.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos

Instituído pelo Decreto Federal nº11.043/2022, o principal instrumento previsto na Lei nº 12.305, de 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil foi baseada na experiência de países pioneiros na área, estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes adaptados para a gestão e gerenciamento no contexto brasileiro, com a intenção de solucionar problemas ambientais relacionados à gestão dos RSU (Cetrulo et al., 2018).

Além disso, o inciso XVI do Artigo 3º, define resíduo sólido como materiais, substâncias, objetos ou bens descartados, provenientes das ações humanas, nos estados sólido, semissólido, gases (contidos em recipientes) e líquidos que não podem ser lançados diretamente na rede pública de esgoto.

Em favor do desenvolvimento da reciclagem, ainda conta com a logística reversa, coleta seletiva, ciclo de vida do produto, Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SNIR), catadores de materiais recicláveis e planos de resíduos sólidos, com inclusão social ante a discussão do tema (Marino et al., 2018).

O setor público tornou-se o principal agente regulamentador e fiscalizador das práticas do sistema de gestão de resíduos. A PNRS determinou que estados e municípios devem desenvolver planos de gestão de resíduos, os quais devem conter medidas para a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos (Brasil, 2010).

Com a instituição do princípio da responsabilidade compartilhada, a supracitada lei determinou que os grandes geradores realizem a destinação correta dos resíduos oriundos dos sistemas de produção. Visando a adequação às determinações legais, os grandes geradores de resíduos têm recorrido a outras organizações para realização do recolhimento dos resíduos sólidos produzidos (Alves et al., 2021).

Com a implementação da Lei nº 12.305/10, ficou atribuída às organizações a responsabilidade pelos resíduos que geram. No intuito de garantir a efetividade de suas ações, os geradores têm recorrido a outras organizações para o recolhimento dos resíduos sólidos produzidos. Alguns países, como o Brasil, optaram pela responsabilidade compartilhada, segundo a qual todos os agentes da cadeia são corresponsáveis pela gestão ambientalmente adequada dos resíduos. Isso tem possibilitado a consolidação de ações por acordos setoriais, dos quais participam as organizações produtoras, as empresas, recicladoras, a sociedade, academia e o governo (Correa et al., 2013, p. 188)

Com base no contexto acima, bem como no art. 20 da Lei nº 12.305/10, entende-se que a prestação de serviços de coleta e destinação de resíduos sólidos enquadra-se na denominada “responsabilidade do gerador” ou “responsabilidade compartilhada” que estabelece às pessoas físicas ou jurídicas obrigação de elaborar seu plano de gerenciamento de resíduos sólidos. Ressalta-se também que a responsabilidade e obrigatoriedade de planos de manejo, conforme o art. 27 da PNRS (BRASIL, 2010a), atribui aos atores a responsabilidade “pela implementação e operacionalização integral do plano de gerenciamento de resíduos sólidos aprovado pelo órgão competente

Destaca-se que o princípio da responsabilidade compartilhada possibilita, diretamente ou por analogia, importantes avanços em outras matérias, como a responsabilização solidária dos causadores de quaisquer formas de poluição. Nesse contexto, ressalta-se que, a Lei nº. 12.305/10 ao estabelecer em seu artigo 27, caput e § 1º. que os agentes responsáveis pelo plano de gerenciamento de resíduos sólidos não terão sua responsabilidade excluída no caso de contratação de serviços de coleta, armazenamento, transporte ou destinação final de resíduos sólidos, ou disposição final de rejeitos em função do gerenciamento inadequado dos respectivos resíduos ou rejeitos, evidencia a aplicabilidade da solidariedade na responsabilidade civil por danos ambientais. (SINNOT, 2012, p. 20).

Na Figura 3 pode-se observar a responsabilidade compartilhada da gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), destacando o papel dos principais atores envolvidos no processo: Poder Público Municipal, Coletividade e Setor Empresarial.

Figura 3 - Responsabilidade compartilhada



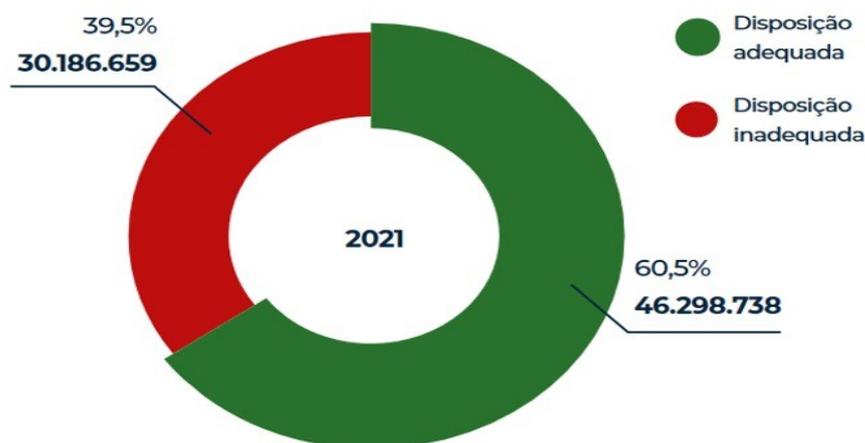
Fonte: Instituto Ethos de Empresas e Responsabilidade Social (p. 27, 2015)

Segundo o Art. 32 da lei 12.305 as embalagens devem ser fabricadas com materiais que propiciem a reutilização ou a reciclagem: Esta disposição destaca a importância de projetar embalagens que possam ser reutilizadas ou recicladas, minimizando o impacto ambiental e incentivando a economia circular. As exigências para que as embalagens sejam restritas em volume e peso, projetadas para reutilização e recicladas quando a reutilização não for possível, visam reduzir o desperdício e promover a sustentabilidade na produção de embalagens. A PNRS, ao abordar esses aspectos, busca fomentar uma cultura de responsabilidade compartilhada entre o poder público, o setor empresarial e a sociedade, promovendo um desenvolvimento sustentável que considere tanto a eficiência econômica quanto a proteção ambiental (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010).

3.2.2 Disposição Final de Resíduos Sólidos no Brasil

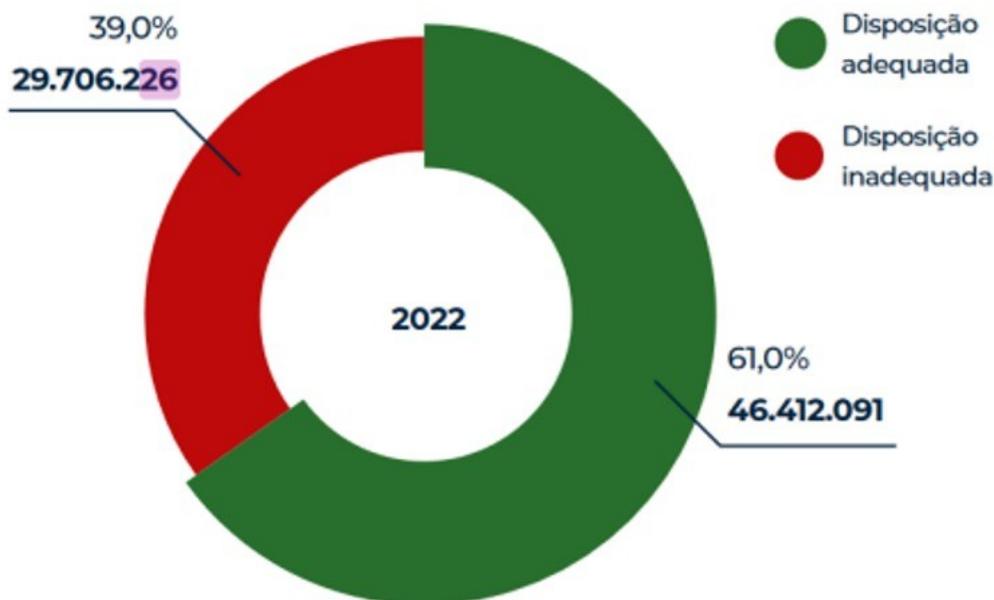
O Brasil gerou mais de 81 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no ano de 2022, em uma média de 381 kg por habitante. A disposição final é uma das alternativas de destinação final ambientalmente adequada previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). No Brasil, a maior parte dos RSU coletados (61%) continua sendo encaminhada para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões do país (Abrelpe, 2022). Os gráficos 4 e 5 demonstram o balanço entre a disposição final adequada e inadequada nos anos de 2021 e 2022, respectivamente.

Gráfico 4 - Disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2021



Fonte: Abrelpe (2021)

Gráfico 5- Disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2022



Fonte: Abrelpe (2022)

Nesse aspecto, a administração pública municipal pode adotar medidas para a melhoria do desempenho da gestão de RSU tendo como base o uso de indicadores e ferramentas de controle de gestão. Esse conjunto de iniciativas otimiza os recursos financeiros investidos em áreas previstas pela política ambiental do município, auxilia a aplicabilidade de instrumentos legais e integra outros requisitos de natureza ambiental necessários ao processo de gestão de RSU (Gavira et al., 2017).

Dessa maneira ainda é assegurado que os resíduos produzidos pelas cidades são em geral um grande problema e todos têm responsabilidade sobre eles, uma vez que são produzidos pela população, fábricas, comércio em geral, setor público dentre outros, e a responsabilidade é compartilhada entre eles (Gomes et al., 2021). Dessa maneira, no cenário atual, caracterizado pelo rápido aumento da produção de resíduos que ocorre em todo o mundo, onde a superprodução de resíduos torna-se um problema real e preocupante, a busca por soluções eficazes e entender esse fenômeno tornou-se uma prioridade para governos (Rodrigues et al., 2018).

3.2.3 Indicadores Bibliométricos Como Propagadores de Conhecimento Sobre GRS

A elaboração de indicadores bibliométricos referente a gestão de resíduos sólidos

no Brasil desde a publicação da PNRS, pressupõe uma abordagem detalhada e multidisciplinar, exigindo um trabalho metodológico minucioso e transparente que permita a produção de um conjunto coerente de indicadores, o que faculta a seus usuários não só uma visão abrangente dessa área como também as limitações inerentes a esses indicadores (Soares et al., 2016; Queiroz et al., 2021).

No trabalho de Queiroz (2022), intitulado "A gestão de resíduos sólidos (GRS) no Brasil a partir do ano de promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS): uma análise bibliométrica", foi realizada uma pesquisa significativa que aborda este tema. O estudo teve como objetivo a elaboração de indicadores bibliométricos que definiram como é a participação, e oferece uma visão abrangente da produção científica nesta área, esta pesquisa permite mapear o desenvolvimento e a disseminação do conhecimento sobre a PNRS. Conforme demonstra o gráfico 6, a distribuição de publicações por área de pesquisa.

Gráfico 6 - Distribuição de publicações por área de pesquisa.



Fonte: Queiroz (2022)

Como demonstrado na Figura 6, verifica-se a predominância de artigos publicados no campo das Ciências Ambientais. Isso se deve principalmente ao fato de essa disciplina se integrar com outras áreas para reduzir os impactos, sejam eles de origem natural ou causados pela ação humana sobre meio ambiente. (Neto et al., 2021). Essas pesquisas têm sido fundamentais para o desenvolvimento de medidas inovadoras e eficazes para a gestão de resíduos sólidos.

3.2.4 Logística reversa como Instrumento da GRS

Logística reversa diz respeito ao que ocorre no pós-venda, principalmente em como os produtos vendidos são descartados ou reutilizados por seus clientes. A política de sustentabilidade, a preservação do meio ambiente e a demanda dos consumidores por produtos de qualidade que ao mesmo tempo sejam biodegradáveis ou que causem menos impacto no meio ambiente é algo que incentivou a criação de uma logística reversa, também conhecida como pós consumo (Oliveira, 2016). Pode-se associar ainda a Economia Circular à logística reversa. A economia circular é fruto da junção entre a responsabilidade do produtor no descarte de seu produto e a política nacional de resíduos sólidos no Brasil, sendo assim podemos dizer que a Economia circular tem por função a restauração e regeneração de mercadorias (Brito, 2019).

Ampliando os recursos disponíveis para que se engaje a economia circular, a aplicação de tecnologias digitais desempenha um papel significativo ao auxiliar na transição de uma economia linear para uma Economia Circular. Uma das tecnologias que tem recebido considerável atenção é a Blockchain, um conceito em ascensão que possibilita uma transformação na maneira como se gerencia a produção, o consumo, a dinâmica do descarte de produtos e a procedência da matéria-prima (Souza, 2023). De acordo com Paquet, (2023):

Para acelerar essa circularidade, tecnologias como a blockchain, que permite rastrear o envio e recebimento de informações pela internet, tem sido cada vez mais aplicada a novas soluções apresentadas no mercado pela segurança que oferece. Diferente das bases com um único servidor, possui diferentes locais de armazenamento de dados e, com isso, dificulta os processos de fraude e roubo de informações na rede, além de permitir total transparência em documentos que comprovam a origem, destino e etapas da reciclagem de um determinado material, dando governança a todo o processo. Para a gestão, certificação e comprovação da reciclagem de resíduos, a tecnologia blockchain é um diferencial, trazendo maior rastreabilidade e transparência para as informações prestadas para a compensação ambiental e efetividade na comprovação jurídica para com os órgãos ambientais. Também permite que empresas e consumidores tenham acesso a todas as operações realizadas, principalmente nos processos de logística reversa de embalagens pós-consumo, ferramenta da economia circular, que consiste na coleta e encaminhamento até a reciclagem de embalagens de produtos após a realização do descarte pelo consumidor final.

A aplicação da logística reversa no setor de fabricação e reciclagem de alumínio também é algo extremamente rentável e economicamente sustentável. Para o meio

ambiente. É gasto cerca de 5 mil dólares para se produzir uma tonelada de alumínio, todavia quando o assunto é reciclagem, é possível produzir uma tonelada de alumínio com cerca de 350 dólares (Morais et al., 2015). O autor ainda aponta que a reciclagem de alumínio evita a extração de bauxita, um mineral que se encontra em escassez em nosso planeta e é primordial para o equilíbrio da vida na Terra. A Figura 7 exemplifica como é o processo de reciclagem de um produto fabricado a partir do alumínio.

Figura 7 - Processo de reciclagem de latas de alumínio.



Fonte: Pensamento verde (2013)

3.3 Impacto Ambiental do Descarte Inadequado e da Extração de Matéria Prima

3.3.1 Aspectos da degradação lenta e Contaminação dos Ecossistemas e Saúde Pública

De maneira generalizada, o lixo depositado em áreas inadequadas pode causar vários problemas para a população, e para o meio ambiente. As pessoas podem contrair várias doenças como a dengue, leptospirose, diarreia infecciosa, cólera, hepatite A, esquistossomose, entre outras, são as principais doenças vinculadas a contaminação da água. Quando dispostas em locais inadequados podem provocar poluição atmosférica devido a sua queima e quando exposto, o lixo acumulado causa mau cheiro atraindo insetos que são vetores transmissores de doenças. Todas essas patologias são transmitidas à população pelas águas contaminadas e pela falta de saneamento básico, sendo que as crianças são as mais atingidas por essas doenças. (Silva, 2017).

As plantas também sofrem consequências danosas devido a poluição causada

pelo lixo. Os resíduos são carregados pelas águas que obstruem as galerias fluviais, assoreia os rios, e em decorrência disso ocorrem as enchentes e os alagamentos das ruas, causando desmoronamentos e deslizamentos deixando muitas pessoas desabrigadas e desalojadas (Silva, 2017).

Segundo Abreu (2010, p.140):

Os resíduos sólidos manejados inadequadamente oferecem alimento e abrigo para muitos vetores de doenças, especialmente roedores e insetos como baratas e mosquitos, estando atualmente demonstrando de forma clara a relação existente entre a proliferação de certas doenças e o manejo inadequado de resíduos sólidos.

Os danos causados ao meio ambiente não é só o descarte inadequado, mas também a sua fabricação em itens descartáveis como é o caso das embalagens que, dependendo da maneira que são dispostas ao final da sua vida útil, podem causar um impacto negativo ao meio ambiente. Este cenário de aumento de consumo e disposição inadequada, gera uma situação não sustentável, do ponto de vista ambiental. Adicionalmente, como o material apresenta longa durabilidade, quando descartados em aterros sanitários ocupam muito espaço e por muito tempo, reduzindo a capacidade deles.

Quando descartados erroneamente na natureza geram problemas de acúmulo, podendo impermeabilizar solos, ferir ou trazer danos aos animais e poluir oceanos (Yugue, 2020). De acordo com Fagundes, (2019):

É crucial destacar e conscientizar sobre os impactos negativos causados pelo descarte inadequado das embalagens multicamadas de alumínio. O descarte incorreto pode resultar em danos significativos ao meio ambiente devido à decomposição extremamente lenta do alumínio e do plástico na natureza, que levam centenas de anos para se desfazerem. Diferentemente de outros materiais, o alumínio ocupa espaço nos aterros sanitários por um período prolongado, representando um desperdício significativo de recursos valiosos. Para lidar com essa questão, é fundamental implementar políticas de gestão de resíduos mais eficientes, com foco na reciclagem e no uso responsável desses, a separação correta dos materiais e o descarte nos sistemas de reciclagem apropriados. Ainda sobre o descarte inadequado, por conta das embalagens conterem uma quantidade significativa de plástico ela pode se enquadrar em mais uma problemática: o plástico nos oceanos. Diariamente, uma considerável quantidade de resíduos, incluindo embalagens metalizadas de alimentos, como sorvetes e biscoitos, chegam aos oceanos, acumulando-se tanto na superfície quanto no fundo do mar. Os microplásticos, também presentes na superfície dos oceanos, entram em contato com animais que têm o mar como habitat natural. Infelizmente, a má gestão de resíduos plásticos tem acarretado a morte de centenas de animais marinhos, sendo as causas mais comuns o emaranhamento em redes de pesca e a ingestão desses resíduos. A longo prazo, esses problemas podem levar à extinção de

espécies da fauna marinha. Além da dispersão do plástico ocasionada pelos resíduos despejados no mar através de redes de esgoto ou poluição em áreas litorâneas, também existem os impactos do próprio processo de produção do plástico, que contribui para a ampliação dos impactos negativos nos ecossistemas marinhos.

3.3.2 Impactos da Extração de Matéria Prima

Outrossim, a matéria prima das embalagens envolve a extração e refino do alumínio. A produção de alumínio primário consome grandes quantidades de eletricidade, principalmente de fontes não renováveis, o que contribui para as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a sua fabricação é intensiva em carbono e gera emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases poluentes durante todo o processo, desde a extração da bauxita até a produção final da embalagem (Moraes, 2022).

Ao considerar os impactos ambientais da mineração, é fundamental reconhecer que praticamente todas as atividades desse setor envolvem movimentação de terra e escavações. Essas atividades acarretam consequências abrangentes, tais como desmatamento, alterações na topografia da paisagem, perda ou degradação das camadas superficiais do solo, instabilidade de encostas e terrenos, mudanças nos corpos d'água e no nível do lençol freático, além da erosão e acúmulo de sedimentos (Kopezinski, 2000).

Esses impactos ambientais associados à mineração, tanto na fase de extração quanto no processamento dos materiais, requerem uma abordagem responsável. É necessário implementar práticas de mineração que busquem amenizar esses impactos negativos, desacelerando a degradação ambiental e promovendo a recuperação de áreas afetadas. Além disso, a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes são fundamentais para garantir a preservação dos ecossistemas e dos recursos naturais para as gerações futuras (Miller, 2023).

Com os níveis de poluição cada vez maiores, a reciclagem é uma das principais alternativas para diminuir a poluição do meio ambiente quando se trata de embalagens Tetra Pak®. Identificar e descrever os diferentes casos de ações de reuso e reciclagem desse produto no Brasil e, finalmente, identificar e descrever a percepção da população sobre o reuso ou a reciclagem deste tipo de embalagem (Silva et al., 2022).

O tipo de papel utilizado nessas embalagens é dupla face, extraído de árvores de reflorestamento e é composto por duas camadas que dispensam colagem e está localizado na parte externa da embalagem e pode ser dividido em até quatro camadas

(Souza, 2011). Outro ingrediente citado é o plástico na forma de polietileno de baixa densidade (PEBD), que tem a função de isolar o papel e evitar que o alumínio entre em contato com o produto, além de aderir a outros materiais constituintes da embalagem, e como subproduto do petróleo tem grande potencial de poluição ambiental (Souza, 2011).

O minério de importância industrial para obtenção do alumínio metálico e de muitos compostos de alumínio é a bauxita, que se forma em regiões tropicais e subtropicais por ação do intemperismo sobre aluminossilicatos. Apesar de ser frequentemente descrita como minério de alumínio, a bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas um material heterogêneo formado de uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados (Constino et al., 2001).

Enquanto o alumínio primário é extraído sob um modelo econômico linear, a produção de alumínio secundário a partir de materiais reciclados representa um paradigma da economia circular e se alinha com princípios sustentáveis para aprimorar a qualidade de vida atual e futura (YU et al., 2020). A Figura 8 representa o ciclo de vida dos componentes das embalagens.

Figura 8 - Ciclo de vida das embalagens cartonadas longa vida



Fonte: Quint (2007).

No trabalho de Ribeiro et al. (2019), foi realizada uma pesquisa que aborda os principais impactos ambientais elencados nos EIA/RIMAs, elaborados para atividades de mineração no estado do Pará, Brasil.

De acordo com Ribeiro et al. (2019):

A metodologia baseou-se em quatro etapas. A primeira etapa consistiu em realizar um levantamento de todos os empreendimentos de mineração que estavam em processo de licenciamento ambiental e cadastrados no site do IBAMA até setembro de 2018. Na segunda etapa, todos os empreendimentos que atendiam os critérios estabelecidos para a pesquisa foram selecionados, ou seja, os empreendimentos de mineração tinham que ter EIA/RIMA disponíveis no site do IBAMA, ter localização no estado do Pará e ter no máximo vinte anos de elaboração do estudo. Dos 47 empreendimentos em licenciamento, apenas 07 atendiam os critérios da pesquisa. Na terceira etapa, todos os impactos ambientais de todos os EIAs analisados foram listados e, a partir dessa lista, originou-se uma lista com os impactos mais citados e em quantos estudos eles apareceram. Posteriormente, na quarta e última etapa, foi realizada a análise estatística através de cálculos de porcentagem de ocorrência dos principais impactos nos estudos analisados.

As ocorrências dos impactos e suas respectivas porcentagens estão representadas na Gráfico 9.

Gráfico 9 - Porcentagem de ocorrência dos impactos ambientais de acordo com o total de EIA's analisados



Fonte: Ribeiro et al. (2018)

Os impactos relacionados à atmosfera, tem como principal fonte as partículas dispersadas pelo vento durante as escavações explosões, jateamento, transporte de material e rejeitos, erosão eólica (em mineração a céu aberto) e emissão de gases, que são gerados durante a combustão de substâncias combustíveis, explosões e processamento mineral, conforme afirma Bonfim (2017).

Como o processamento mineral necessita de um consumo elevado de água, há deterioração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, conforme foi apresentado em 86% dos EIAs analisados. A má qualidade ou a redução da disponibilidade de água pode afetar não apenas o meio ambiente, mas também a saúde humana, principalmente se próximo à área afetada houver comunidades que se abasteçam daquele corpo hídrico, visto que os rejeitos das minas são tóxicos à saúde humana. O solo é outro componente ambiental muito afetado pela mineração, podendo ser a atividade que mais degrada a qualidade do solo, de acordo com Bonfim (2017).

Quando há a remoção do solo superficial, é retirada a camada mais fértil do solo, expondo os solos a processos erosivos, o que potencialmente pode culminar no assoreamento dos corpos d'água do entorno (Mechi et al., 2010).

Os impactos relacionados ao meio biótico são muito expressivos na atividade de mineração. A remoção de vegetação impacta na biodiversidade como um todo pois reduz a oferta de alimentos e refúgio à fauna local, além de, dependendo da extensão da área, ser capaz de alterar o microclima do local, com mudanças na sensação térmica e no regime de chuvas local. Além disso, a caça predatória, e o atropelamento e afugentamento de fauna também são impactos que afetam diretamente o decréscimo no número de indivíduos resultante de ação antrópica (Ribeiro et al., 2019).

No que se refere aos impactos socioeconômicos, há expressividade tanto impactos positivos quanto negativos. Por um lado, há incremento na economia, geração de empregos e desenvolvimento local. Mas por outro lado, muitos impactos negativos físicos e bióticos também afetam a comunidade local, trazendo possíveis prejuízos à saúde (Acserald et al., 2008).

Estudos sobre desastres ambientais provocados pelo vazamento de rejeitos e efluentes líquidos da bauxita e do caulim no município de Barcarena-PA de 2003 a 2018, demonstra o que já foi dito por Acserald et al. (2008) sobre a condição do ambiente de certos sujeitos sociais que prevalece sobre o de outros. O ambiente das comunidades ribeirinhas e de pequenos agricultores em Barcarena, vem sendo gradativamente poluído de modo a dificultar o acesso à terra e aos recursos hídricos de qualidade do qual

dependem para sua sobrevivência. Os inquéritos policiais, laudos periciais e relatórios técnicos expedidos por órgãos públicos mostram que a poluição não é democrática, visto que atinge com grande força as comunidades locais, circunvizinhas das mineradoras (Lemos, 2021).

3.4 Desafios da Reciclagem das Embalagens Tetrapak

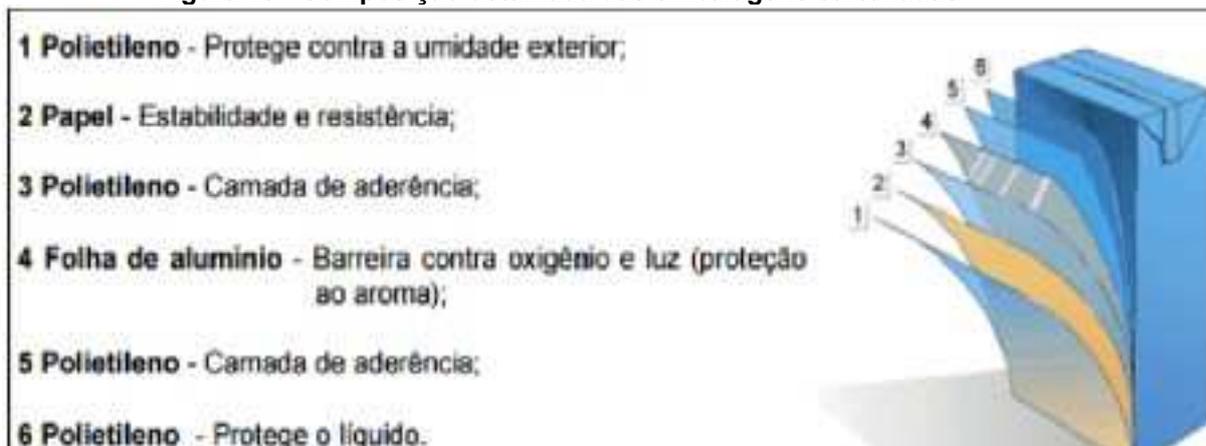
3.4.1 Dificuldades na Reciclagem das Embalagens Cartonadas.

Devido às características apresentadas, a reciclagem desta classe de resíduos é complicada, devido aos diferentes componentes constituintes (Georgiopolou et al., 2021). Uma alternativa, seria realizar a reciclagem artesanal das embalagens cartonadas para utilizar o material para produzir novos produtos, sem que seus componentes sejam separados. A reutilização é possível, pois as embalagens possuem propriedades físicas e químicas que lhe atribuem durabilidade, além de propriedades estéticas diferenciadas (Marques et al., 2018).

Siddiki et al. (2020) relatam que para a reciclagem eficiente de TPs, uma separação das diferentes camadas precisa ser realizada e, embora a separação mecânica esteja sendo considerada como um método, ela é complicada pela alta resistência de ligação entre as camadas. Os autores ainda afirmam que métodos de extração por solvente foram sugeridos por muitos pesquisadores porque as respectivas camadas podem ser separadas facilmente pelo uso de um solvente orgânico, embora a separação seja bem-sucedida pelo uso de um solvente apropriado, a grande quantidade de solvente necessária neste processo pode ser considerada uma desvantagem do processo de extração por solvente.

As camadas são firmemente agregadas, para produzir um material firme e leve. A presença de diferentes materiais na composição deste tipo de embalagem dificulta a sua reciclagem, devido à necessidade de separação destes materiais. Na figura 10 é demonstrada a composição de uma embalagem cartonada.

Figura 10 - Composição detalhada das embalagens cartonadas



Fonte: TetraPak (s/d)

A reciclagem de embalagens multicamadas, sendo o processo de separação total dos insumos presentes, é difícil e muito onerosa, pois o material proveniente apresenta baixo valor de mercado, devido à presença de diferentes tipos de materiais fortemente aderidos entre si, e não custeia o processo em si. Assim, uma alternativa interessante para a reciclagem, é sua utilização da mistura de plástico e alumínio como insumo na fabricação de produtos, nos quais a mistura seja incorporada como um compósito simples, sendo a matriz o polímero, na maioria das vezes polietileno, e o alumínio a carga. Esse processo gera novos produtos e receitas, e auxilia na diminuição dos resíduos dispostos nos aterros (Santos et al., 2004).

Assim, as embalagens longa-vida da Tetra Pak são consideradas materiais compósitos. Para Lima (2006, p. 16), os compósitos são “o resultado da união de dois (ou mais) materiais distintos que, por consequência, resulta no somatório das diferentes propriedades, o que lhe confere desempenho superior ao que estes materiais, separadamente, não conseguiriam atingir”. Apesar de sua grande representatividade na indústria, os compósitos podem gerar riscos ambientais devido a sua difícil reciclagem.

De acordo com dados da PNRS, apesar de 30% de todo o lixo produzido no Brasil ter potencial de reciclagem, a estimativa é de que 1,7% de fato é reaproveitado (Brasil, 2019b). Esses números revelam que há um grande desperdício tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e social, uma vez que a reciclagem é uma fonte de renda para milhares de famílias (Fragmaq, 2018).

Seguindo este raciocínio, as embalagens plásticas flexíveis pós-consumo estarão cada vez mais disponíveis, e a identificação de soluções tecnológicas para o tratamento ou destinação adequadas para elas se faz cada vez mais urgente e necessária. No caso

dos plásticos, reciclagem das diferentes formas: mecânica, química e energética (Brasil, 2010).

A PNRS também preconiza a redução da destinação de materiais potencialmente recicláveis em aterros sanitários. A forma sugerida para atingir esses objetivos foi a política dos 3 R's: reduzir, reutilizar e reciclar (Yugue, 2019).

Dentro deste contexto, os esforços para a prevenção de resíduo são importantes, que ocorrem quando há a não-geração, a redução na quantidade gerada e a melhora da qualidade do resíduo gerado, neste caso proporcionando maiores possibilidades de uma posterior reciclagem ou outras formas de recuperação de materiais ou do próprio resíduo (Mancini, 2019).

De acordo com Garcia, et al. (2019):

Estas embalagens não têm valor no mercado, que não considera o material economicamente lucrativo. Isto dificulta a triagem, ou seja, há problemas de separação e em alguns casos, de lavagem, visto que os catadores se sentem desmotivados por não quererem perder tempo com uma coleta que não gerará nenhum lucro. Com isso, ainda há a agravante do material ser descartado em lixo comum. Deve-se ressaltar que para o material ser considerado reciclável depende da tecnologia disponível, bem como da proximidade desta, para reduzir gastos com transporte. E ainda, para haver o incentivo à reciclagem, deve haver lucro. Consequentemente, poucas são as cooperativas que fazem a reciclagem deste produto.

Outro problema recorrente no descarte desse tipo de material, é a falta de identificação ou de padronização desta identificação nas embalagens, ou até mesmo a apresentação de informações erradas. Dado que os programas de reciclagem, particularmente tem a embalagem como meta na coleta, os códigos presentes nas embalagens plásticas proporcionam uma identificação melhor do tipo de resina das embalagens. Tais códigos impulsionam o controle de qualidade no desmembramento dos materiais plásticos nas cooperativas, possibilitando que o plástico reciclado seja mais uniforme, além de facilitar o serviço dos catadores, como destacado por Coltro e Duarte (2012). De acordo com Garcia et al., (2019):

Na reciclagem de embalagens cartonadas é realizada a separação das diversas camadas de materiais que as constituem. Esse processo de separação é feito em um equipamento denominado hidrapulper, podendo ser de alta, média ou baixa consistência, e levando em média de 30 a 40 minutos. Já para embalagens plásticas laminadas, pelas características dos materiais utilizados (plástico e laminado), a hidratação não permitiria a separação como em embalagens cartonadas. Há, provavelmente, a possibilidade do aproveitamento energético por meio da incineração do alumínio e do plástico. Deve-se ressaltar, entretanto, que, para a reciclagem

destas embalagens, a coleta seletiva ainda é fator limitante, devido ao alto custo em relação à coleta convencional. Para ser viável economicamente, tendo como base o custo da reciclagem para embalagens cartonadas, o processo de reciclagem deve gastar menos com água e luz, visto que em termos de transporte, o enfardamento de embalagens plásticas laminadas é mais fácil operacionalmente, o que implicaria em menos custo. Porém, o valor agregado para embalagens cartonadas, provavelmente seria maior.

A dificuldade na reciclagem se dá principalmente pela falta de conhecimento sobre a real proporção dos materiais que constituem a embalagem. Menciona que ao não se reciclar o material, o corte de árvores de reflorestamento para a fabricação de papel, a exploração de alumínio, assim como o aumento do consumo de petróleo para a fabricação de plásticos (Zortea, 2001).

Embora existam limitações na reciclagem destes materiais, tecnologias estão surgindo, de modo a avançar em processos mais eficientes e ambientalmente corretos, como é a tecnologia plasma. Este método de reciclagem desenvolvido no Brasil é tão vantajoso quanto o uso do Hidrapulper, e seu diferencial é a separação completa do papel, plástico e alumínio (Garcia et al., 2019).

3.4.2 Desafios da Logística Reversa aplicada a Resíduos no Brasil.

Em relação à logística reversa, Couto e Lange (2017), apontam fatores e responsáveis para as dificuldades encontradas em sua implementação, tais como: adequação da legislação e normatização, aspectos tributários, instrumentos financeiros e licenciamento ambiental exigindo a atuação direta do Governo Federal; articulação dos elos das cadeias produtivas, regulamentação e fiscalização do cumprimento dos acordos setoriais, exigindo o controle governamental; adequação do modelo operacional; incentivo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologia, pesquisa e inovação; adequação ou investimento em infraestrutura para reciclagem, bem como atuação também no licenciamento ambiental definindo condições técnicas para a certificação de recicladoras e “critérios técnicos para o licenciamento ambiental dos pontos de recebimento/triagem e veículos necessários, exigindo a ação do setor empresarial.

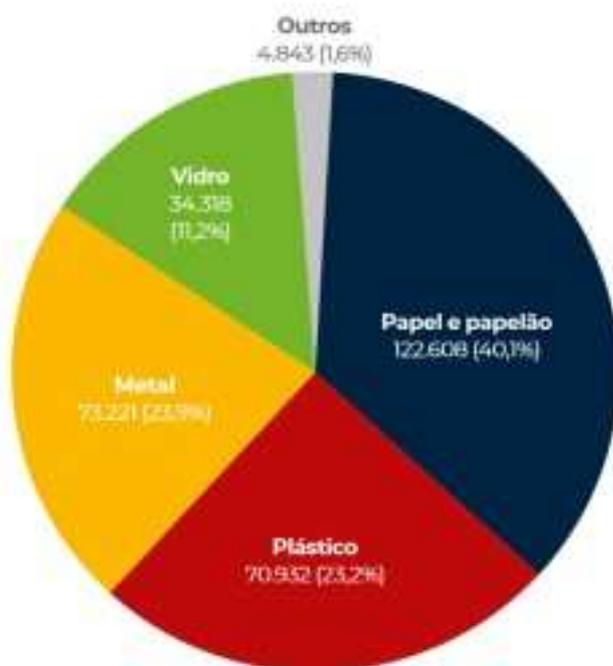
No Brasil, relativamente ao resíduo gerado, são poucas as empresas de coleta e reciclagem. Apesar da reconhecida importância do processo, há um atraso na infraestrutura de coleta e processamento de resíduos, além da falta de políticas públicas que incentivem a logística reversa. Porém, há a necessidade do aprimoramento de tecnologias de reciclagens para embalagens, bem como o desenvolvimento de pesquisas

voltadas ao tema, como anseiam os setores governamentais e empresariais (Forli et al., 2002).

A logística reversa de plásticos laminados, por exemplo, apresenta vários obstáculos a serem vencidos visto que são considerados pelos que fazem a coleta seletiva como material não reciclável (Garcia et al., 2019).

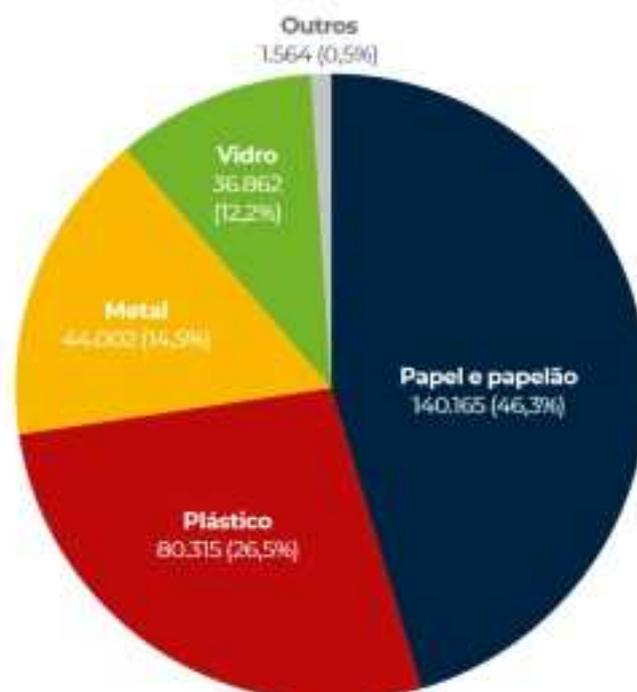
Os gráfico 11 e 12 demonstram o total de materiais recuperados em pelos programas de logística reversa de embalagens em geral no ano de 2021 e 2022, respectivamente.

Gráfico 11 - Materiais recuperados pela logística reversa em 2021.



Fonte: Central de Custódia da Logística Reversa de Embalagens (2021).

Gráfico 12 - Materiais recuperados pela logística reversa em 2022



Fonte: Central de Custódia da Logística Reversa de Embalagens (2022).

No ano de 2022, com a adesão de mais Programas de Logística Reversa, observa-se um aumento da recuperação de materiais recicláveis secos (Abrelpe, 2022).

3.5 Métodos Alternativos para a Separação dos Materiais Constituintes de Embalagens Cartonadas

3.5.1 Delaminação de Embalagens por Meio de Solvente

No estudo de Diop et al., (2016), embalagens multicamadas foram trituradas em pequenos pedaços (cerca de 3 cm) utilizando um picador de madeira Salsco (Salsco Inc., Cheshire, Connecticut, EUA). A hidrapulpação foi realizada utilizando um desintegrador de polpa em escala laboratorial. A embalagem triturada foi colocada no reservatório do desintegrador e misturada com água na proporção de massa sólida para líquida de 1:10. As lâminas desintegradoras foram giradas a 1200 rpm por um período de 6 min. Esta etapa decompõe o papelão até o estado de fibra de celulose. A suspensão de fibras foi então passada através de uma grade de filtração (1 cm de diâmetro) que retirou os resíduos de polietileno/alumínio, mas deixou passar a fibra de celulose. A suspensão de polpa de celulose obtida foi então enviada para um filtro-prensa para separar a água livre das fibras. Os resíduos de polietileno-alumínio foram imersos em solução de ácido

fórmico a 50% (v/v) por 10 horas. O material foi então removido da solução, lavado com água e após o que o pH foi neutralizado com uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Nesta fase, as camadas de PE e alumínio estavam delaminadas, mas ainda muito pegajosas. O polietileno delaminado flutuou na superfície da água enquanto a camada de alumínio delaminado mais densa sedimenta no fundo do recipiente. Os componentes separados foram então lavados com água e secos à temperatura ambiente. A Figura 13 representa os materiais separados nas diferentes etapas.

Figura 13 - Materiais recuperados em diferentes etapas



Fonte: Diop et al. (2016)

3.5.2 Processado e não Processado por Hidrapulpação

No estudo de Wojciechowski et al. (2017) as tecnologias que foram aplicadas com sucesso podem ser divididas em dois grupos. Aquelas que processam todo o material UTPC como está e aquelas que contam com a hidropolpação como primeira etapa, separando a fibra de celulose do laminado PE-Al. De acordo com Wojciechowski et al., (2017), o processo sem hidrapulpação:

O processamento da Tetra Pak pós-consumo sem hidropolpação, na maioria dos casos, só é possível por meio de recuperação de energia ou pela obtenção de produtos de baixa qualidade (downcycling). A recuperação de energia amplamente conhecida pode ser facilitada pela incineração, gaseificação ou pirólise, geralmente em mistura com outros resíduos sólidos urbanos. Tratar a Tetra Pak pós-consumo classificada dessa forma não é uma forma eficiente de processar esse recurso tendo o

papel como ingrediente principal. O calor relativamente baixo de combustão do papel (16 MJ/kg), o teor de água geralmente significativo e o alto valor de cinzas tornam esta abordagem indesejável, especialmente sob condições de redução do mercado de resíduos de papel.

Ainda para os autores, Wojciechowski et al., (2017), o processo com hidrapulpaagem:

A tecnologia mais madura em relação ao processamento UTPC é a hidropolpação baseada em abordagem semelhante à reciclagem convencional de resíduos de papel, com pequenas alterações durante a separação da polpa do PE-Al rejeitado. Na primeira etapa, o UTPC geralmente é cortado no tamanho de um cartão postal. Na próxima etapa o material é direcionado para o processo de hidropolpaagem. Sob a ação de um misturador de alta velocidade ou tambor rotativo na presença de água em temperatura ambiente até 50°C, a fibra de celulose adsorve água e forma polpa. A mistura contendo polpa e laminado de PE-Al é então separada por peneiração do material não desfibrado. Dependendo do sistema específico, etapas adicionais podem ser tomadas em termos de purificação adicional de polpa/PE-Al. Nas tecnologias modernas, o teor de fibra no produto PE-Al fica entre 1 e 5%. Dependendo da pureza da matéria-prima, quantidades não desprezíveis de outros polímeros podem ser encontradas no produto final, tais como: HDPE, PET, PA, PP e PVC. Copos e tampas que podem ser responsáveis por até 15% da massa de PE-Al podem ser facilmente separados por meio de triagem pneumática baseada na diferença de densidade. Apesar de algumas fontes de contaminação, o PE-Al é um produto limpo e reprodutível que pode ser processado posteriormente.

As Figura 14 e 15 ilustram como é realizado o processo de hidrapulpaagem

Figura 14 – Processo de hidrapulpaagem: a) antes desagregação e b) após desagregação



(a)

(b)

Fonte: Zuben (1999)

Figura 15 - Polietileno antes e depois da operação de extração de fibras



Fonte: Zuben (1999)

O processamento de UTPC está aumentando rapidamente, impulsionado por regras mais rigorosas regulamentações em termos de eliminação de resíduos, bem como diminuindo a oferta de resíduos de papel na era digital. PE-Al terá presença crescente na reciclagem de plástico à medida que o esgotamento da capacidade de recuperação de energia será transferido para materiais verdadeiramente não recicláveis (Wojciechowski et al., 2017).

3.5.3 Recuperação de Hidrogênio de Resíduos de Compósitos de Alumínio- Plástico Tratados com Solução Alcalina

O desenvolvimento histórico da indústria energética global foi largamente apoiado pela transição para combustíveis mais concentrados e convenientes. Embora os combustíveis fósseis ainda prevaleçam sobre as energias renováveis, nos últimos anos, foi estabelecido um caminho claro para reduzir as emissões de dióxido de carbono. Nos próximos anos, espera-se que uma grande parte da energia produzida a partir de hidrocarbonetos seja consumida por fontes de energia “verdes” (Wang et al., 2022). O hidrogênio é considerado o transportador de energia mais promissor do futuro. De acordo com as previsões, o hidrogênio 'azul' e 'verde' será gerado em quantidades industriais a partir de fósseis ou água (por eletrólise) usando energia solar, eólica, geotérmica, das marés ou hidrelétrica (Deng et al., 2022).

Um método seguro e conveniente para fornecer a quantidade necessária de hidrogênio *in situ* é a implementação da reação entre água e metais hidro reactivos, como magnésio e alumínio. O alumínio é protegido contra a oxidação por uma fina película de óxido em sua superfície. Portanto, para induzir a sua reação com a água, algumas medidas de ativação devem ser aplicadas. Os mais comuns incluem elevação de temperatura acima de 100 °C para acelerar a reação entre o alumínio e a água líquida ou vapor de água (Etminanbakhsh et al., 2022).

A geração de hidrogênio a partir da oxidação de alumínio de baixa qualidade, secundário ou residual é obviamente mais lucrativa do que sua produção por divisão da água com um metal totalmente novo. Além de folhas de alumínio usadas, fios, escória, latas, produtos de usinagem, peças de construção, detritos e outros resíduos, há vários materiais sanduíche compostos à base de plástico que contêm uma camada de alumínio.

Esses materiais multicamadas incluem embalagens para medicamentos (por exemplo, blisters de comprimidos e cápsulas, sachês para pós para bebidas quentes), temperos, alimentos (tampas para recipientes de iogurte ou requeijão, embalagens para barras de manteiga e requeijão), bebidas e leite (Tetra Pak® produtos), cabos isolados e chapas sanduíche para construção. A folha de alumínio prensada em camadas de papel (PA), plástico ou algum outro material é ligada a elas por adesão mecânica (entrelaçamento) e não pode ser separada mecanicamente. Por essa razão, a reciclabilidade de tais materiais em sanduíche é fraca, representando assim um problema complexo (Buryakovskaya et al., 2022).

O material inicial contendo alumínio utilizado no cada experimento incluiu uma amostra composta multicamadas de PET-AI-PE foi representada com duas tampas para recipientes de coalhada infantil, cortado em quatro pedaços quase do mesmo tamanho. De acordo com Buryakovskaya et al. (2022):

Uma solução aquosa alcalina foi preparada usando água deionizada e pellets de NaOH de grau reagente analítico. O procedimento experimental incluiu despejar 1.000 mL de solução 0,5 M em um reator e aquecê-lo com um aquecedor sob agitação com um misturador magnético. Uma amostra foi então carregada no reator. O hidrogênio originário passou através de um frasco Drexel para um recipiente de vidro com água. O volume de hidrogênio foi medido por um método de ejeção de água (deslocamento de água), representando uma técnica confiável amplamente utilizada [82,107–111]. A água foi ejetada pelo gás que entrava para ser coletada em um frasco e colocada em balanças cujas leituras eram transmitidas continuamente para um computador. As temperaturas no reator e no vaso de vidro foram medidas, respectivamente, com um termopar tipo L e um detector de temperatura conectado a um termômetro multicanal. A pressão atmosférica foi detectada por um barômetro. Os dados registrados foram utilizados para calcular os valores do volume de hidrogênio sob condições padrão (Norma DIN 1343: 101.325 Pa, 0 °C) usando a lei dos gases ideais.

Uma das tampas testadas em cada experimento obviamente tinha uma camada plástica superior com pintura mais fina e solta. Logo após o início do experimento, essa camada se soltou prontamente da folha e rasgou-se em pequenos pedaços. Ao descobrir a folha, o alumínio dessas tampas foi logo consumido pela reação. Como as tampas do referido tipo eram mais pesadas que as de outro tipo, a sua contribuição para o rendimento de hidrogênio era maior. As tampas do tipo mais leve ficaram muito bem “seladas” com a camada pintada. Essa foi a razão pela qual tiveram que passar por um tratamento mais longo com fricção durante a mistura de bolhas de hidrogênio, originadas entre a folha e a camada externa de PE e separando-as gradativamente uma da outra pela criação de lacunas de gás. As Figuras 16 e 17 demonstram a caracterização de amostras plástico-alumínio-plástico.

Figura 16 - Ilustração das separações entre as peças da tampa



Fonte: Buryakovskaya et al., (2022).

Figura 17 - Vista geral (original e com camadas parcialmente separadas)



Fonte: Buryakovskaya et al., (2022).

A visão geral dos demais componentes plásticos (PET e PE pintado) e os padrões do produto sólido da oxidação do alumínio são mostrados na Figura 18. Como pode ser visto, as camadas de PET não sofreram nenhuma transformação drástica visível em comparação com as amostras originais, enquanto a camada de PE pintada com TiO_2

composto foi rasgado em pequenos pedaços. Os pedaços da camada pintada mais densa eram geralmente maiores que os da camada descascada no início. Para o produto sólido da reação foram identificadas três fases.

Figura 18 - Visão geral (peças plásticas residuais: PET– esquerda; PE pintado – direita)



Fonte: Buryakovskaya et al., (2022).

O presente estudo representou, na verdade, um estudo experimental sobre a produção de hidrogênio a partir da oxidação do componente alumínio de materiais multicamadas, contendo plásticos e papel, em solução alcalina. As amostras de tampas PET-Al-PE foram consumidas de forma não uniforme: uma de cada par de tampas testadas apresentava uma camada pintada solta, que se desprendeu logo após o início, enquanto o desprendimento da camada pintada mais densa de outra tampa demorou

muito mais tempo. As tampas continham, em média, 60% em peso de alumínio, que foi transformado com sucesso em hidrogênio.

O estudo demonstrou que o hidrogênio pode ser efetivamente recuperado de materiais sanduíche de plástico-alumínio e papel-plástico-alumínio. No entanto, a pureza deste hidrogênio continua a ser uma questão para estudos futuros. O resultado foi a separação dos principais componentes dos materiais multicamadas testados. O PA, o PVC e o PET gravitam para o fundo, enquanto o PE flutua para a superfície (Buryakovskaya et al., 2022).

4 METODOLOGIA

4.1 Local de realização dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Processos e Biocombustíveis da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), o qual é equipado com as instalações e instrumentação necessárias para a realização dos ensaios. Este laboratório proporciona condições controladas de temperatura, umidade e iluminação, criando um ambiente adequado para a execução dos procedimentos experimentais. Além disso, conta-se com o uso de equipamentos especializados, como agitador magnético com aquecimento, balança analítica, pHmetro, termômetro, e as demais vidrarias, assim garantindo a precisão e confiabilidade dos resultados.

4.2 Reagentes e Vidrarias

Os seguintes reagentes e vidrarias foram utilizados para o desenvolvimento dos ensaios experimentais: Ácido sulfúrico, marca Êxodo Científica, pureza 95%, densidade 1,83 g/mol; hidróxido de sódio, da marca PerfylTech, pureza de 99%; água destilada; agitador magnético com aquecimento; embalagens de leite, do tipo TetraPak; balança analítica; balão volumétrico de 1,0 L; béquer de 500 mL; espátula; funil; papel filtro; pipeta de 5,0 mL; pera; termômetro; tesoura; pHmetro; cone Imhoff.

4.3 Metodologia de Preparo de Soluções

Para preparar uma solução de ácido sulfúrico a 1% em volume, utiliza-se o cálculo da massa necessária de ácido sulfúrico conforme a Equação 1.

$$C = m_1 / V \quad \text{Eq .1}$$

Na Equação 1, a variável C representa a concentração da solução em gramas por litro (g/L) e V é o volume da solução em litros (L).

O procedimento envolve a medição cuidadosa de, aproximadamente, 29,7 g de ácido sulfúrico, esta quantidade foi adicionada a um béquer contendo previamente 300

mL de água destilada. A mistura foi agitada até que o ácido sulfúrico estivesse completamente disperso na solução. Este método garantiu a obtenção da concentração desejada, possibilitando a realização dos experimentos subsequentes com a solução preparada.

Para os ajustes de pH, necessários pelo método, utilizou-se uma solução 10N, de hidróxido de sódio (NaOH). O cálculo da massa necessária de NaOH pôde ser realizado de acordo com a Equação 2.

$$m = N \cdot V \cdot MM \qquad \text{Eq.2}$$

Na Equação 2, a variável N representa a normalidade da solução em N (Normalidade), V é o volume da solução em litros (L) e MM é a massa molar do NaOH em gramas por mol (g/mol).

Constatou-se que seriam necessários 400 g de NaOH para preparar 1 L da solução desejada.

4.4 Metodologia para o Desenvolvimento dos Ensaio Experimentais

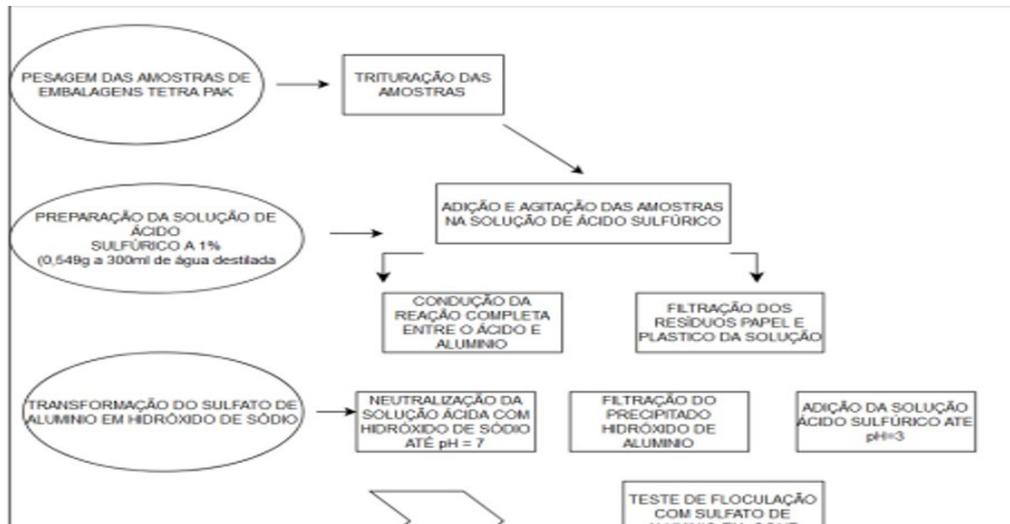
Para esse propósito, o processo teve início com a pesagem de 5 embalagens de leite, do tipo TetraPak, já higienizadas. Utilizou-se uma balança analítica para a pesagem das embalagens antes e após o processo de fragmentação. Isso é importante para garantir que a quantidade de material fosse consistente, para controlar a eficiência do processo de recorte e auxiliar a identificar e minimizar perdas durante o processo. Portanto, realizou-se a fragmentação das amostras, com o auxílio de uma tesoura, visando facilitar o processo reacional.

Aproximadamente 5,0 g da amostra triturada foram pesados e adicionados à solução ácida no reator de bancada (béquer), onde ocorreu a reação entre o alumínio presente nas embalagens e o ácido sulfúrico. O béquer, contendo a solução ácida com os fragmentos de embalagem, foi utilizado sobre um agitador com aquecimento por um período de 5h. A temperatura reacional será controlada com o auxílio de um termômetro. Após a obtenção da solução ácida contendo sulfato de alumínio e ácido sulfúrico residual, é necessário neutralizar o ácido que está presente no reator.

A solução será neutralizada adicionando hidróxido de sódio 10 N, com auxílio de um pHmetro, até que o pH atinja 7. Durante a adição do hidróxido de sódio na solução, formou-se um precipitado de hidróxido de alumínio, o qual foi separado utilizando-se funil e papel filtro. Em seguida, será adicionada a solução de ácido sulfúrico 1% ao hidróxido

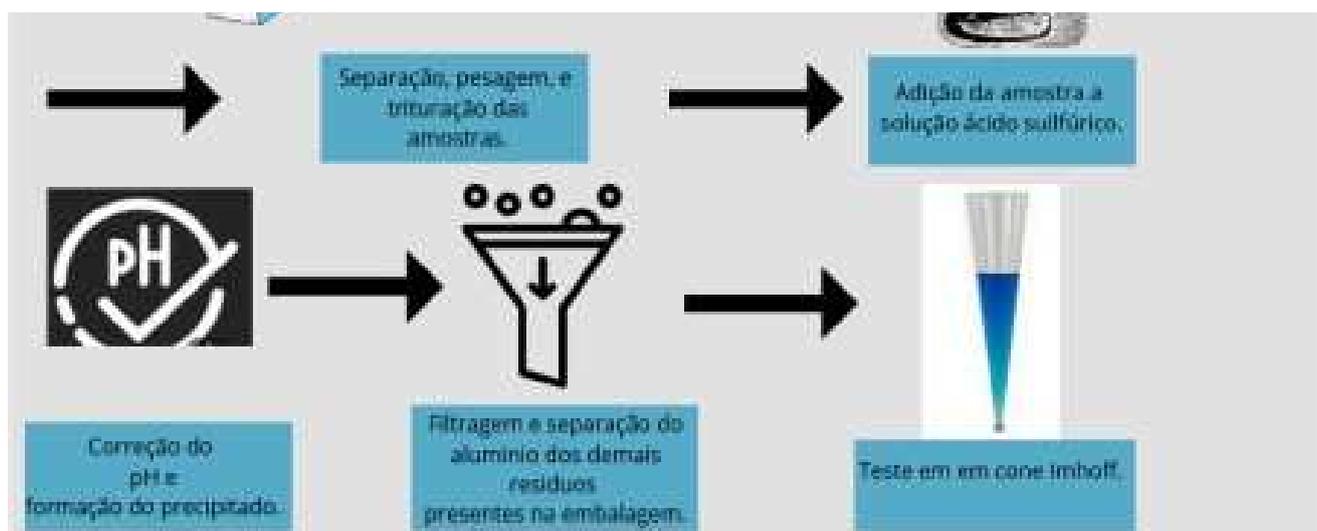
de alumínio até atingir um pH igual a 3. Isso garantirá que todo o hidróxido de alumínio seja convertido novamente em sulfato de alumínio, mas desta vez isento de papel e plástico. Nas Figuras 19 e 20 estão ilustrados como ocorre o processamento químico das embalagens TetraPak.

Figura 19 - Fluxograma do processamento químico de embalagens TetraPak



Fonte: Autor (2024)

Figura 20 - Processo de reciclagem química das embalagens TetraPak



Fonte: Autor (2024)

4.5 Teste de floculação utilizando o cone Imhoff com sulfato de alumínio reciclado de embalagens Tetra Pak

Neste estudo, foi conduzido um teste de floculação utilizando o Cone Imhoff para avaliar a eficácia do sulfato de alumínio obtido a partir da reciclagem química de embalagens Tetra Pak como agente floculante. Para isso, o sulfato de alumínio reciclado foi preparado de acordo com o procedimento descrito para a reciclagem química de embalagens Tetra Pak. Posteriormente, o aparato do Cone Imhoff foi montado e uma amostra representativa foi preenchida até a marcação apropriada, conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 10561:1988). Após um período determinado de repouso, procedeu-se à observação visual da clarificação da solução e da formação de flocos. A altura do sedimento formado no Cone Imhoff foi medida como um indicador da eficiência de floculação.

Este teste de floculação utilizando o Cone Imhoff permitiu avaliar diretamente a capacidade do sulfato de alumínio reciclado em promover a formação de flocos. A medição precisa do volume do material sedimentado no fundo do cone foi realizada

utilizando a escala graduada do Cone Imhoff.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a obtenção dos dados, a proporção do volume do material sedimentado em relação ao volume total da amostra foi determinada por meio da observação direta do volume depositado no recipiente de decantação, comparando-o com o volume total da amostra. Um maior volume de material sedimentado sugere uma melhor capacidade de floculação do sulfato de alumínio (Bó, 2011). Essa observação forneceu uma indicação inicial sobre a formação de flocos e a remoção de impurezas da solução, sugerindo um benefício para o tratamento de águas residuais industriais.

Foram separadas 5 porções de 5 g de amostras de embalagens trituradas e 5 porções de 5 g de papel filme alumínio para uso em testes primários. Esta fase inicial estabeleceu uma base sólida para a continuação do trabalho, focando na obtenção de alumínio e na avaliação da eficiência do método proposto em comparação com outras abordagens de reciclagem existentes. A Fotografia 21 ilustra as amostras recolhidas, trituradas e pesadas.

Fotografia 21 - Amostras para desenvolvimento dos experimentos e preparo de soluções



Fonte: Autor (2024)

A) Porções de 5g de embalagens trituradas; B) Papel alumínio utilizado para teste; C) Solução hidróxido de sódio

O gráfico 22 apresenta os principais fatores que influenciam a solubilização do alumínio presente em embalagens cartonadas em ácido sulfúrico. Esses fatores desempenharam um papel fundamental na eficiência e na segurança do processo, uma

vez que cada um contribuiu de forma específica para a dinâmica da reação química. A concentração do ácido, a temperatura da reação, a área de contato do material e a agitação são variáveis interdependentes que quando ajustadas adequadamente podem otimizar a dissolução do alumínio. Essa análise é essencial para compreender as condições ideais do processo e para minimizar os custos e impactos ambientais associados ao tratamento de resíduos.

Gráfico 22 - Fatores que Influenciam a Solubilização do Alumínio



Fonte: Silveira (2015)

Mecanismo de uma reação química é uma descrição detalhada dos processos que conduzem os reagentes aos produtos de uma reação, incluindo uma caracterização tão completa quanto possível da composição, da estrutura, da energia e de outras propriedades dos intermediários da reação, dos produtos e dos estados de transição. (Silveira., 2015)

Para monitorar o processo de dissolução do alumínio, foram registradas as temperaturas, velocidades de agitação e valores de pH a cada 1 hora, totalizando um período de 5 horas. Com os dados coletados, foram calculadas as médias de cada parâmetro, facilitando a análise dos resultados. Esses cálculos foram realizados utilizando o software Excel, garantindo precisão e organização dos valores obtidos. A tabela 1 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 1 - Média dos Parâmetros no Processo de Dissolução do Alumínio

TEMPO (H)	TEMPERATURA (° C)	VELOCIDADE (RPM)	PH
1	50	5	2,13
2	55	7	1,78
3	70	6,5	1,53
4	85	6	1,22/2,41
5	85	6	2,12
MÉDIA	70	6,1	1,89

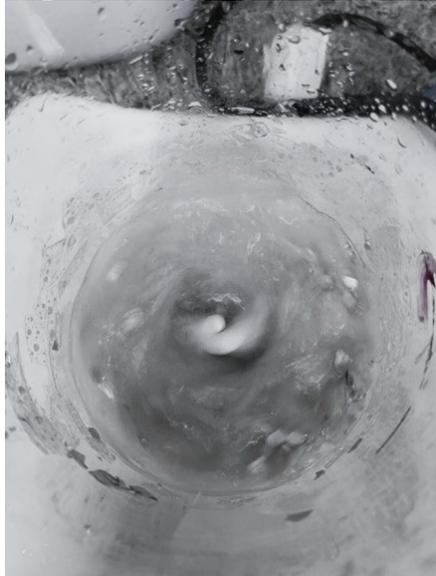
Fonte: Autor (2025)

Durante o experimento, as condições térmicas e a velocidade do sistema foram reguladas de acordo com o comportamento da transformação química. Além disso, o equilíbrio iônico foi acompanhado continuamente, sendo realizada a substituição da solução após um período de 4h, e sempre que houve redução da característica ácida da solução.

Durante o processo, a agitação magnética garantiu uma mistura homogênea permitindo que o ácido permanecesse em constante contato com o alumínio. Essa combinação de variáveis, cuidadosamente ajustadas, promoveu uma dissolução eficiente e controlada. Ao final do processo, obteve-se uma solução saturada contendo os produtos da reação, na qual o hidróxido de sódio é adicionado para promover a precipitação de compostos desejados e a separação final do alumínio em sua forma recuperada.

Adicionalmente, o teste em cone de Imhoff foi realizado para avaliar a sedimentação dos sólidos precipitados na solução. Esse procedimento permitiu monitorar a eficiência da separação e a qualidade do floco formado, fornecendo dados essenciais para a validação do processo. Na Fotografia 23 está representada a agitação aplicada às amostras durante o experimento para garantir a homogeneização dos materiais. Na Fotografia 24 ilustra-se o estágio de separação dos componentes plásticos e alumínio das embalagens cartonadas. Na Fotografia 25 pode-se visualizar a solução química saturada obtida após o processamento das amostras. Na Fotografia 26 tem-se o registro do teste realizado em cone Imhoff para análise da sedimentação dos resíduos gerados no experimento.

Fotografia 23 - Agitação das amostras



Fonte: Autor(2025)

Fotografia 24 - Separação plástico-alumínio



Fonte: Autor (2025)

Fotografia 25 - Solução saturada



Fonte: Autor (2025)

Fotografia 26 - Teste em cone Imhoff



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 2 apresenta as etapas do processo de solubilização do alumínio em ácido sulfúrico, destacando os tempos de agitação, as ações realizadas em cada fase e os resultados obtidos. Durante o experimento, o pH da solução foi constantemente monitorado para garantir a eficiência da reação. Sempre que a solução perdia acidez, indicando redução na concentração efetiva do ácido, ela era substituída por uma nova solução de ácido sulfúrico a 1N.

Uma dificuldade inicial enfrentada foi a presença de fragmentos metálicos de tamanho elevado, o que reduziu a área de contato disponível para a reação química e atrasou o processo de dissolução. Esse desafio foi superado com a fragmentação mais uniforme do material, otimizando as etapas subsequentes. A tabela detalha o progresso do processo, desde a separação das camadas até a obtenção do sulfato de alumínio para aplicação prática.

Tabela 2 - Cronograma das Etapas de Solubilização do Alumínio

TEMPO DE AGITAÇÃO(H)	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	RESULTADO
1	Separação do plástico, alumínio papel	Os materiais são segregados, com o alumínio sendo isolado
2	Solução substituída por uma nova. início da dissolução do alumínio	O alumínio começa a se dissolver Na solução ácida
3	Início da extração da solução saturada	Extração de uma solução saturada contendo os produtos da reação
4	Adição do hidróxido de sódio e reação com ácido sulfúrico residual,	Ajuste do pH da solução, promovendo a precipitação dos compostos desejados e neutralização do ácido sulfúrico residual
5	O hidróxido de alumínio precipitado foi separado da solução de sulfato de sódio Utilizando funil e papel filtro. Em seguida, o hidróxido foi tratado com solução de ácido sulfúrico 1%, ajustando o pH para 3 Para convertê-lo em sulfato de alumínio.	Obtenção do sulfato de alumínio, pronto para ser utilizado nos testes de floculação no cone imhoff

Fonte: Autor (2025)

A reciclagem de embalagens cartonadas utilizando processamento químico revelou-se um desafio significativo, mas também uma oportunidade promissora para a produção de sulfato de alumínio, um composto amplamente utilizado no tratamento de efluentes. Durante a execução do projeto, foram enfrentadas dificuldades consideráveis na reação do alumínio com o ácido, devido à presença de materiais como papel e plástico, que interferem no processo químico. Além disso, a perda de acidez ao longo do tempo e a necessidade de troca frequente da solução comprometeram a eficiência da reação e resultaram em uma quantidade limitada do produto.

A separação dos materiais constituintes das embalagens é considerada um fator essencial para otimizar o processamento químico. As técnicas utilizadas para a reciclagem das embalagens cartonadas podem ser classificadas em dois grupos: aquelas que processam todos os componentes conjuntamente e aquelas que incluem uma etapa

prévia para a remoção do papel. No primeiro caso, utilizam-se processos térmicos, como incineração, pirólise e gaseificação, com o objetivo de recuperar energia, embora esses métodos apresentam limitações devido às características das embalagens, como alto teor de umidade e presença de cinzas (Zawadiak et al., 2017). Já na segunda abordagem, a separação prévia do papel ocorre por meio da hidropulpação, um processo em que as fibras celulósicas são removidas na presença de água por meio de forças centrífugas, resultando na separação das camadas externas de LDPE e da liga plástica alumínio-polietileno (Al-PE) (Zawadiak et al., 2017).

Nesse contexto, a hidropulpação tem sido amplamente utilizada na indústria de papel e celulose como uma alternativa viável para a separação inicial dos componentes das embalagens longa vida, facilitando seu reaproveitamento na cadeia produtiva (Robertson, 2021). Além disso, destaca-se como um método de reciclagem mecânica que pode ser aplicado de forma econômica e operacionalmente viável em larga escala (Martinez et al., 2019).

Os resultados demonstraram que, no Brasil, existem iniciativas de reciclagem em empresas, principalmente com o destino de reciclar o alumínio e o papel, entre as pesquisas os resultados apontam o uso em telhados, isolantes térmicos em casas de madeira e outros objetos. Entre os participantes alguns conhecem algumas ações de reciclagem e reuso, não conseguem descartar corretamente por falta de coleta seletiva e entendem a necessidade de coletar esse lixo adequadamente para que ele tenha a destinação correta. Concluiu-se que há iniciativas que buscam resolver a reciclagem e o reuso das embalagens cartonadas, algumas ainda no campo experimental, o que pode ser precursor para um futuro menos agressivo ao planeta (Silva et al., 2022)

Os testes realizados neste estudo demonstraram que a reciclagem química pode ser integrada a sistemas de gestão de resíduos mais amplos, desde que precedida pela aplicação do método da hidrapulpação como etapa inicial. Essa abordagem, amplamente discutida na literatura, favorece a separação eficiente dos componentes das embalagens, minimizando interferências no processamento químico e melhorando a interação do alumínio com o agente reagente.

6 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a reciclagem de embalagens cartonadas por meio de processamento químico é uma alternativa viável para a obtenção de alumínio, um composto de alto valor na indústria. A aplicação do método experimental evidenciou desafios, como a interferência dos materiais plásticos e a necessidade de ajustes no processo de neutralização do ácido residual. No entanto, os resultados indicaram que a separação inicial das camadas da embalagem, especialmente pelo método de hidrapulpação, melhora a eficiência da recuperação do alumínio e contribui para a sustentabilidade do processo. Diante disso, a pesquisa reforça a necessidade de políticas públicas e incentivos para aprimorar a gestão de resíduos sólidos urbanos, promovendo a economia circular e a minimização dos impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado dessas embalagens.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE** (2022). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7758785/mod_resource/content/1/Panorama_Abrelpe_2022.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.
- Alfaia, C.** (2017). *Municipal Solid Waste in Brazil: A review*. Waste Management & Research. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- Batista, Blázquez, Calero, Lara, M. P.** (2021). *Recovery, separation and production of fuel, plastic and aluminum from the Tetra PAK waste to hydrothermal and pyrolysis processes*. Waste Management, 127, 15-25. DOI: <10.1016/j.wasman.2021.11.007>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- Bó, G. P., & Dias, M. L.** (2011). *Reciclagem de Embalagens Poliméricas Contendo Filme de Alumínio Metálico Via Processamento Químico*. Polímeros, 21(4), 255-263. DOI: <10.1590/S0104-14282011005000056>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- BRASIL.** (2010). *Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Casa Civil. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.html. Acesso em: 22 jun. 2024.
- Buryakovskaya, Y., Wang, X., & Li, J.** (2022). *Nanomaterials in waste treatment: Recent progress and future perspectives*. Materials, 15(23), 8699. DOI: <10.3390/ma15238699>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- Diop, L.** (2017). *Advances in chemical engineering: Innovative approaches for waste management*. American Journal of Chemical Engineering, 5(3), 45-56. e-ISSN: 2458-8156. DOI: <10.11648/j.ajche.20170503.12>. Acesso em: 15 mai. 2016.
- Ferreira..** (2019). *Análise de desempenho de um fogão solar funil construído a partir de embalagens Tetra Pak*. Universidade Estadual do Maranhão, Centro de Ciências Tecnológicas, Curso de Engenharia Mecânica. Acesso em: 20 jun. 2024.
- Jan Zawadiak, Szymon Wojciechowski, Tomasz Piotrowski, Alicja Krypa.** (2017). *Tetra Pak Recycling – Current Trends and New Developments*. American Journal of Chemical Engineering, 5(3), 37-42. DOI: <10.11648/j.ajche.20170503.12>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- Karaboyaci, S.** (2021). *Assessment methods for solid waste management: A comparative analysis*. Journal of Cleaner Production, 294, 129186. DOI: <10.1016/j.jclepro.2021.129186>. Acesso em: 11 mai. 2024.
- Kumar, S., & Samadder, S. R.** (2016). *A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste*. Waste and Biomass Valorization, 7(2), 421-438. DOI: <10.1007/s12649-016-9605-2>. Acesso em: 17 mai. 2024.

Ma, J. R. (2018). *Innovations in waste management: New strategies for sustainable cities*. Science Progress, 101(2), 123-145. DOI: <10.3184/003685018X15215434299329>. Acesso em: 11 mai. 2024.

Miler, M. (2022). *Gestão de resíduos sólidos urbanos: desafios e perspectivas no contexto brasileiro*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/18714/Matheus%20Miler.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. Acesso em: 15 mai. 2024.

Moraes, A. L. (2023). *Conscientização ambiental: Utilização de embalagem cartonada (Tetra Pak) para confecção de abrigo para pets*. Research, Society and Development, 12(13), e89121344218. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i13.44218>. Acesso em: 20 jun. 2024.

Morais, J. R., & Silva, M. A. (2023). *Embalagens Tetrapak e os desafios para o meio ambiente*. Research, Society and Development, 8(5), 1-15. DOI: <10.51891/rease.v8i5.5391>.

Silva, S. (2023). *A importância da reciclagem de Tetrapak (caixas longa vida) nas unidades offshore*. Zenodo. DOI: <10.5281/zenodo.10951065>. Acesso em: 30 mai. 2024.