

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Carlos Henrique de Paula Paiva
Vitor Alexandre Santos da Silva



A RECICLAGEM DE EMBALAGENS PLÁSTICAS
ALIMENTÍCIAS: LEGISLAÇÕES VIGENTES E SEUS IMPACTOS

RIO DE JANEIRO

2023

Carlos Henrique de Paula Paiva
Vitor Alexandre Santos da Silva

A Reciclagem de Embalagens Plásticas Alimentícias: Legislações vigentes e
seus impactos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Bettina Susanne Hoffmann
Fábio de Almeida Oroski

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

da Silva, Vitor Alexandre Santos
 0237r A RECICLAGEM DE EMBALAGENS PLÁSTICAS
 ALIMENTÍCIAS: LEGISLAÇÕES VIGENTES E SEUS IMPACTOS /
 Vitor Alexandre Santos da Silva. -- Rio de Janeiro,
 2023.
 45 f.
 Orientador: Bettina Hoffmann.
 Coorientador: Fábio Oroski.
 Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
 Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.
 I. Reciclagem. 2. Embalagens. 3. Legislação. I.
 Hoffmann, Bettina, orient. II. Oroski, Fábio,
 coorient. III. Título.

Carlos Henrique de Paula Paiva

Vitor Alexandre Santos da Silva

A RECICLAGEM DE EMBALAGENS PLÁSTICAS ALIMENTÍCIAS: LEGISLAÇÕES
VIGENTES E SEUS IMPACTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em 18 de dezembro de 2023.

Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc., UFRJ

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc., UFRJ

Flávia Chaves Alves, D.Sc., UFRJ

Rafael Eudes Ferreira, B.Sc., Aliança Resíduo Zero Brasil

Rio de Janeiro

2023

RESUMO

de Paula Paiva, Carlos Henrique; Santos da Silva, Vitor Alexandre. **A Reciclagem de Embalagens Plásticas Alimentícias: Legislações vigentes e seus impactos**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Ao contrário do modelo linear, que gera resíduos e esgota os recursos naturais, a economia circular visa criar sistemas sustentáveis, reduzindo a pressão sobre o meio ambiente e fomentando a inovação através da reinserção de materiais pós-consumo na cadeia produtiva. O presente trabalho visa analisar e comparar as regulamentações sobre embalagens plásticas alimentícias e suas práticas de reciclagem no Brasil e na Europa. Ambos os territórios enfrentam desafios significativos relacionados à gestão sustentável de resíduos plásticos, especialmente no setor alimentício, onde o consumo dessas embalagens é substancial. No entanto, as diferenças na implementação e na rigidez das regulamentações refletem desafios econômicos e culturais distintos. A reciclagem de embalagens plásticas alimentícias emerge como um ponto crucial em ambas as jurisdições. Indicadores como taxa de reciclagem efetiva e a incorporação de plásticos reciclados na produção de novos produtos são essenciais para mensurar o impacto das regulamentações existentes. A compreensão dessas regulamentações e aplicações práticas, tal como seus impactos nos indicadores mencionados é de suma importância para políticas futuras e promover a transição para sistemas mais sustentáveis de gestão de resíduos plásticos. Utilizando-se as plataformas oficiais brasileiras e da Comissão Europeia, foram levantadas as principais legislações vigentes, no Brasil e na Europa, acerca do tema de gerenciamento de resíduos, reciclagem de materiais plásticos e regulamentação de embalagens alimentícias. Através de indicadores como índices de reciclagem, taxa de utilização de capacidade de recicladoras de plásticos e produção de garrafas plásticas utilizando PET reciclado, foi mostrado que ainda existe uma necessidade de atenção e ampliação regulatória para obtenção de resultados que levem a uma economia circular mais eficiente na indústria de embalagens, ou seja, fechamento do ciclo *bottle-to-bottle*.

Palavras-chave: reciclagem, plástico, alimentício.

ABSTRACT

de Paula Paiva, Carlos Henrique; Santos da Silva, Vitor Alexandre. **A Reciclagem de Embalagens Plásticas Alimentícias: Legislações vigentes e seus impactos**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Unlike the linear model, which generates waste and depletes natural resources, the circular economy aims to create sustainable systems, reducing pressure on the environment and fostering innovation through the reinsertion of post-consumer materials into the production chain. The present work aims to analyze and compare regulations on plastic food packaging and recycling practices in Brazil and Europe. Both regions face significant challenges related to the sustainable management of plastic waste, particularly in the food sector, where the consumption of such packaging is substantial. However, differences in implementation and the strictness of regulations reflect distinct economic and cultural challenges. The recycling of plastic food packaging emerges as a crucial point in both jurisdictions. Indicators such as the effective recycling rate and the incorporation of recycled plastics into the production of new products are essential for measuring the impact of existing regulations. Understanding these regulations and practical applications, as well as their impact on the mentioned indicators, is of utmost importance for future policies and promote the transition to more sustainable systems for plastic waste management. Using the official Brazilian and European Commission platforms, the main legislation in force in Brazil and Europe about waste management, recycling of plastic materials and regulation of food packaging was studied. Through indicators such as recycling rates, capacity utilization rate of plastic recyclers and production of plastic bottles using recycled PET, it was shown that there is still a need for attention and regulatory expansion to obtain results that lead to a more efficient circular economy in the packaging industry, that is, closing the bottle-to-bottle cycle.

Keywords: recycling, plastic, food.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma da metodologia de pesquisa	16
Figura 2. Ferramenta de busca da plataforma EUR-Lex.....	18
Figura 3. Estrutura do banco de dados Eurostat	20
Figura 4. Diferenças estruturais entre polietilenos de diferentes densidades.....	22
Figura 5. Etapas de iniciação e propagação da poliadição	23
Figura 6. Símbolo de identificação do PEAD E PEBD	24
Figura 7. Unidade repetitiva do polietileno tereftalato (PET).....	25
Figura 8. Reação de transesterificação do tereftalato de dimetila	26
Figura 9. Reação de esterificação do ácido tereftálico.....	26
Figura 10. Síntese de um poliéster via reação de condensação entre dois monômeros.....	27
Figura 11. Síntese de um poliéster a partir de um único monômero bifuncional.....	27
Figura 12. Símbolo de identificação do PET	28
Figura 13. Limites de concentração de metais e metaloides em corantes.....	29
Figura 14. Esquema de reciclagem mecânica do PET	30
Figura 15. Diferentes processos de solvólise do PET e seus produtos.	33
Figura 16. Reação de pirólise do PE.....	34
Figura 17. Quatro fases principais do processo de gaseificação de resíduos plásticos.....	36
Figura 18. Linha do tempo das legislações brasileiras	42
Figura 19. Hierarquia de gerenciamento de resíduos adotada pela diretiva 2008/98/EC - WFD	43
Figura 20. Ecolabel	44
Figura 21. Linha do tempo das legislações da União Europeia	46
Figura 22. Mapa de implementação de impostos a resíduos de embalagens plásticas (2023). 47	
Figura 23. Rótulo Pfand	49
Figura 24. Porcentagem de coleta de garrafas PET em 2022 na Europa	50
Figura 25. Linha do tempo das regulamentações de embalagens alimentícias – Brasil	55
Figura 26. Símbolo indicativo do uso do material para embalagens alimentícias	58
Figura 27. Linha do tempo das regulamentações de embalagens alimentícias – UE.....	64
Figura 28. Volume de resíduo plástico consumido na reciclagem nacional em 2022.....	66
Figura 29. Índice de reciclagem de resíduos plásticos no Brasil.....	67
Figura 30. Índice de reciclagem histórico de plástico PCR no Brasil	68
Figura 31. Produção e índice de reciclagem de PET-PCR no Brasil.....	68

Figura 32. Produção histórica de plástico PCR no Brasil	69
Figura 33. Quantidade de produtos PET-PCR com registro ativo na Anvisa	70
Figura 34. Evolução do cadastro de produtos PET-PCR na Anvisa.....	71
Figura 35. Parcela de resina PET-PCR destinada à produção de garrafas - Brasil	71
Figura 36. Capacidade nominal e taxa de utilização de recicladoras <i>bottle-to-bottle</i> (PET-PCR) no Brasil	72
Figura 37. Índice histórico de reciclagem de embalagens plásticas na Europa.....	73
Figura 38. Coleta de PET, capacidade e produção de PET-PCR na Europa.....	74
Figura 39. Exportações/importações de resíduo plástico na Europa	75
Figura 40. Parcela de resina PET-PCR destinada à produção de garrafas - Europa	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo entre os três principais métodos de reciclagem química.....	37
Tabela 2. Metas de reciclagem de embalagens plásticas e coleta seletiva.....	40
Tabela 3. Meios simulantes segundo a Anvisa.....	52
Tabela 4. Relação entre tipos de alimentos e meios simulantes a serem utilizados segundo a Anvisa	53
Tabela 5. Limite de migração de elementos em corantes	54
Tabela 6. Grupos de restrição segundo a diretriz N° 10/2011.....	60
Tabela 7. Limites de migração específicos	61
Tabela 8. Meios simulantes padronizados (Europa).....	61
Tabela 9. Participação percentual de cada material de embalagem por valor bruto de produção do mercado de embalagens de 2020 a 2022.....	66
Tabela 10. Empresas com registro de embalagens contendo PET-PCR no Brasil.....	70
Tabela 11. Países europeus com maior quantidade de instalações autorizadas pela EFSA.....	75
Tabela 12. Metas estabelecidas pelos maiores produtores de garrafas PET alimentícias na Europa	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abipet Associação Brasileira da Indústria do PET

Abiplast Associação Brasileira da Indústria do Plástico

Anvisa Agência Nacional de Vigilância Sanitária

C.E. Comissão Europeia

CEAP *Circular Economy Action Plan*

EFSA *European Food Safety Authority*

EPR *Extended Producer Responsibility*

GECEX Comitê Executivo de Gestão

GEE Gás de Efeito Estufa

HDPE *High-Density Polyethylene*

LDPE *Low-Density Polyethylene*

MDIC Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços

PCR *Post consumer recycled*

PE Polietileno

PET Poli(etileno tereftalato)

PP Polipropileno

p.p. Pontos percentuais

PPWD *Packaging and Packaging Waste Directive*

RDC Resolução da Diretoria Colegiada

RTM Regulamento Técnico Mercosul

UE União Europeia

WFD *Waste Framework Directive*

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Objetivo da pesquisa.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	Metodologia de pesquisa	16
2.1	Busca de legislações do Brasil	17
2.2	Busca de legislações da Europa	17
2.3	Busca de dados do Brasil	18
2.4	Busca de dados da Europa	19
3	Fundamentos técnicos de produção e reciclagem de PE e PET	21
3.1	Processos de síntese de PE e PET	21
3.1.1	Síntese e propriedades físicas de polímeros.....	21
3.1.1.1	PE.....	21
3.1.1.2	PET.....	24
3.1.2	Aditivos mais utilizados.....	28
3.2	Tecnologias de reciclagem de polímeros.....	30
3.2.1	Reciclagem mecânica	30
3.2.2	Reciclagem química.....	31
3.2.2.1	Solvólise	32
3.2.2.2	Pirólise.....	33
3.2.2.3	Gaseificação.....	35
3.2.2.4	Comparativo entre os principais métodos de reciclagem química	36
3.3	Características esperadas para plásticos de embalagens alimentícias	37
4	Arcabouço legal	39
4.1	Legislação geral.....	39

4.1.1	Legislação em vigor no Brasil.....	39
4.1.2	Legislação na União Europeia.....	42
4.1.2.1	Implementação em nível nacional	47
4.2	Regulamentação de embalagens alimentícias	51
4.2.1	No Brasil	51
4.2.1.1	Material reciclado em embalagens alimentícias - Brasil.....	55
4.2.2	Na União Europeia	58
4.2.2.1	Material reciclado em embalagens alimentícias	62
5	Estatísticas e metas de reciclagem de plásticos	66
5.1	No Brasil	66
5.2	Na União Europeia	72
6	Discussão	77
7	Conclusão	81
8	Referências	83

1 Introdução

1.1 Contextualização

As embalagens desempenham um papel decisivo na construção de vantagens competitivas na indústria de alimentos. Assim, enfrentar o desafio constante de atender às demandas dos consumidores torna-se essencial, exigindo a oferta de embalagens modernas e práticas, capazes de preservar os alimentos de maneira ambientalmente sustentável e economicamente viável (SOARES, 2009). Dentre o grupo de embalagens, destacam-se na discussão sobre a sustentabilidade ambiental, as embalagens plásticas.

O plástico rapidamente se tornou uma das classes de materiais mais utilizadas do mundo. Desejados por suas propriedades de alta estabilidade química, maleabilidade, baixo custo e durabilidade, os plásticos dominaram parte significativa de nossas vidas. Estão presentes nas roupas, carros, eletrônicos e nas embalagens de comida. Porém, sua alta durabilidade traz consigo um grande problema: sua destinação após o consumo. Ao longo dos últimos 50 anos, notícias cada vez mais preocupantes vêm surgindo quanto a presença de plásticos e microplásticos nos pontos mais distantes do planeta, até ao ponto de ser encontrado resíduo plástico na Fossa das Marianas em 2019, o ponto mais profundo conhecido do Oceano Pacífico (MORELLE, 2019).

Todo dia, o equivalente a 2000 caminhões de lixo cheios de plástico é despejado nos oceanos, rios e lagos ao redor do planeta. Desde 1950, aproximadamente 9,2 bilhões de toneladas de plástico foram produzidas (UNEP).

A economia circular representa uma alternativa ao modelo linear convencional, onde recursos e matérias-primas são extraídos, utilizados e então descartados. Neste sistema, os produtos e materiais são reutilizados ou reaproveitados, reintegrando a cadeia produtiva e, desta forma, reduzindo desperdícios, geração de resíduos e impactos ambientais. Todavia, a transição do modelo linear de produção para o circular não é uma tarefa simples e direta. Novos processos e tecnologias são utilizados para o reuso adequado dos materiais após seu consumo (STAHEL, 2016).

Nos últimos anos, diversas definições emergiram, e o conceito de Logística Reversa tem gradualmente abraçado novas atividades dentro do ciclo inverso dos produtos. Essa perspectiva

é reforçada pela evolução no entendimento da Logística Reversa ao longo das últimas décadas, não apenas em termos de definição, mas também no que diz respeito às atividades e à sua abrangência. Inicialmente concebida principalmente como uma prática de distribuição, a Logística Reversa adquiriu rapidamente importância no cenário organizacional, assumindo maior responsabilidade em todas as atividades relacionadas ao retorno de produtos (SOUZA, 2010). Este conceito se estende a diversos materiais, dentre eles o plástico, um material que pode ser reprocessado via tecnologias de reciclagem e novamente inserido no mercado para geração de novos produtos.

Em 2015, a ONU (Organização das Nações Unidas), por meio das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, desenvolveu a Agenda 2030 com o objetivo de promover ações para garantir padrões de produção e consumo sustentáveis em esfera global com a adesão de todos os seus 193 estados membros. Dentre os objetivos a se alcançar até o ano de 2030, o 12.5 visa “Reduzir substancialmente a produção de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso”. Entretanto, esta meta não atribui uma porcentagem exata de redução até a data estipulada. Além desta, pode-se pontuar a meta 12.6 que trata de incentivo às empresas para adoção de práticas de responsabilidade socioambiental.

No Brasil, o setor alimentício é um dos maiores consumidores de plásticos, com uma parcela de 21,9% do total, atrás apenas da área da construção civil. Do total de plásticos consumidos no país, aproximadamente 40% são materiais de ciclo curto, que têm estimativa de uso de até 1 ano (ABIPLAST, 2022). No setor alimentício, os plásticos se apresentam comumente na forma de embalagens, garrafas, filmes e tampas, materiais que normalmente servem seu propósito apenas até o momento de consumo do alimento, sendo descartados em seguida (FOODPRINT, 2019). Para permitir o retorno destes materiais à cadeia produtiva, processos de garantia de qualidade sanitária são exigidos de forma a assegurar a saúde humana ao serem reinseridos no mercado. Tais processos podem reduzir a atratividade econômica deste mercado para empresas que realizam o reprocessamento de materiais alimentícios. Desta forma, instrumentos legais se tornam essenciais para incentivar a entrada de novos fabricantes neste mercado e direcionar a produção de plásticos reciclados de grau alimentício.

1.2 Objetivo da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento do arcabouço regulatório relacionado à reciclagem de plásticos utilizados para embalagens de alimentos e verificar se pode ser observada uma relação com as taxas de reciclagem de embalagens, focando nos materiais polietileno (PE) e polietileno tereftalato (PET), no Brasil e na Europa.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem no:

- levantamento de tendências tecnológicas na área de reciclagem;
- levantamento das legislações vigentes e projetos de lei no Brasil e na União Europeia;
- levantamento de limitações regulatórias quanto ao tipo de materiais plásticos permitidos para utilização em embalagens alimentícias;
- levantamento do histórico de taxas de reciclagem dos polímeros das regiões em questão;
- discussão sobre seus impactos no avanço das taxas de reciclagem de resíduos de embalagens plásticas.

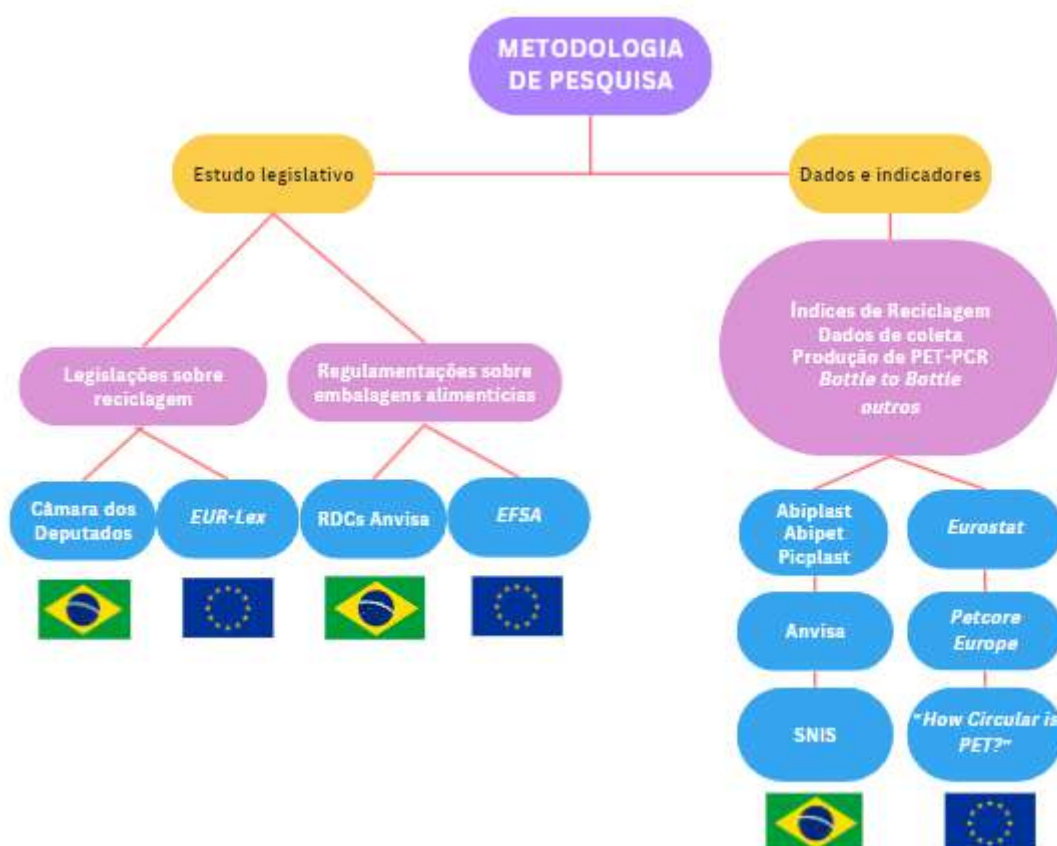
2 Metodologia de pesquisa

Para o desenvolvimento de um estudo que visa entender o cenário brasileiro no que diz respeito a reciclagem de embalagens plásticas alimentícias, foram utilizadas duas buscas distintas.

A primeira parte, descrita em 2.1 e 2.2, trata de um estudo relacionado ao arcabouço legal relacionado a reciclagem de embalagens plásticas e sua utilização para a confecção de embalagens a entrarem em contato com alimentos. Nesta proposta, foram apresentadas legislações brasileiras e da União Europeia no Capítulo 4.

A segunda busca, descrita em 2.3 e 2.4, trata da busca de dados fundamentais para o entendimento do cenário da reciclagem de embalagens plásticas e da utilização de polímero reciclado quando estas entrarão em contato com alimentos. Para isso, foram buscados dados como índices de reciclagem, produção de plásticos PCR (Pós-Consumo Reciclado), produtos de PET-PCR registrados, taxa de retorno de embalagens plásticas e abrangência da coleta seletiva. Desta forma, estes dados são apresentados no Capítulo 5.

Figura 1. Fluxograma da metodologia de pesquisa



Fonte: Elaboração própria

2.1 Busca de legislações do Brasil

Com relação a parte legislativa brasileira abordada nos Tópicos 4.1.1 e 4.2.1, o acesso aos decretos e legislações foi realizado pelo website da Câmara dos Deputados (<https://www.camara.leg.br/legislacao>). Neste, também houve o acesso ao documento de consultoria legislativa denominado “Créditos de Logística Reversa: Estado Atual e Oportunidades de Melhoria” sendo este utilizado para o levantamento de parte das legislações abordadas.

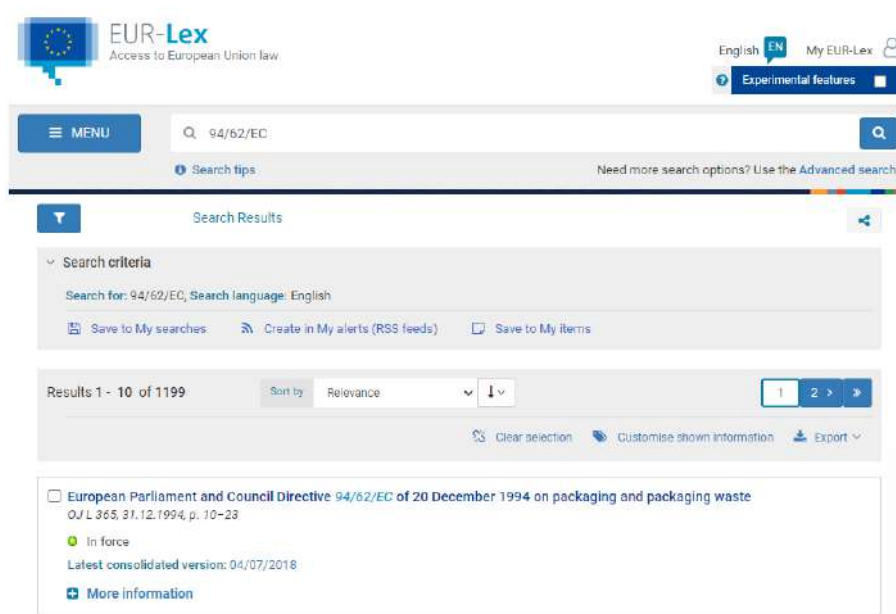
Ademais, o acesso às resoluções da Anvisa foi realizado pelo website (<https://www.gov.br/anvisa/pt-br>) da mesma, dentro do portal gov, sendo este acessado de agosto a setembro de 2023 para a pesquisa. Além disso, também pelo próprio portal, realizou-se uma consulta ao Informe Técnico nº 71, de 11 de fevereiro de 2016 que trata sobre o “Uso de PET reciclado em embalagens e outros materiais destinados ao contato com alimentos” para um entendimento mais amplo de algumas RDCs. Para acesso ao informe técnico, foi realizada uma busca no próprio website utilizando os termos “PET reciclado embalagens”. Ademais, utilizou-se a página do CETEA (Centro de Tecnologia de Embalagem) no link <https://ital.agricultura.sp.gov.br/cetea> pelo portal do governo do estado de São Paulo também como fonte de consulta à boletim informativo, sendo este o Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens denominado “Panorama dos regulamentos da Anvisa sobre materiais plásticos para contato direto com alimentos e a atualização da Resolução RDC n. 17/2008”.

2.2 Busca de legislações da Europa

As ações, regulamentações e diretrizes europeias deste estudo acerca da produção de embalagens, manuseio e transporte de resíduos, requisitos de reciclagem e a regulamentação de embalagens plásticas alimentícias foram mapeadas através de buscas, realizadas em inglês, utilizando as palavras-chave relevantes ao tema como: “*european union*”, “*commission*”, “*directives*”, “*legislation*”, “*regulation*”, “*packaging*”, “*plastic*”, “*waste*”, “*recycling*”, “*food contact*” e “*EFSA*”. Para citar as leis, diretrizes e regulamentações, os websites oficiais das organizações foram consultados. Para o caso de ações da C.E. (Comissão Europeia), a plataforma EUR-Lex (Figura 2) foi consultada (<https://eur-lex.europa.eu>). Para regulamentações envolvendo embalagens alimentícias, o portal da EFSA foi utilizado (<https://www.efsa.europa.eu>). Relatórios informativos como o “*PET Market in Europe: State*

of Play” também foram retirados do site da *Plastics Recyclers Europe* (<https://www.plasticsrecyclers.eu>) no auxílio da consulta das principais legislações sobre reciclagem de plásticos.

Figura 2. Ferramenta de busca da plataforma EUR-Lex



Fonte: portal EUR-Lex

2.3 Busca de dados do Brasil

Para busca de dados sobre o consumo de plástico, geração de resíduos, índices de reciclagem e outras informações relevantes acerca do cenário brasileiro, os informativos e relatórios da Abiplast (Associação Brasileira da Indústria do Plástico) foram consultados através de seu website oficial (<https://www.abiplast.org.br/>). Dados dos 9º, 10º, 11º e 12º Censos da Reciclagem do PET no Brasil foram obtidos através do website oficial da Abipet (Associação Brasileira da Indústria do PET) (<https://abipet.org.br/>). Como o 9º Censo da Reciclagem do PET no Brasil não estava disponível no website da Abipet, dados deste foram retirados de uma matéria no website da revista Plástico Moderno (<https://www.plastico.com.br/>). O webinar “Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil” da MaxiQuim, contendo os dados mais recentes utilizados neste trabalho na seção 5.1 foi acessado pelo website oficial da Abiplast. Para obtenção dos valores de índice de reciclagem para outros polímeros, foram utilizados os perfis anuais fornecidos pela Abiplast.

Para o dado de parcela da população urbana não atendida pela coleta seletiva domiciliar no Brasil apresentado no tópico 0 foram utilizados dados do SNIS, sendo o indicador utilizado respondido por 1346 municípios. Estes dados foram acessados por meio do portal gov, através do website oficial do SNIS <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos_snis>. Sendo assim, ao clicar em “baixar as tabelas”, foi realizado o download de uma pasta com planilhas de excel contendo os indicadores. No arquivo “Planilha_Indicadores_RS_2021” foram utilizadas as seguintes colunas:

- Total População Urbana;
- Taxa de cobertura da col. Seletiva porta a porta em relação a pop. Urbana (indicador IN030).

Com relação aos dados de registros de embalagens contendo PET PCR na Anvisa apresentados no Tópico 5.1, estes foram coletados na parte direcionada a alimentos no website da mesma <<https://consultas.anvisa.gov.br/#/alimentos/>>. No filtro de buscas foi utilizada apenas a opção “EMBALAGENS NOVAS TECNOLOGIAS (RECICLADAS)”.

Além disso, uma planilha com os registros ativos e vencidos foi baixada pelo mesmo sistema. Nela localizou-se as datas de registro de cada produto de PET-PCR para obtenção da evolução histórica dessas licenças no Brasil, também apresentadas no Tópico 5.1.

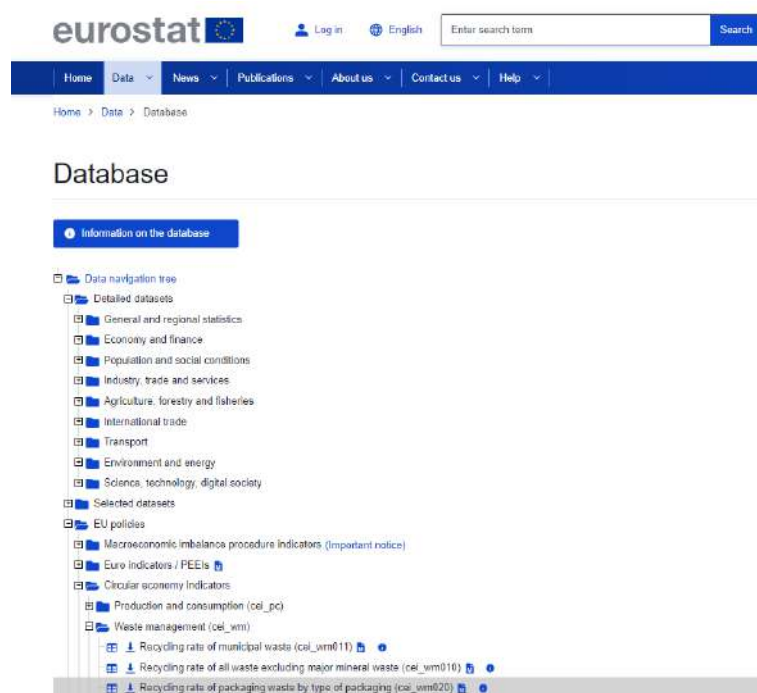
Por fim, para a parte de importação de resíduos plásticos foram utilizados dados do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) também acessados por meio do portal gov através do website <<https://www.gov.br/mdic/pt-br>>.

2.4 Busca de dados da Europa

Para buscas de dados sobre os índices de reciclagem de embalagens plásticas e volumes de exportação/importação de resíduos plásticos da União Europeia, o banco de dados oficial da C.E., Eurostat, foi utilizado (<https://ec.europa.eu/eurostat>). Através da árvore hierárquica de dados do website, foi utilizado o caminho: “*Detailed datasets > Environment and energy > Environment > Waste streams*”. As tabelas “*Trade in waste by type of material and partner*” e “*Recycling rates of packaging waste for monitoring compliance with policy targets, by type of packaging*” foram baixadas. Para a primeira, foi alterado o filtro “*Raw materials*” para “*Plastics*”, selecionou-se todos os anos disponíveis (de 1997 a 2021) e então, exportada. Para a segunda tabela, foi alterado o filtro “*Waste categories*” para “*Plastic packaging*”, selecionou-

se todos os anos disponíveis (de 1997 a 2021) e selecionou-se “France”, “Spain”, “Germany” e “European Union – 27 countries (from 2020)” no filtro “Geopolitical entity (reporting)”. Estes países foram selecionados para apresentar heterogeneidade de valores de índices de reciclagem entre os países da UE.

Figura 3. Estrutura do banco de dados Eurostat



Fonte: portal Eurostat

Além deste, o website oficial da Petcore Europe (<https://www.petcore-europe.org>), associação do PET na Europa, foi utilizado para acessar os dados mais recentes acerca dos índices de reciclagem, padrões de consumo e volumes de produção de PET reciclado na Europa. O material disponível no website oficial (<https://www.plasticsrecyclers.eu/>) da Plastic Recyclers Europe foi consultado para obtenção de dados de reciclagem na Europa. Para tal, suas publicações, como a “PET Market in Europe: State of Play 2022” e a “Plastics Recycling Industry in Europe, 2021 data” foram obtidas.

Para dados de destinação de consumo para o PET reciclado (percentual utilizado na produção de garrafas plásticas), o relatório “How circular is PET?” realizado pela Eunomia foi utilizado. Este foi acessado através do website oficial da Zero Waste Europe (<https://zerowasteurope.eu>).

3 Fundamentos técnicos de produção e reciclagem de PE e PET

3.1 Processos de síntese de PE e PET

Polímeros são moléculas de elevado peso molecular, contendo de milhares a milhões de átomos numa única molécula que apresenta unidades estruturais repetitivas ao longo de sua cadeia. São produzidos a partir da reação entre monômeros, os blocos de construção dos polímeros. Através dos métodos de polimerização, os monômeros são adicionados repetidamente a uma cadeia. A elevada extensão molecular é o que confere aos plásticos (os polímeros sintéticos) suas principais características (MANO, 1999).

Moléculas menores como os monômeros apresentam um único valor de peso molecular, ou seja, todas as moléculas de monômero são do mesmo tamanho – são monodispersas. Já os polímeros são polidispersos – um único polímero contém cadeias poliméricas de diferentes tamanhos e massas moleculares, variando o número de unidades repetitivas presentes em cada cadeia (CHANDA, 2008). Essa é outra característica de polímeros importante para determinação de suas propriedades físico-químicas: seu peso molecular médio.

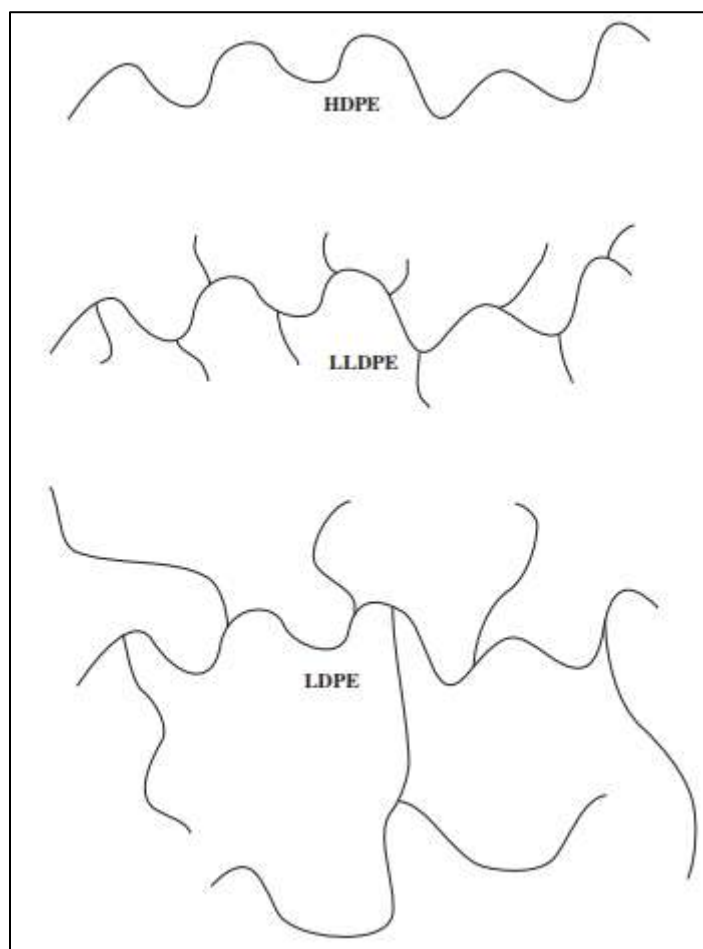
3.1.1 Síntese e propriedades físicas de polímeros

3.1.1.1 PE

O polietileno é um termoplástico produzido comercialmente a partir da polimerização do etileno (C_2H_4), sendo um dos polímeros mais utilizados no mundo devido ao seu baixo custo e às propriedades que apresenta, levando a uma gama de aplicações (como filmes, embalagens e tampas plásticas na indústria de alimentos) e sendo, portanto, considerado uma *commodity*.

Por volta de 1954, dois métodos foram desenvolvidos, sendo eles os processos Phillips e Ziegler. Enquanto o processo Phillips utiliza óxidos metálicos como catalisadores, o processo Ziegler, utiliza alquilalumínio para esta função, fazendo com que em ambos os casos, a produção do polietileno possa ser realizada em temperaturas e pressões mais baixas. Essas novas condições, por sua vez, promovem uma modificação estrutural que leva a um aumento de densidade e dureza do polímero. Portanto, ao utilizar esses métodos é possível obter um material caracterizado como polietileno de alta densidade (PEAD), enquanto os produzidos anteriormente à elaboração deste método ficaram conhecidos como polietileno de baixa densidade (PEBD), tendo propriedades e aplicações muito distintas entre si (THIOUNN, 2020). As diferenças estruturais podem ser observadas na Figura 4.

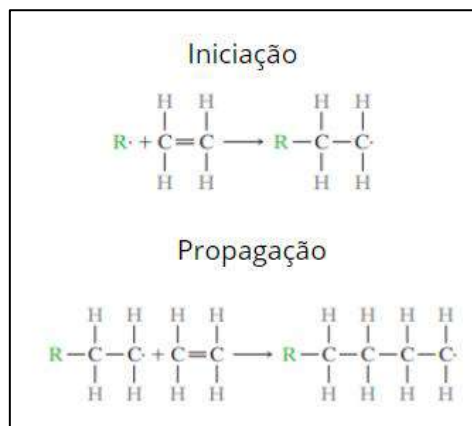
Figura 4. Diferenças estruturais entre polietilenos de diferentes densidades



Fonte: THIOUNN, 2020.

O polietileno é produzido a partir de uma reação de poliadição. As reações em cadeia, ou poliadições são processos de formação de macromoléculas lineares partindo de unidades monoméricas contendo ligação dupla, fazendo com que o produto molecular final seja gerado por meio de reação exotérmica devido ao rompimento da insaturação (CANEVAROLO JR., 2006). Estas reações possuem três etapas sequenciais, sendo elas a iniciação, a propagação e a terminação. Na primeira etapa, um catalizador (iniciador) atua de forma a romper a dupla ligação da unidade monomérica formando um primeiro centro ativo radicalar, e instável por consequência. Em seguida, inicia-se uma segunda etapa, chamada propagação, onde ocorre o crescimento da cadeia polimérica linear por meio da reação do centro ativo radicalar com novas unidades monoméricas (CALLISTER, 2010). A Figura 5 ilustra as etapas de iniciação e propagação da reação de poliadição.

Figura 5. Etapas de iniciação e propagação da poliadição



Fonte: Adaptada de CALLISTER, 2010.

Por fim, a etapa de terminação pode ocorrer de formas distintas, sendo uma delas por meio da ligação entre as extremidades ativas (carbonos radiculares) de duas cadeias formando uma única macromolécula por meio da ligação simples C-C. Uma segunda opção ocorre principalmente na presença de grupos laterais volumosos por meio do processo de desproporcionamento, no qual há uma transferência intermolecular de hidrogênio para o carbono radicalar do mero receptor finalizando a propagação da cadeia e, conseqüentemente, formando uma ligação dupla no mero que o doou, também promovendo o término de sua propagação. Assim como a transferência que ocorre no desproporcionamento, há também a possibilidade de um hidrogênio de um ponto qualquer de uma cadeia ser atacado pelo carbono radicalar de outra, fazendo com que uma das cadeias interrompa sua propagação enquanto a segunda adquira um novo centro ativo, sendo esse tipo de terminação, nomeado transferência de cadeia, bem comum na polimerização do polietileno de baixa densidade (PEBD). Por fim, no mecanismo de transferência para o solvente, hidrogênios provenientes da oxidação de determinados solventes podem atuar como terminadores de propagação (CANEVAROLO JR., 2006).

As polimerizações por adição são utilizadas para a produção de diversos polímeros como policloreto de vinila (PVC), poliestireno, polipropileno e um dos polímeros de interesse para esse estudo: polietileno.

Com relação ao processamento do polietileno, aproximadamente três quartos deste polímero é modulado via processos de extrusão, enquanto o restante pode ocorrer tanto por injeção quanto por compressão. O processo por extrusão, por sua vez, pode ser realizado de duas formas a depender do formato e tamanho da peça desejada. O primeiro conta com um molde no qual o material é despejado para a produção de objetos grandes, uma vez que o custo

de aquisição dos moldes fundidos para esse processo é bem baixo. Todavia, para a produção de garrafas e alguns outros utensílios ocios, as técnicas de extrusão por sopro são as mais utilizadas (ROSATO, 2004).

De acordo com a NBR 13230:2008 – Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis – identificação e simbologia, o PEAD recebe a numeração 2 como identificação, enquanto o PEBD recebe a numeração 4, e estas devem estar presentes nas embalagens desses materiais como mostra a Figura 6.

Figura 6. Símbolo de identificação do PEAD E PEBD

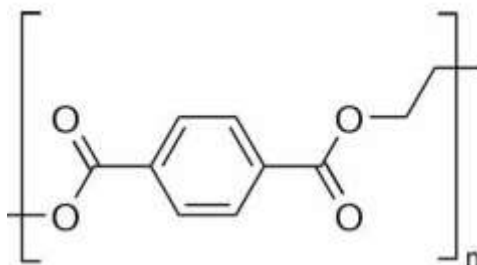


Fonte: ABNT, 2017.

3.1.1.2 PET

O polietileno tereftalato, mais comumente conhecido como PET, é o poliéster mais produzido no mundo (SOONG, 2022). Comumente utilizado em fibras sintéticas e em recipientes como garrafas plásticas transparentes de bebidas e outros líquidos. O PET pode ser produzido de duas maneiras: através da reação de esterificação do ácido tereftálico com etileno glicol ou através da reação de transesterificação entre o etileno glicol e o tereftalato de dimetila (DMT). Até meados da década de 1960, a rota preferível era através do DMT, porém com avanços na capacidade de gerar um produto mais puro, a rota de esterificação com ácido tereftálico se tornou a mais utilizada (JI, 2013). A unidade repetitiva do PET pode ser vista na Figura 7.

Figura 7. Unidade repetitiva do polietileno tereftalato (PET)



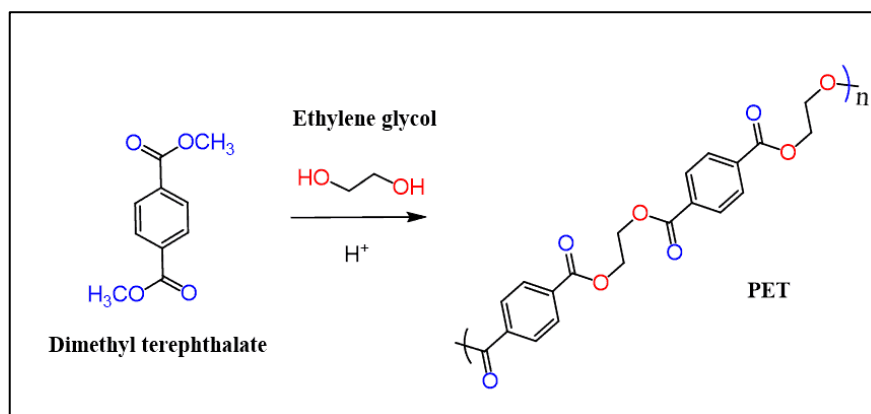
Fonte: CUSANO, 2023.

Na síntese do PET através da transesterificação, o processo é separado em três etapas:

1. Fusão: o DMT é fundido em um tanque com agitação;
2. Transesterificação: o DMT fundido reage com etileno glicol, em excesso. O metanol gerado durante o processo é continuamente removido por destilação e catalisadores alcalinos (acetatos metálicos) são utilizados nesta etapa;
3. Policondensação: o produto da transesterificação é transferido para um terceiro reator, que trabalha em temperaturas acima de 300 °C sob vácuo. Nesta etapa, a massa molecular cresce e catalisadores como o óxido de antimônio, germânio ou titânio são normalmente utilizados. Uma estimativa do grau de polimerização é normalmente obtida pelo consumo de energia do agitador devido ao rápido crescimento da viscosidade do meio reacional. A reação pode ser finalizada ou interrompida com a injeção de nitrogênio.

Um esquema reacional da síntese do PET a partir da transesterificação de DMT pode ser visto na Figura 8.

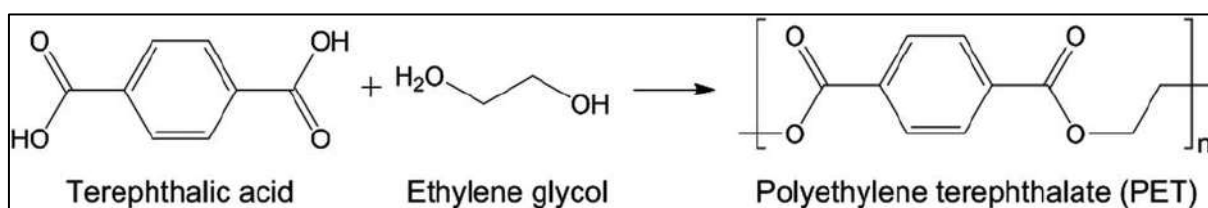
Figura 8. Reação de transesterificação do tereftalato de dimetila



Fonte: CHEMISTRY STEPS, 2019.

Na síntese através do ácido tereftálico, o processo é direto. Este método foi se tornando cada vez mais prevalente, pois a reação progride mais rapidamente. Esta rota também tende a gerar um PET com maior peso molecular. Na síntese, catalisadores alcalinos (como aminas) ou catalisadores de transesterificação (como o óxido de antimônio citado anteriormente) podem ser empregados. Diferentemente da rota por transesterificação, o processo ocorre sob pressão – de 2,7 a 5,5 bar (ULLMANN, 2011). Assim como na transesterificação, o subproduto gerado é removido por destilação.

Figura 9. Reação de esterificação do ácido tereftálico

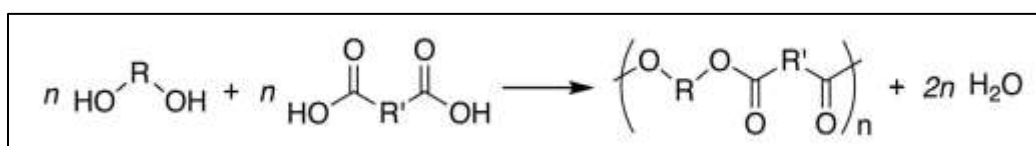


Fonte: VOLANTI, 2019.

O PET é produzido a partir de uma reação de policondensação. Diferentemente das reações de adição utilizadas na síntese do polietileno e polipropileno, polímeros de condensação são comumente preparados em reações que utilizam mais de um monômero, cada um com um grupo funcional distinto. É classificada como uma reação em etapas, não havendo distinção entre o início da formação do polímero e o crescimento do polímero. Logo, não apresenta as componentes reacionais de iniciação, propagação e terminação como na poliadição. São

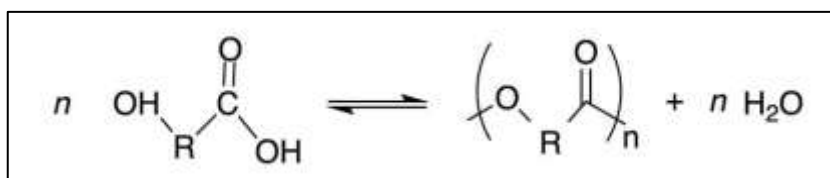
reações, em geral, que apresentam maiores conversões em produto, porém com cinética mais lenta. Polímeros geralmente produzidos por condensação são aqueles que apresentam heteroátomos (como oxigênio, nitrogênio e enxofre) em sua estrutura, como os poliésteres e as poliamidas. São reações caracterizadas pela formação de subprodutos e de polímeros com peso molecular menor do que os da poliadição (YOUNG, 2011). O esquema reacional da síntese de um poliéster pode ser visto na Figura 10. A produção de polímeros de condensação também pode se dar através da reação de um único monômero bifuncional, como exemplificado no esquema da Figura 11.

Figura 10. Síntese de um poliéster via reação de condensação entre dois monômeros



Fonte: LODGE, 2020.

Figura 11. Síntese de um poliéster a partir de um único monômero bifuncional



Fonte: LODGE, 2020.

Nas reações de condensação, cada monômero é sequencialmente adicionado a uma extremidade da molécula, de maneira alternada, gerando dímeros, trímeros, etc.

As condensações são reações reversíveis e, logo, seu equilíbrio é afetado pela presença de produtos no meio reacional. Para que ocorra uma boa conversão, a retirada do subproduto gerado (no caso do PET: metanol ou água) é fundamental ao processo de produção. Os subprodutos gerados nas reações de condensação geralmente são: álcoois, água ou ácido clorídrico – que podem ser removidos por destilação (LODGE, 2020).

Como tendem a gerar produtos de menor peso molecular que as poliadições, muitas vezes se utiliza o processo de cura, que visa a interligação dos oligômeros produzidos (MANO, 1999).

O processamento do polímero é dependente de sua aplicação final. No caso de garrafas plásticas, estas são normalmente produzidas a partir do método de moldagem por sopro. Já nas fibras sintéticas, o polímero é fundido e resfriado no processo de fiação por fusão.

O polímero existe tanto na forma semi-cristalina apresentando boa resistência, rigidez e dureza, quanto na forma amorfa, apresentando maior ductilidade e se tornando transparente.

O PET apresenta propriedades interessantes no mercado de embalagens alimentícias por ser um material inerte que não atribui sabor ao produto e com alta transparência (na sua forma amorfa), permitindo ao consumidor final a visualização de seu conteúdo.

De acordo com a NBR 13230:2008 – Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis – identificação e simbologia, o PET recebe a numeração 1 como identificação; esta deve estar presente na embalagem desse material como mostra a Figura 12.

Figura 12. Símbolo de identificação do PET



Fonte: ABNT, 2017.

3.1.2 Aditivos mais utilizados

Os aditivos são compostos orgânicos ou inorgânicos que muitas vezes permitem o processamento do polímero, ou melhoram seu desempenho final. Estes podem ser usados em níveis de 0,05% a 20% do peso total do plástico. Esses compostos são classificados conforme uma grande gama de funções que podem exercer no material como: Corantes, Plastificantes, Antimicrobianos, Estabilizadores, dentre outras funções. Entretanto, não se deve utilizar qualquer substância para essa finalidade por conta de potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Sendo assim, proibições legais e considerações sobre a utilização dos mesmos devem ser observadas. (OTTO, 2008)

Com relação à utilização de aditivos, há uma extensa gama de produtos químicos, com as mais diversas finalidades para a obtenção de propriedades do material plástico. Contudo, a

utilização destes deverá seguir a lista positiva de materiais plásticos destinados à elaboração de embalagens e equipamentos em contatos com alimentos, estipulada pela Anvisa.

Para a utilização de corantes como aditivos em embalagens plásticas destinadas a estar em contato com alimentos, os mesmos são regulados pela RDC n° 52, de 26 de novembro de 2010. Sendo assim, esta resolução determina tanto os requisitos para utilização de aminas aromáticas podendo ser sulfonadas ou não, negro de fumo e metaloides. Com relação aos metaloides, pode-se observar a porcentagem máxima permitida de cada um deles em relação a massa total da embalagem (m/m) na Figura 13:

Figura 13. Limites de concentração de metais e metaloides em corantes

Antimônio (Sb) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.05 % m/m
Arsênio (As) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.005 % m/m
Bário (Ba) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.01 % m/m
Cádmio (Cd) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.01 % m/m
Chumbo (Pb) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.01 % m/m
Cromo (Cr) (soluble en HCl 0,1 N)-----	0.10 % m/m
Mercúrio (Hg) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.005 % m/m
Selênio (Se) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.01 % m/m
Zinco (Zn) (soluble en HCl 0,1N)-----	0.20 % m/m

Fonte: RDC n° 52, de 26 de novembro de 2010.

O banco de dados de químicos associados a embalagens plásticas (CPPdb) lista 906 substâncias prováveis de estarem associadas às embalagens e 3377 possíveis (GROH, 2019). Dentre estas, estão inclusos monômeros, solventes e aditivos químicos. Um grupo predominante de aditivos danosos é o de metais, principalmente cádmio, cromo, chumbo e mercúrio contidos em pigmentos, estabilizantes e agentes antimicrobianos. Além disso, esses metais podem ser utilizados no processo de produção dos polímeros e podem acabar compondo o plástico final. Um estudo realizado em Campinas - SP, por exemplo, demonstrou a migração de chumbo de embalagens de iogurte (de polietileno) acima dos valores permitidos pela Anvisa (KIYATAKA, 2013).

3.2 Tecnologias de reciclagem de polímeros

3.2.1 Reciclagem mecânica

O processo de reciclagem mecânica de plásticos consiste na produção de novos materiais por meio de métodos físicos como corte, trituração e lavagem. Este método possui um papel fundamental na reciclagem de termoplásticos, porém, não é utilizado ao se trabalhar com termorrígidos devido às propriedades dos mesmos que inviabilizam o processo.

As etapas envolvidas na reciclagem mecânica podem ser divididas e classificadas em: Coleta/Segregação, Moagem, Limpeza e secagem, Peletização/Extrusão, e Fabricação do produto final. (SPINACÉ, 2005)

Figura 14. Esquema de reciclagem mecânica do PET



Fonte: PROPEQ, 2021.

A etapa inicial de segregação é de extrema importância para a reciclagem mecânica, pois a mesma apresenta como um de seus principais desafios a dificuldade de lidar com a heterogeneidade dos resíduos, já que diferentes tipos de plástico podem ter uma vasta gama de propriedades diferentes, como temperatura de fusão, variável essencial para o processo de extrusão. Além disso, a presença de diferentes polímeros no material plástico a ser reciclado comumente causa uma piora nas propriedades mecânicas do produto final devido à separação das fases poliméricas, gerando imperfeições estruturais no sólido final (JAYAKUMAR, 2022). Em tais casos, pode ser necessário introduzir um agente compatibilizante ao *blend* polimérico,

podendo ser um polímero com ramificações modificadas ou óxidos metálicos (GAYLORD, 2006).

Um segundo problema que afeta este tipo de método está relacionado com a presença de água e outros contaminantes nos materiais, pois ao longo do processo, os mesmos podem atuar como agentes de cisão da cadeia polimérica, levando à redução de peso molecular do polímero original, e consequentemente afetando suas propriedades. Portanto, a etapa de secagem deve ser ajustada ao nível de contaminação do material coletado com o intuito de mitigar este efeito (SCHYNS, 2021).

O processo de extrusão também gera uma grande limitação da reciclagem mecânica: a piora das propriedades físicas do material após subsequentes moldagens. Estabilizantes/antioxidantes são comumente adicionados para reduzir a perda de propriedades mecânicas causada pelas cisões oxidativas no polímero pelo processo extrusivo (SCHYNS, 2021). Por exemplo, a tensão/deformação na ruptura do PET virgem é de cerca de 42%; após dois ciclos de extrusão, esse valor reduz para 5,7% (LÓPEZ, 2014).

Atualmente, um grande desafio da reciclagem mecânica está na dificuldade de processar embalagens multicamadas. Estas não podem ser recicladas usualmente, pois os processos de reciclagem mecânica atuais processam apenas um tipo de resina. Seria necessário então que seus diferentes materiais constituintes fossem separados para a produção de resina reciclada a partir de resíduos multicamadas. Não existem tecnologias economicamente viáveis para realizar essa separação no presente. (WALKER, 2020).

3.2.2 Reciclagem química

Diferentemente da reciclagem mecânica, a reciclagem química envolve processos de quebra das ligações moleculares dos polímeros. Esses processos podem ocorrer de diversas formas, como solvólise, pirólise ou gaseificação, resultando na produção de monômeros, oligômeros ou produtos químicos intermediários. Esses componentes podem, então, ser utilizados como matérias-primas para a síntese de novos plásticos, resinas, outros produtos químicos ou até serem utilizados como combustível (HONUS, 2018).

Uma das principais vantagens da reciclagem química é sua versatilidade para lidar com diversos tipos de plásticos, incluindo misturas complexas e materiais degradados, que são inadequados para a reciclagem convencional – por exemplo, diferentemente da reciclagem

mecânica, termorrígidos podem ser reciclados quimicamente. Por outro lado a presença de certos materiais gera um desafio para a reciclagem química, como a presença de PVC nos métodos térmicos de reciclagem química, que produz gás clorídrico quando é alimentado ao processo (TORRES, 2020).

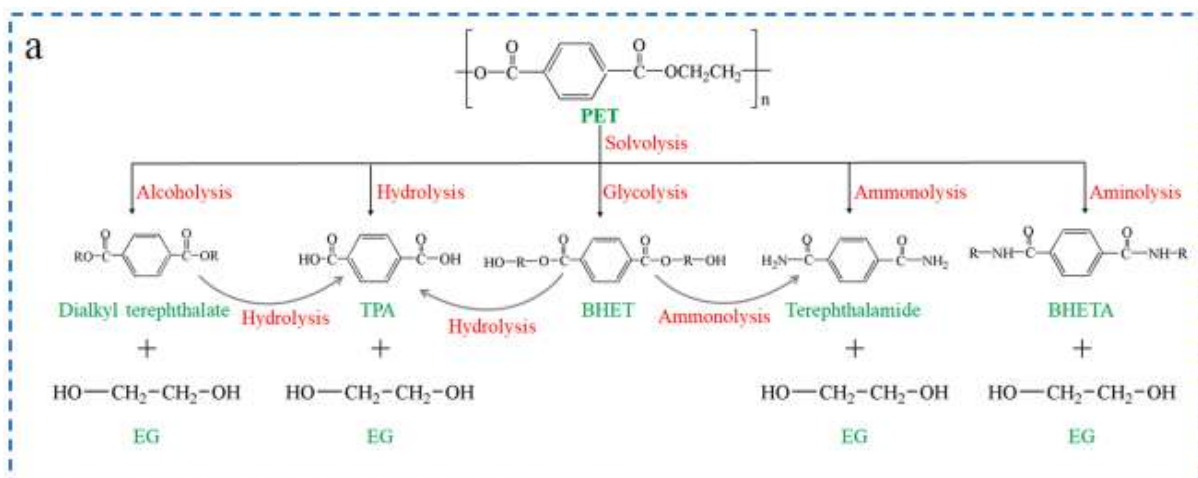
Outra vantagem da reciclagem química é sua menor sensibilidade em relação a qualidade do material plástico que é alimentado no processo quando comparada à reciclagem mecânica, que exige maior grau de pré-tratamento (coleta/segregação e limpeza/secagem). Por outro lado, os processos de reciclagem química são, geralmente, mais complexos, exigindo maior infraestrutura e custo operacional para sua execução. (DOGU, 2021)

3.2.2.1 Solvólise

A solvólise é uma técnica de reciclagem química que envolve a quebra de polímeros por meio da interação com solventes específicos, gerando monômeros e oligômeros. A solvólise pode ocorrer através da interação do polímero com um solvente ou até com um reagente solúvel no solvente, como ácidos ou bases. O processo pode ser classificado como glicólise (com glicol), aminólise (com aminas), acidólise (com ácidos), alcoólise (com álcoois) ou hidrólise (com água). O processo é limitado a polímeros formados por policondensação, como o PET, sendo esta uma limitação da técnica (MAISELS, 2022).

O processo de solvólise conduz à recuperação de monômeros. Por exemplo, na reação de hidrólise do PET obtém-se como produtos os monômeros de partida do polímero: etileno glicol e ácido tereftálico (ou tereftalato no caso de hidrólise alcalina). Estes podem ser utilizados na reobtenção do polímero original ou na fabricação de novos produtos (SPINACÉ, 2005). Esquemas reacionais para os principais métodos de solvólise aplicáveis ao PET podem ser vistos na Figura 15.

Figura 15. Diferentes processos de solvólise do PET e seus produtos.



Fonte: JIANG, 2021.

Como se pode ver na Figura 15, diferentes processos de solvólise do PET geram diferentes produtos, podendo gerar amidas, ésteres ou ácidos análogos do ácido tereftálico. O processo de solvólise possui como uma das suas principais características a capacidade de retornar o polímero de condensação aos seus monômeros.

A hidrólise de polímeros não é normalmente realizada em pH neutro devido à baixa solubilidade do polímero, exigindo maiores temperaturas e pressões (> 1MPa) na sua execução. (BERNARD, 2021)

Os processos de solvólise mais utilizados na reciclagem de PET são os processos de glicólise e alcoólise (MAISELS, 2022). Nestes, uma reação de transesterificação ocorre, com geração de um éster cuja estrutura é dependente do álcool utilizado. No caso da glicólise, o reagente mais utilizado é o etilenoglicol. Catalisadores metálicos (como acetatos) são comumente utilizados (FRANCIS, 2016).

Uma das principais restrições da solvólise reside na sua inaplicabilidade a poliolefinas, devido à ausência de grupos funcionais contendo heteroátomos que possam passar pelas reações de hidrólise/transesterificação necessárias. Além disso, frequentemente requer tempos de reação mais longos quando comparado aos outros métodos de reciclagem química (JIANG, 2021).

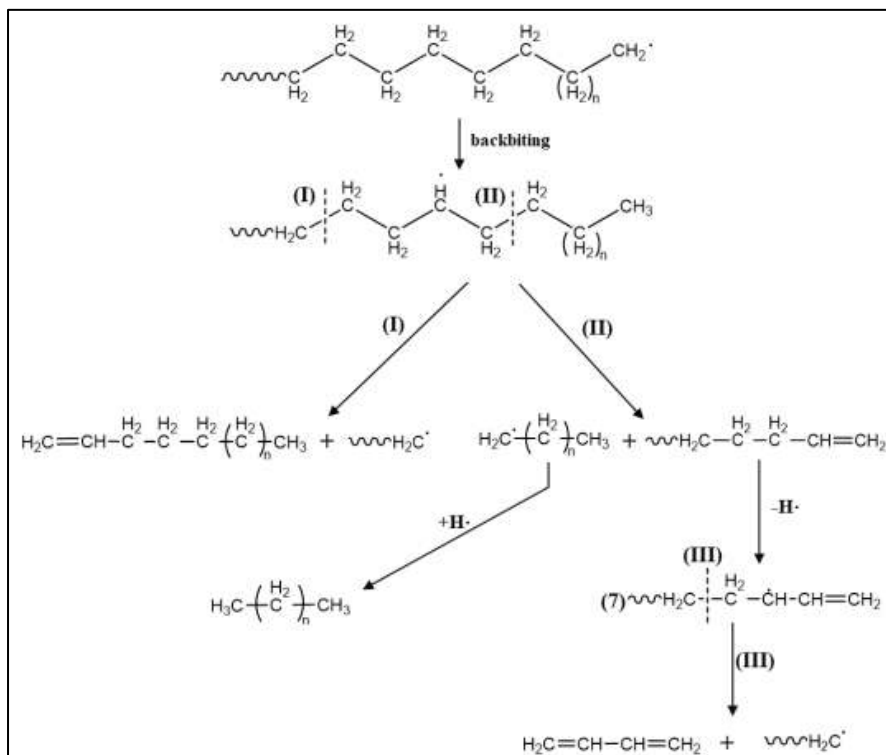
3.2.2.2 Pirólise

A pirólise é o método mais utilizado de reciclagem química (JIANG, 2021) e consiste numa decomposição térmica do material polimérico em atmosfera inerte (nitrogênio é comumente empregado para inertização). Usualmente esse processo se dá em temperaturas

superiores a 300 °C. Neste processo as cadeias poliméricas são quebradas, gerando moléculas com menor peso molecular. O processo de pirólise costuma gerar 3 produtos: gás, óleo e sólido. A composição de cada produto é altamente sensível à temperatura aplicada no processo de pirólise e ao catalisador utilizado, com altas temperaturas favorecendo a formação de gases. (DAI, 2022)

Diferentemente da solvólise, a tecnologia de pirólise é capaz de processar polímeros de adição assim como polímeros de condensação. É uma técnica pouco sensível à seleção da matéria-prima, sendo capaz de processar plásticos na presença de compostos inorgânicos, por exemplo (CABALLERO, 2016). A composição dos produtos gerados é complexa, podendo conter compostos parafínicos, olefínicos e naftênicos em uma ampla faixa de comprimento de cadeia. Os produtos gerados podem ser utilizados como combustíveis ou como matérias-primas na fabricação de novos plásticos e produtos químicos. Quando combinada com técnicas como o craqueamento catalítico ou craqueamento a vapor, por exemplo, os produtos da pirólise podem gerar químicos como etileno e propileno, importantes blocos de construção da indústria química (MAISELS, 2022).

Figura 16. Reação de pirólise do PE.



Fonte: LI, 2022.

Apesar de ser uma técnica versátil em relação à pureza do material a ser reciclado, o óleo de pirólise gerado no processo tem sua composição variável a depender do plástico a ser reciclado. Por exemplo, na pirólise do PET é possível obter seus monômeros como produto. Já no caso das poliolefinas como o PE, a pirólise térmica pode gerar um óleo composto principalmente por hidrocarbonetos parafínicos (THIOUNN, 2020).

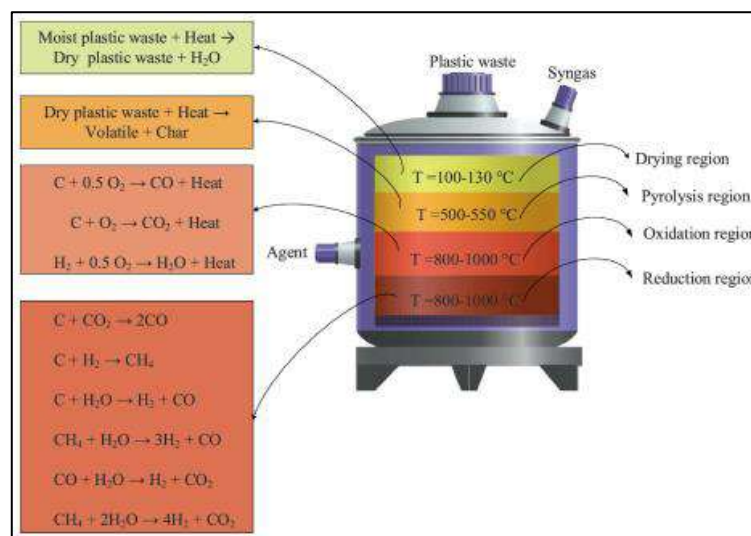
Uma limitação usual do processo de pirólise está na concentração de PVC no resíduo plástico a ser reciclado. A presença de cloro no PVC faz com que, nas condições de altas temperaturas e ausência de oxigênio dos processos de pirólise, seja produzido HCl e organoclorados no interior do reator. Por esta razão, um limite considerado para os processos de pirólise reportados é de 2% m/m de PVC (LI, 2022).

3.2.2.3 Gaseificação

A gaseificação é uma técnica de reciclagem de polímeros via processo termoquímico com o intuito de produzir uma mistura de gases a ser utilizada como fonte energética em processos industriais. Os principais gases formados durante o processo são CO e H₂, podendo também haver a geração de CH₄, CO₂, H₂O e outros gases inertes em menores quantidades (SPINACÉ, 2005).

O processo de gaseificação pode ser estudado em quatro etapas. Na etapa inicial, a umidade presente nos resíduos plásticos é removida através da aplicação de calor. A desidratação dos materiais é realizada aquecendo-os dentro de uma faixa de temperatura entre 100 e 135 °C, preparando os resíduos plásticos secos para avançar para a próxima fase do processo. Na segunda etapa, que ocorre entre 500 e 550 °C, as ligações químicas do plástico são rompidas pelo processo de pirólise fazendo com que haja formação de gases voláteis e o char, sendo o último o sólido resultante do processo. Em seguida, ocorre na terceira etapa a oxidação tanto do sólido quanto dos gases resultantes do processo de pirólise. Este processo ocorre em temperaturas entre 800 e 1000 °C, promovendo a formação de CO, CO₂ e água principalmente, além de cinzas residuais. Deve-se atentar à liberação de calor inerente das reações que ocorrem nesta etapa. Por fim, ocorre a redução, na mesma temperatura obtida na etapa anterior, fazendo com que produtos remanescentes do processo de pirólise reajam com os produtos da oxidação como mostra a Figura 17 (HASANZADEH, 2021).

Figura 17. Quatro fases principais do processo de gaseificação de resíduos plásticos



Fonte: HASANZADEH, 2021.

Nesse processo específico, o ar desempenha um papel fundamental como agente de gaseificação. Essa escolha traz várias vantagens, como a simplicidade do processo, pois o ar é usado em detrimento de apenas oxigênio puro, e contribui para a redução de custos. No entanto, há uma desvantagem associada a essa abordagem: a presença de nitrogênio inerte no ar. Esse nitrogênio dilui os gases combustíveis resultantes, diminuindo o seu valor calorífico. Para superar esse problema, é introduzido vapor d'água em uma proporção adequada para reduzir a presença de nitrogênio. Além disso, é importante mencionar que a gaseificação produz uma quantidade considerável de carvão, que precisa passar por processos adicionais, como tratamento ou queima (FRANCIS, 2016).

Uma das grandes desvantagens do processo de gaseificação está nas altas temperaturas associadas ao processo, que podem chegar a 1500 °C, exigindo um alto custo energético. O gás de síntese gerado no processo é um importante insumo da indústria química, podendo ser usado na produção de metanol, amônia ou até hidrocarbonetos via Fischer-Tropsch (SPINACÉ, 2005).

3.2.2.4 Comparativo entre os principais métodos de reciclagem química

Considerando as principais características e limitações dos métodos de reciclagem química mais predominantes, foi preparada uma síntese destas, presente na Tabela 1.

Tabela 1. Comparativo entre os três principais métodos de reciclagem química

	Produtos	Necessidade de pós-processamento para produzir plástico?	Principais restrições
Solvólise	Monômeros	Não	Não se aplica a poliolefinas
			Maiores tempos de reação
Pirólise	Gás + Óleo de pirólise	Sim	Geração de mistura complexa
			Presença de contaminantes oxigenados ou clorados afetam o processo
Gaseificação	Gás de síntese (CO + H ₂)	Sim	Altas temperaturas
			Produção de carvão

Fonte: Elaboração própria.

3.3 Características esperadas para plásticos de embalagens alimentícias

As funções de uma embalagem alimentícia podem ser divididas em quatro principais aspectos cuja necessidade vai variar de acordo com o tipo de produto armazenado. Um destes aspectos é a proteção contra: choques, vibrações e compressões, que podem ocorrer durante seu transporte, distribuição e manuseio. Um segundo aspecto é a conservação do alimento, promovendo o prolongamento de sua vida útil pela proteção contra fatores de deterioração, sendo os principais: Umidade, oxigênio, luz e microrganismos. Ainda com relação a conservação, a própria embalagem deve ser hermética e não conter substâncias que possam migrar para o produto, comprometendo sua qualidade e colocando o consumidor em risco, além de resistir a variações de temperatura e de volume sem o perigo de deformação permanente ou contaminação pós processo. O terceiro aspecto é relacionado a informação, devendo nesta conter instruções de armazenamento e manuseio para gestão de estoque do produto, além das informações que devem chegar ao consumidor final. Por fim, têm-se o aspecto de conveniência relacionado a embalagem, como: possibilidade de aquecimento em fornos micro-ondas; tampas dosadoras; possibilidade de fechamento entre utilizações; dentre outros. (JORGE, 2013)

Com relação ao PE, este é comumente utilizado para a produção de sacolas plásticas, filmes e embalagens flexíveis com certa resistência a temperaturas mais altas (como as encontradas durante o aquecimento em um aparelho de micro-ondas, por exemplo). É inerte quimicamente, sendo resistente a meios ácidos/alcalinos e resistente à interação com diversos solventes. É comumente utilizado em duas formas, HDPE e LDPE. O primeiro é mais rígido e

resistente enquanto o segundo é mais flexível e menos resistente a temperaturas (STOKES, 2020). O LDPE também é geralmente mais cristalino e, conseqüentemente, mais transparente (EMBLEM, 2012).

Com relação ao PET, este é bastante utilizado em embalagens flexíveis, geralmente com espessuras de 12, 13 e 23 μm por conta de suas características mecânicas e químicas. Sua alta resistência à ruptura, perfuração, rasgamento, absorção e impacto compõem importantes requisitos mecânicos de um material para embalagens. Além disso, o mesmo possui alta resistência química para solventes hidrocarbonatados, clorados, cetonas, ésteres e ácidos diluídos. Outra característica deste polímero é sua alta performance em embarreirar odores em geral. Por fim, o PET pode ser trabalhado em uma ampla faixa de temperaturas (-40 a 220°C) fazendo com que seja um bom material para tratamento térmico de pasteurização, esterilização e para comportar super congelados. (JORGE, 2013)

Materiais plásticos reciclados apresentam maiores restrições quando utilizados na indústria alimentícia, principalmente quando estes entram em contato direto com alimentos. Estas restrições se aplicam não somente à tecnologia de reciclagem utilizada, mas também à origem do resíduo utilizado como matéria-prima. A interação entre o material e o alimento é causa de grande preocupação e estudo (BARNES, 2007).

Como exemplo, tem-se as características de algumas poliolefinas, como o PE, de apresentarem maior difusividade de contaminantes em sua estrutura, aumento da absorção de contaminantes orgânicos e dificultando a etapa de descontaminação exigida pelas autoridades sanitárias para utilização como material em contato com alimentos (SU, 2021).

4 Arcabouço legal

4.1 Legislação geral

4.1.1 Legislação em vigor no Brasil

Com relação à esfera nacional, a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 é o primeiro grande marco com relação às diretrizes ambientais no país e trata sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), tendo como objetivo a compatibilidade do desenvolvimento econômico e social com a preservação ambiental e equilíbrio ecológico. Além disso, a PNMA determina as responsabilidades e competências de cada órgão do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), e confere aos estados e municípios o poder de elaborar normas complementares àquelas abordadas em âmbito federal.

Com relação às sanções derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, estas são dispostas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Esta, em seu capítulo 5, determina os crimes ambientais em diversas vertentes, sendo o de poluição apresentado na Seção III. Neste, determina-se em seu Art. 54 que o lançamento de resíduos sólidos em desacordo com exigências estabelecidas em leis ou regulamentos apresenta pena de reclusão de um a cinco anos.

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 apresenta aspectos relacionados a preservação ambiental em diversos artigos presentes em diferentes capítulos, entretanto seu Capítulo VI é exclusivamente voltado ao tema. Neste, em seu Art. 225, determina-se que um meio ambiente ecologicamente equilibrado é um direito de todos, além de impor o dever de preservação do mesmo à coletividade e ao Poder Público.

A Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999 trata da promoção da educação ambiental, determinando-a como um componente essencial e permanente da educação nacional, incluindo em seu escopo: a reutilização de materiais, a separação de resíduos sólidos na origem e a reciclagem. Ademais, ainda com relação a disseminação do conhecimento, têm-se a Lei 10.650, de 16 de abril de 2003 que dispõe sobre o acesso público aos dados e informações ambientais que estão presentes nos órgãos e entidades que compõem o SISNAMA.

A legislação que desempenha o papel de estabelecer a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. O foco desta lei está na não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento adequado de resíduos sólidos, estabelecendo

diretrizes para gestão integrada e sustentável. Nesta lei, determina-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, princípio este que busca envolver todos os agentes da sociedade, incluindo fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público, na gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos. Dessa forma, cada agente envolvido na cadeia produtiva assume parte da responsabilidade pelo manejo adequado dos resíduos gerados. Desta forma, a lei prevê a gestão dos produtos ao longo de seu ciclo de vida e promove a logística reversa, estimulando a economia circular. Nesta lei, também é determinado que os municípios devem elaborar seus planos de gestão de resíduos sólidos considerando suas características e peculiaridades.

O PNRS, por sua vez, é regulamentado pelo Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022, onde destaca-se a criação do Programa Nacional de Logística Reversa integrado ao Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIS) e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Com relação ao PNRS, via Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022, as metas de coleta, reciclagem, dentre outras relacionadas a gestão de resíduos são estipuladas para os próximos anos como mostra a Tabela 2. Desta forma, unifica-se o sistema de inserção de dados para todos os setores da economia e faz com que seja possível compreender melhor o desenvolvimento da logística reversa do país.

Tabela 2. Metas de reciclagem de embalagens plásticas e coleta seletiva

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2040
Índice de reciclagem de embalagens plásticas	30,00%	32,00%	33,00%	34,00%	35,00%	36,25%	37,50%	38,75%	40,00%	-
Taxa de coleta seletiva	41,9%	-	-	-	49,6%	-	-	-	57,2%	72,6%

Fonte: Elaboração própria. Dados: Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Outro marco recente ocorre com a Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021 que estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle) e o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecicle). Além disso, ela institui a Comissão Nacional de Incentivo à Reciclagem (CNIR) com o intuito de acompanhar e avaliar os incentivos previstos na lei. Estes, por sua vez, são de até 6% de deduções no imposto de renda para pessoas físicas e até 1% em cada período de apuração para empresas quando estiverem envolvidas em projetos de reciclagem aprovados

pelo CNIR. Dentre as áreas passíveis de receber esse tipo de investimento, destacam-se as que visam beneficiar e fortalecer a participação de catadores de materiais recicláveis.

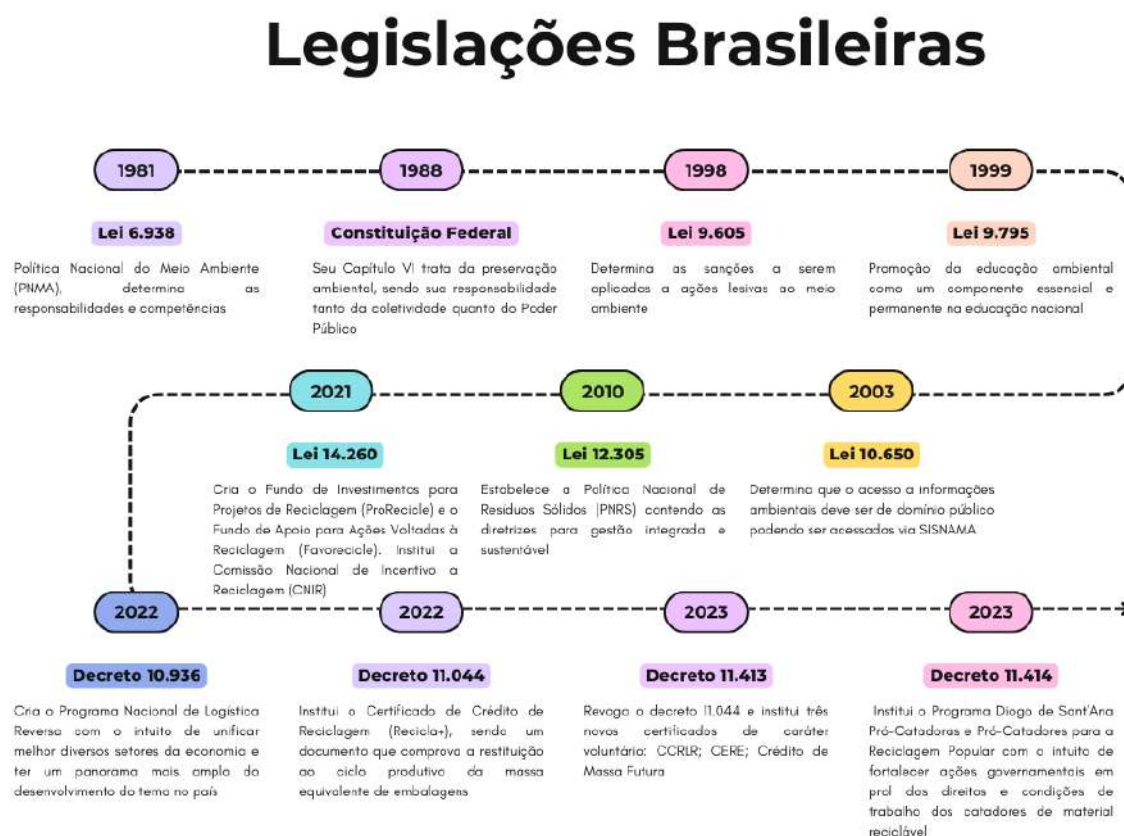
Com relação a logística reversa, o Decreto 11044, de 13 de abril de 2022 institui o Certificado de Crédito de Reciclagem (Recicla+), sendo este um documento comprobatório da restituição ao ciclo produtivo da massa equivalente de embalagens. Todavia, este foi revogado pelo Decreto nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023 que trata de logística reversa e crédito de reciclagem, instituindo três novos certificados de caráter voluntário: Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR); Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral (CERE); Crédito de Massa Futura. Além das definições dos novos certificados, de maneira geral, o que difere o novo decreto do anterior é sua maior abrangência de resíduos, não se limitando às embalagens.

Para as embalagens, o CCRLR é um certificado que é garantido a um produtor que comprove que um percentual pré-estipulado do material plástico produzido volte a cadeia produtiva, sendo este comprovado por meio do certificado de destinação final (CDF), emitido pela cooperativa que realizou o processo de reciclagem via sistema de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR). O CERE, por sua vez, é um certificado que aproxima ainda mais o produtor de embalagens das cooperativas, sendo este atribuído quando o produtor promove mudanças estruturais na cooperativa, como investimento em maquinário, obras e infraestrutura no geral. Já o Crédito de Massa Futura é atribuído quando este produtor participa desde a etapa do projeto inicial e da estruturação de uma cooperativa que não exista em determinada região para atender sua futura demanda com relação a reciclagem dos resíduos gerados. Cabe ressaltar que os três créditos podem ser garantidos individualmente a uma empresa que atenda seus critérios, ou a uma associação de empresas que realizem coletivamente o que é determinado por eles. Além disso, este sistema deve ser implementado em até 12 meses após a publicação do Decreto nº 11.413, portanto sua aplicação prática ainda não pôde ser criteriosamente observada.

O Decreto seguinte, sendo ele o nº 11.414, de 13 de fevereiro de 2023 institui o Programa Diogo de Sant'Ana Pró-Catadoras e Pró-Catadores para a Reciclagem Popular, visando integrar e fortalecer ações governamentais em prol dos direitos e condições de trabalho das catadoras e catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis. O programa busca melhorar as condições de trabalho, financiar iniciativas, promover a inclusão socioeconômica e expandir a coleta seletiva, reutilização, reciclagem e educação ambiental. Também estabelece o Comitê Interministerial para Inclusão Socioeconômica de Catadoras e Catadores de Materiais

Reutilizáveis e Recicláveis, responsável pelo acompanhamento e coordenação do programa, envolvendo diversos órgãos do governo e setores da sociedade com o objetivo de impulsionar a reciclagem popular e garantir a inclusão dessa classe de trabalhadores. A Figura 18 apresenta a linha do tempo das legislações brasileiras discutidas nesta seção.

Figura 18. Linha do tempo das legislações brasileiras



Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Legislação na União Europeia

Em 1975, é publicada a primeira diretriz oficial de gerenciamento de resíduos, a WFD (*Waste Framework Directive*). A WFD estabelece regras para os países membros para implementação de sistemas que reduzam a geração de resíduos, incentivem a reciclagem e reuso de resíduos e regras de armazenagem, transporte e disposição final que minimizem os danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Em 1994, através da diretriz 94/62/EC (*Packaging and Packaging Waste Directive - PPWD*), é introduzido o sistema EPR (*Extended Producer Responsibility*), requisitando a cooperação dos grandes produtores de embalagens plásticas e consequentemente, de resíduos

plásticos, com o poder público para promover um aumento na taxa de reciclagem e diminuição da geração de resíduos. Esta diretiva possuiu uma abrangência limitada visto que, neste ano, a UE (União Europeia) era composta por apenas 12 países.

A revisão da WFD (*Waste Framework Directive*), diretiva 2008/98/EC de 2008, adotou a hierarquia de resíduos em 5 classes (Figura 19). A hierarquia apresenta como prioridade da diretiva a prevenção de rejeito acima de tudo. O reuso, a reciclagem e a recuperação (a diretiva inclui a recuperação energética/incineração como método de recuperação) são menos prioritárias do que a prevenção. Por último, são estabelecidas regras para rejeito no caso de resíduos que não serão reaproveitados de alguma forma, como é o caso de disposição em aterros sanitários, para que o processo ocorra com os menores impactos ambientais possíveis e combate a exportação ilegal de resíduos, com melhores definições da diferenciação entre resíduo e matéria-prima secundária. Além da hierarquia de resíduos, outro principal ponto da revisão da WFD foi a expansão do sistema EPR, estendendo a responsabilidade do gerenciamento do resíduo urbano ao longo de todo o ciclo de vida do produto, responsabilizando produtores pelos impactos ambientais gerados e envolvendo-os nas etapas de coleta, reciclagem e rejeito. Os produtores também necessitam contribuir financeiramente, suportando a reciclagem, sistemas de coleta ou em campanhas de conscientização. Essas medidas podem incluir a recepção de produtos devolvidos e dos resíduos que permanecem após esses produtos terem sido utilizados, bem como a posterior gestão dos resíduos e responsabilidade financeira por tais atividades. Esse sistema expandiu-se e é encontrado na maioria dos países europeus atualmente.

Figura 19. Hierarquia de gerenciamento de resíduos adotada pela diretiva 2008/98/EC - WFD



Fonte: EUROPEAN COMISSION, 2023.

A Comissão Europeia, por meio do Regulamento N° 66/2010, estipulou o seu sistema de rótulo ecológico denominado *EU Ecolabel*. Este sistema ocorre via caráter voluntário por parte de prestadores de serviços e fabricantes de produtos por meio de uma solicitação que será avaliada pelas autoridades ambientais locais para conferência do rótulo, caso os critérios estejam de acordo. Portanto, sua principal finalidade é a de informar ao consumidor se os produtos atendem aos padrões ambientais estabelecidos, facilitando sua decisão de compra no que diz respeito ao aspecto de sustentabilidade. Com relação a sua abrangência, esta ocorre para uma série de produtos como eletrodomésticos, produtos de limpeza e embalagens plásticas. Os critérios de atribuição dos rótulos são atualizados por meio do EUEB (*European Union Ecolabelling Board*) para que estejam sempre alinhados com os avanços tecnológicos do desenvolvimento sustentável. Os critérios podem levar em conta desde a eficiência na utilização dos recursos naturais até os níveis de emissões atmosféricas causados na produção do produto e variam de setor para setor.

Figura 20. Ecolabel



Fonte: EXPLAINTHATSTUFF, 2022.

Em 2014, é aprovada a Regulamentação N° 660/2014 que aumenta as restrições para exportações de resíduos a países internos ou externos à União Europeia, de forma a ampliar a detecção de exportações ilegais que terceirizam a responsabilidade da destinação adequada.

Em 2015 a Comissão Europeia deu início ao seu plano de ação de economia circular, CEAP (*Circular Economy Action Plan*). Um conjunto de 54 ações é então executado de 2015 a 2019, estabelecendo novas metas de reciclagem, ampliando a regulamentação da exportação de resíduos, implementando regras de boas práticas de sistemas de coleta e transporte de resíduos, etc. A reciclagem de plásticos e resíduos alimentícios são dois dos cinco setores prioritários no plano de ação. Em janeiro de 2018, a comissão adotou uma nova estratégia de administração de resíduos plásticos como parte da CEAP. Nela foram estabelecidas novas metas:

1. Todo plástico produzido deve ser reciclável até 2030;
2. 50% do plástico produzido deve ser reciclado até 2025;
3. 55% do plástico produzido deve ser reciclado até 2030.

As diretrizes 851 de 2018 e 904 de 2019 emitidas pelo Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia também se destacam no progresso à economia circular europeia. A primeira, visa promover uma gestão mais sustentável de resíduos por meio de duas estratégias principais, sendo elas: a atribuição da responsabilidade da geração de resíduos aos produtores dos mesmos se tornou mais estritamente regulada e a elaboração de metas para os próximos anos. Sendo assim, os estados participantes devem atingir o valor de 65% de reciclagem para os resíduos urbanos, além de um limite máximo de 10% de destinação em aterros sanitários até 2035. Entretanto, para resíduos de embalagens, estabeleceu-se uma meta de reciclagem de 65% até 2025, estendendo-se a 70% até 2030.

Já a segunda diretriz trata mais especificamente dos plásticos de uso único como talheres, copos, pratos e embalagens, prevendo a proibição de sua comercialização para 2021. Nessa diretriz, novos requisitos com relação ao conteúdo de PET reciclado em garrafas de bebidas foram estabelecidos: 25% de PET reciclado em embalagens PET produzidas até 2025, com esta meta subindo para 30% até 2030. Também são estabelecidas metas de reciclagem específicas para garrafas de bebidas em PET: 77% até 2025 e 90% até 2029.

Em janeiro de 2021, a Comissão Europeia adotou, via decisão do conselho N° 2020/2053, uma contribuição nacional compulsória. Os países membros da união passam a pagar uma taxa de €0,80/kg de embalagem plástica não reciclada. Essa medida foi tomada como parte do pacote de recuperação econômica após a pandemia da COVID-19.

Em junho de 2021, a C.E. aprovou a Regulamentação N° 2021/1119, com novas metas de redução de emissão de GEEs (Gases de Efeito Estufa). Um comprometimento é então

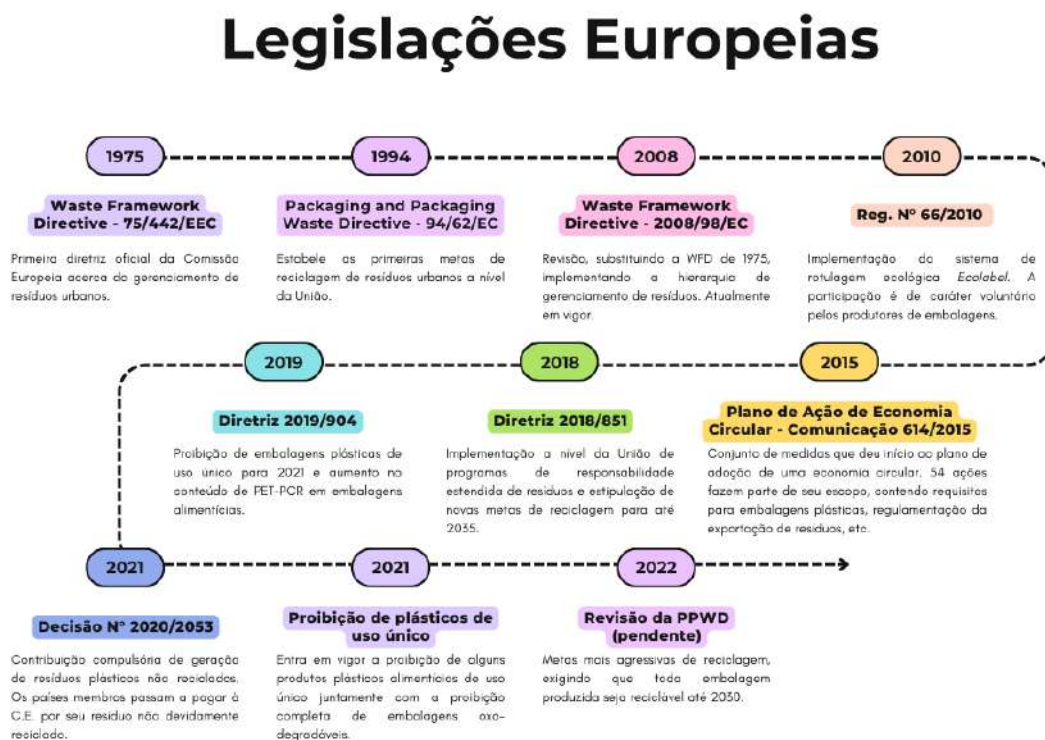
estabelecido de atingir uma redução de 55% na emissão de GEEs até 2030 e que a neutralidade de carbono seja atingida até 2050. Com isso, a comissão desencoraja rotas de aproveitamento energético “*waste-to-energy*” como a incineração ou rotas de produção de combustíveis fósseis a partir da reciclagem química de plásticos (“*waste-to-fuel*”).

A partir de julho de 2021, entra em vigor a proibição de diversos produtos plásticos de uso único, juntamente com a venda de embalagens plásticas oxo-degradáveis, grandes responsáveis pela geração de microplásticos.

Uma revisão da PPWD (*Packaging and Packaging Waste Directive*) está em trâmite desde novembro de 2022. Essa revisão conta com alguns requisitos agressivos em sua proposta, exigindo que toda embalagem produzida seja reciclável até 2030 e reciclável em grande escala até 2035.

A proposta também estabelece requisitos acerca da quantidade de material reciclado na composição de novas embalagens. Por exemplo, para embalagens feitas de PET, a revisão exige um mínimo de 30% de material reciclado a partir de 2030 e 50% até 2040.

Figura 21. Linha do tempo das legislações da União Europeia



Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.1 Implementação em nível nacional

Em abril de 2022, o Reino Unido implementou um imposto para reduzir a geração de resíduos de embalagens plásticas alimentícias. Aquelas empresas que produzirem ou importarem mais do que 10 toneladas de embalagens plásticas por ano passaram a ter de pagar um valor de £0,20/kg (£200/t) até abril de 2023. A partir de abril/2023, o valor passou para £210,82/t. De forma a incentivar a reciclagem, resíduos que contenham mais de 30% de plástico reciclado em sua composição são isentos de taxaço (PWC, 2023). A Espanha adotou um sistema parecido: uma taxa de €0,45/kg de plástico não reciclado. Porém, diferentemente do imposto em vigência no Reino Unido que não incide sobre resíduos com conteúdo reciclado maior que 30%, a taxa na Espanha não possui isenção. Ela se aplica à fração não reciclada do resíduo, incentivando produção de embalagens com maiores teores de plástico reciclado. Este tipo de taxaço está se tornando um padrão pela Europa, com uma taxaço análoga passando a ser reforçada a partir de janeiro de 2024 na Itália.

Figura 22. Mapa de implementação de impostos a resíduos de embalagens plásticas (2023)



Fonte: Adaptado de WTS GLOBAL, 2023.

Dentre os países que já adotaram a taxa, a forma na qual é implementada varia consideravelmente. Por exemplo, na Dinamarca a taxa é dependente do tipo de produto plástico,

com diferentes valores para cada categoria de produtos. Na Alemanha, está sendo discutida a introdução da taxa apenas para produtos plásticos descartáveis (aqueles que forem permitidos); os produtos plásticos são taxados dependendo de sua categoria. Embalagens alimentícias custarão €0,18/kg. A Holanda está procurando incentivar o uso de embalagens recicladas de outra maneira: produtores (ou importadores) que introduzirem mais de 50 toneladas de embalagens plásticas no mercado anualmente pagarão uma taxa de €1,05/kg. Caso a embalagem seja reciclável, o valor decresce para €0,79/kg. Em Portugal, o imposto começou em julho de 2022 como na Alemanha, para embalagens plásticas descartáveis, com um valor de €0,30 por embalagem. Esta foi estendida em setembro de 2023 para incluir embalagens feitas em alumínio.

Em outubro de 2023, o Parlamento Alemão aprovou a BGBl. I 2023, No. 124, também conhecida como “*Single-Use Plastic Fund Act*”, introduzindo um sistema nacional de taxação de plásticos descartáveis que entra em vigor a partir de janeiro de 2024. A taxa inclui em seu escopo embalagens plásticas de alimentos, garrafas plásticas de bebidas de até 3 litros, copos, sacolas plásticas, entre outros. O capital arrecadado irá para um fundo da FEA (*Federal Environmental Agency*) reservado para processos de gerenciamento e coleta de resíduos. Os produtores deverão arcar então com os seguintes valores (WAGNER, 2023):

- €0,177/kg de embalagem plástica alimentícia;
- €0,181/kg de garrafa de bebida não retornada (pelo sistema *Pfand*);
- €0,001/kg de garrafa de bebida retornada;
- €1,236/kg de copo descartável.

Nota-se que a aplicação de tais taxas não está ocorrendo de forma homogênea pelo continente. Cada país está executando de forma diferente, alguns incentivando a reciclagem com taxas menores, outros taxando apenas embalagens descartáveis. Porém parece que a introdução da contribuição compulsória da União está impulsionando a adoção de sistemas cada vez mais progressistas nos países integrantes. Todavia, algumas grandes potências econômicas europeias continuam alheios à discussão como França, Suíça, Turquia, Suécia e Bélgica (Figura 22).

Além de programas de caráter taxativo para produtores e importadores, medidas que envolvem diretamente os consumidores finais também atuam como parte do plano de sustentabilidade de alguns países europeus. Neste sistema, o valor do recipiente está incorporado ao produto de forma explícita, podendo parte deste valor ser retornado ao consumidor no ato da devolução da embalagem. Na Alemanha, por exemplo, o sistema *Pfand*

(depósito em alemão) proporciona a devolução das embalagens por meio de máquinas posicionadas no próprio estabelecimento que já fazem a contagem do material e emitem uma nota com o valor a ser retirado diretamente no caixa, ou utilizado para abater o valor da próxima compra. Este projeto, apesar de gerido por iniciativa privada (*Deutsche Pfandsystem GmbH*), conta com fiscalização e apoio governamental para seu funcionamento com início em 2003, alcançando o resultado de 95% de coleta de garrafas PET em 2022. O valor a ser recebido por embalagem retornada varia com o tipo e tamanho da mesma, sendo na maioria dos casos igual a €0,25 e pode ser identificado no rótulo junto a palavra *Pfand* (Figura 23) ou símbolo relacionado ao mesmo.

Figura 23. Rótulo Pfand



Fonte: ALEMANHACAST, 2022.

Além da Alemanha, outros onze países europeus já implementaram sistemas de retorno e depósito de embalagens. Além disso, dez países já regulamentaram seus sistemas a serem implementados no futuro. Entretanto, sete países ainda se encontram em fases de discussão sem uma decisão concreta quanto a implementação. Estes podem ser vistos na Figura 24.

Figura 24. Porcentagem de coleta de garrafas PET em 2022 na Europa



Fonte: SENSONEO, 2022.

Ao observar os dados relativos aos 12 países que já adotaram sistemas de depósito e retorno, três valores chamam atenção por estarem abaixo dos demais. Com relação a Letônia e a Eslováquia, os percentuais de 54 e 69%, respectivamente, de coletas de PET são referentes a uma fase inicial de seus projetos, tendo em vista que os dois países fizeram suas implementações em 2022. Em contrapartida, a Holanda apresenta um percentual de coleta de 65%, mesmo com seu sistema implementado em 2005.

Impulsionados pelos resultados obtidos pelos países que implementaram os sistemas de depósito e retorno, dez países europeus já estabeleceram que seu sistema entraria em vigor até 2024, sendo eles: Inglaterra, Irlanda, Grécia, Hungria, Turquia, Polónia, Portugal, Romênia, Escócia e Malta.

Com relação a Bélgica, o posicionamento atual do país é de não aderir aos sistemas de depósito e retorno, pois os resultados de coleta já são satisfatórios sem os mesmos. Este fator pode ser expresso por meio do percentual de coleta das garrafas PET, cujo valor é de 89%.

4.2 Regulamentação de embalagens alimentícias

4.2.1 No Brasil

No Brasil, o principal órgão responsável pela regulamentação de produtos alimentícios é a Anvisa por meio de suas resoluções, cujo não cumprimento pode resultar em infração sanitária. Com relação a embalagens, a RDC nº 105/1999 estipula os regulamentos técnicos sobre embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos, sendo importante que esta esteja alinhada com parâmetros do MERCOSUL. Em seu Anexo I, uma classificação conforme o tipo de alimento a ser contido pela embalagem é apresentada, assim como os meios simulantes que devem ser utilizados para determinação dos critérios técnicos que aprovarão ou não determinada embalagem. Por fim, para cada classificação de tipos de alimento, estipula-se quais dos quatro meios simulantes devem ser utilizados. Todavia, grande parte do conteúdo do decreto foi revogado por decretos subsequentes que trouxeram atualizações para os temas abordados pelo mesmo.

Com relação às metodologias e aos parâmetros técnicos para realização dos ensaios de migração total e específicas de substâncias, estes agora são estipulados pela RDC nº 51/2010, que por sua vez segue o RTM 32/10. Desta forma, os meios simulantes e os alimentos a serem testados em cada um são apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4 respectivamente. Com relação a lista positiva de polímeros, monômeros e substâncias iniciadoras que podem estar presentes na composição da embalagem plástica, esta é determinada pela RDC nº 56/2012, que por sua vez deve estar de acordo com o RTM 02/12.

Tabela 3. Meios simulantes segundo a Anvisa

Simulante	Meio
Simulante A	Água destilada ou deionizada
Simulante B	Solução de ácido acético a 3% (m/v) em água destilada ou deionizada
Simulante C	solução de etanol a 10 % (v/v) em água destilada ou deionizada, concentração que se ajustará ao conteúdo real de etanol do produto no caso desse superar os 10% (v/v)
Simulante D	solução de etanol a 95% (v/v) em água destilada ou deionizada, ou isooctano, ou MPPO (óxido de polifenileno modificado), conforme o caso
Simulante D'	Azeites/ óleos comestíveis (azeite de oliva, óleo de girassol, óleo de milho) ou misturas sintéticas de triglicerídios

Fonte: RDC nº 51/2010

Tabela 4. Relação entre tipos de alimentos e meios simulantes a serem utilizados segundo a Anvisa

Tipo de alimento	Meio Simulante
Somente alimentos aquosos não ácidos	A
Somente alimentos aquosos ácidos	B
Somente alimentos alcoólicos	C
Somente alimentos gordurosos	D ou D'
Alimentos aquosos não ácidos e alcoólicos	C
Alimentos aquosos ácidos e alcoólicos	B e C
Alimentos aquosos não ácidos contendo gorduras e óleos	A e D ou D'
Alimentos aquosos ácidos contendo gorduras e óleos	B e D ou D'
Alimentos aquosos não ácidos, alcoólicos e gordurosos	C e D ou D'
Alimentos aquosos ácidos, alcoólicos e gordurosos	B, C e D ou D'
Alimentos secos não gordurosos	Não é necessário realizar o ensaio de migração
Alimentos secos gordurosos	D ou D'

Fonte: RDC n° 51/2010

Ademais, com relação aos aditivos, a lista positiva de substâncias destinadas a embalagens alimentícias é determinada pela RDC n° 17/2008. Já os componentes para corantes e seus respectivos limites de migração são estipulados por outra resolução, a RDC n° 52/2010.

Tabela 5. Limite de migração de elementos em corantes

Elemento	Limite de migração específica (mg/kg)
Antimônio (Sb)	0,04
Arsênio (As)	0,01
Bário (Ba)	1
Boro (B)	0,5
Cadmio (Cd)	0,005
Zinco (Zn)	25
Cobre (Cu)	5
Cromo (Cr)	0,05
Estanho (Sn)	1,2
Flúor (F)	0,5
Mercúrio (Hg)	0,005
Prata (Ag)	0,05
Chumbo (Pb)	0,01

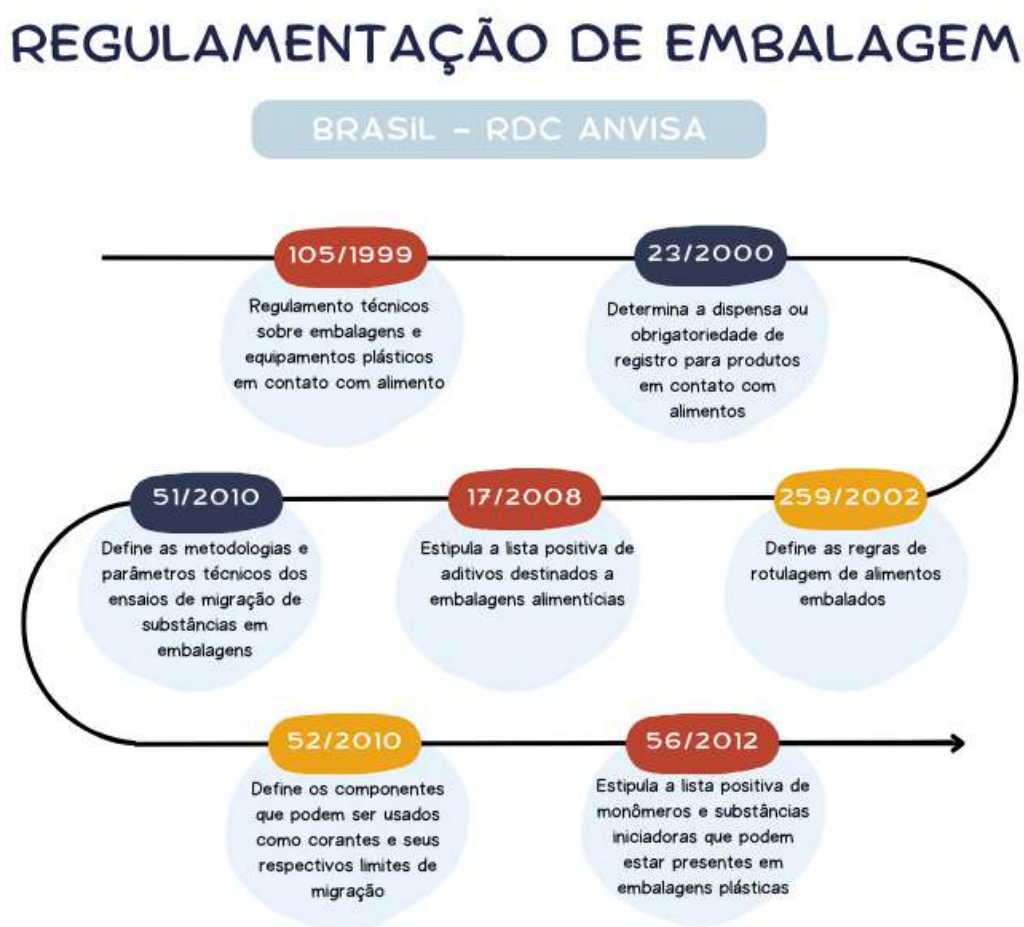
Fonte: RDC n° 52/2010

O registro ou a dispensa de obrigatoriedade do mesmo para produtos pertinentes à área de alimentos são estruturados e apresentados na RDC n° 23/2000. Esta resolução determina, em seu anexo II, a lista de produtos de registro obrigatório, onde estão presentes as embalagens recicladas. Desta forma, para o registro da embalagem reciclada, a empresa interessada deve enviar ao órgão competente do Ministério da Saúde, neste caso à Anvisa, os documentos exigidos para esse produto em seu anexo III, sendo eles: comprovante de pagamento da taxa de fiscalização da vigilância sanitária; cópia do alvará sanitário ou licença de funcionamento e ficha de cadastro de empresas, para o caso de empresas ainda não cadastradas; laudo de análise ou documentos exigidos por regulamento técnico específico e dois formulários de petição distintos (fp1 e fp2) cujo os modelos são apresentados nos anexos V e VI da própria RDC n° 23/2000.

Por fim, a rotulagem de alimentos embalados é regulada pela RDC n° 259/2002, com o intuito de definir as proibições em rótulos, tal como as informações obrigatórias. Portanto, segundo a resolução, as informações que devem constar no rótulo são: denominação de venda do alimento; lista de ingredientes; conteúdos líquidos; identificação da origem; nome ou razão

social; identificação do lote; prazo de validade; razão social do importador, caso importado; e instruções sobre preparo e uso do alimento quando necessário. Posteriormente esta resolução foi revogada pela RDC nº 727/2022, sendo esta uma versão mais atual para a rotulagem de alimentos embalados.

Figura 25. Linha do tempo das regulamentações de embalagens alimentícias – Brasil



Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.1 Material reciclado em embalagens alimentícias - Brasil

Segundo a RDC nº 105/1999, o uso de plásticos reciclados em embalagens destinadas a entrar em contato com alimentos é proibido, devendo-se utilizar o material virgem, entretanto, a utilização de *scraps* não contaminados ou degradados ainda pode ocorrer. Além disso, a proibição também não se aplica para embalagens de PET multicamadas destinadas ao

acondicionamento de bebidas não alcoólicas carbonatadas, sendo esse caso regulamentado por portaria específica.

Esta exceção para a utilização de PET reciclado em embalagens é apresentada pela PORTARIA Nº 987, DE 8 DE DEZEMBRO DE 1998 que trata sobre a regulamentação de embalagens multicamadas exclusivamente para bebidas não alcoólicas carbonatadas. Nestes recipientes, a portaria determina que a camada de PET reciclado não pode entrar em contato direto com o alimento, devendo estes serem separados por uma camada de no mínimo 25 µm de PET virgem. Além desse requisito, a camada de PET reciclado não pode ultrapassar o valor de 200 µm. Ademais, a embalagem deve comportar um produto com a vida útil inferior a um ano e não podem ser utilizadas condições de enchimento e conservação acima da temperatura ambiente. Em seu tópico 6, a portaria ainda determina que o rótulo da embalagem deve conter “Embalagem para uso exclusivo para refrigerantes”. Com relação aos flocos secos de PET reciclado ou *pellets* a serem utilizados na confecção das garrafas, estes devem passar pelos testes: pH do extrato aquoso; solubilidade em ácido clorídrico; cinzas; teor de voláteis; viscosidade intrínseca.

A portaria ainda determina que os produtores do PET reciclado para a fabricação de embalagens devem ser aprovados e fiscalizados pela Anvisa, a qual requer:

- A. Instalações e equipamentos adequados para o acondicionamento e processamento do PET pós-consumo e de descarte industrial.
- B. Pessoal especificamente treinado para atuar em todas as fases do processo.
- C. O PET pós-consumo deve provir de sistemas de coleta de materiais recicláveis que garantam níveis aceitáveis de contaminação física e química do material.
- D. Procedimentos escritos e seus registros de aplicação sobre Boas Práticas de Fabricação.
- E. Fluxograma detalhado do processo e o sistema de monitoramento dos mesmos.
- F. Registros da origem e identificação do PET pós-consumo e de descarte industrial.
- G. Registro dos resultados do controle do processo.
- H. Registro de destino dos lotes de sua produção.

Já para os produtores da embalagem propriamente dita, tanto para aprovação quanto fiscalização pode ser requerido:

- A. Instalações e equipamentos adequados para a fabricação de embalagens de PET multicamada

- B. Pessoal especificamente treinado para atuar em todas as fases do processo de fabricação.
- C. Procedimentos escritos e seus registros de aplicação sobre Boas Práticas de Fabricação.
- D. Fluxograma detalhado do processo, indicando os pontos críticos de risco para a saúde e o sistema de monitoramento dos mesmos.
- E. Procedimentos de controle do processo de fabricação das embalagens de PET multicamada que permitam a validação do mesmo.
- F. Registro dos resultados de controle do processo.
- G. Registro dos resultados do controle da espessura das camadas: interna (barreira funcional) e intermediária (reciclada) da embalagem e da avaliação da uniformidade das mesmas.
- H. Registro do destino dos lotes de sua produção.
- I. Registro da quantidade de descarte industrial gerado na produção e o destino do mesmo.

Quando se trata de contato direto com o alimento, a RDC nº 20/2008 regulamenta a utilização de PET-PCR (Pós Consumo Reciclado) grau alimentício, trazendo também a definição do mesmo. Esta RDC relaciona-se com o RTM 30/07. Para as finalidades da lei, existem três critérios para o material ser considerado PET-PCR grau alimentício:

- A. O material deve ser proveniente de um fornecedor de PET pós consumo e/ou de descarte industrial, de grau alimentício.
- B. Deve ser obtido por meio de uma tecnologia de reciclagem física e/ou química com alta eficiência de descontaminação, que tenha sido demonstrada submetendo-a a um procedimento de validação normalizado ("*challenge test*" ou equivalente), e que por isso, conta com autorizações especiais de uso, validadas pela Autoridade Nacional Competente.
- C. Deve poder ser utilizado na elaboração de embalagens em contato direto com os alimentos.

A RDC nº 20/2008 determina que a regulamentação MERCOSUL sobre embalagens de material plástico será o determinante para dizer se uma embalagem de PET PCR grau alimentício será aprovada. A primeira etapa para regularização de embalagens que contenham PET PCR é o registro da resina, sendo este solicitado pela própria empresa fabricante ou importadora. Esses registros possuem uma validade de cinco anos, podendo ser renovados via solicitação.

Com relação a rotulagem, a RDC nº 20/2008 determina, em seu item 4, que as embalagens obtidas utilizando PET PCR grau alimentício devem conter de forma indelével as seguintes informações: identificação do produtor; o número de lote ou codificação que permita sua rastreabilidade e a expressão "PET-PCR".

4.2.2 Na União Europeia

Na Europa, todo material que entrará em contato com alimentos é regrado pelas regulamentações nº 1935/2004 e nº 2023/2006 da Comissão Europeia. Essas regulamentações descrevem os padrões esperados para embalagens de grau alimentício, que garantam baixa transferência de substâncias possivelmente negativas à qualidade do alimento (como cor, cheiro, sabor e composição nutricional) e à saúde da população. Exclui-se dessa definição embalagens ativas e inteligentes, reguladas, porém fora do escopo deste trabalho. A rastreabilidade completa das embalagens é exigida dos produtores, para facilitar o controle, agilizar o *recall* de lotes defeituosos e atribuir a responsabilidade adequada. O rótulo das embalagens deve deixar claro que o material será usado em contato com alimentos, utilizando-se a simbologia padrão para tal e incluir informações de seu produtor que garantam sua rastreabilidade.

Figura 26. Símbolo indicativo do uso do material para embalagens alimentícias



Fonte: Regulamentação Nº 1935/2004 da Comissão Europeia, Anexo II

Tratando-se especificamente de embalagens plásticas, a diretiva 10/2011 designa a listagem de substâncias permitidas/proibidas e limites de migração quando presentes em embalagens em contato com alimentos, incluindo também embalagens multicamadas. Para qualquer substância que não esteja presente na diretiva deve ser primeiramente aberto um pedido que autorize seu uso, com seu potencial risco à saúde quantificado e validado pela EFSA (*European Food Safety Authority*). Um limite geral de 10 mg/dm² (ou 60 mg/kg) é mantido

como o máximo permitido de liberação para qualquer substância presente em embalagens plásticas. É importante notar que a diretriz exclui de seu texto a regulamentação de corantes, solventes e monômeros utilizados em plásticos, deixando sua regulamentação como responsabilidade dos países membros. As substâncias são divididas em 32 grupos de restrição, cada um representado por uma substância de referência para quantificação da migração. A listagem dos grupos, presente no Anexo I da diretriz, pode ser vista na Tabela 6:

Tabela 6. Grupos de restrição segundo a diretriz N° 10/2011

Grupo de restrição	Limite de migração (mg/kg)	Substância representante
1	6	Acetaldeído
2	30	Etilenoglicol
3	30	Ácido maleico
4	15	Caprolactama
5	3	Soma das substâncias do grupo
6	1	Iodo
7	1,2	Amina terciária
8	6	Soma das substâncias do grupo
9	0,18	Estanho
10	0,006	Estanho
11	1,2	Estanho
12	30	Soma das substâncias do grupo
13	1,5	Soma das substâncias do grupo
14	5	Soma das substâncias do grupo
15	15	Formaldeído
16	6	Boro
17	ND	Isocianato
18	0,05	Soma das substâncias do grupo
19	10	Dióxido de enxofre
20	30	Soma das substâncias do grupo
21	5	Ácido trimelítico
22	6	Ácido acrílico
23	6	Ácido metacrílico
24	5	Soma das substâncias do grupo
25	0,05	Soma das substâncias do grupo
26	9	Soma das substâncias do grupo
27	5	Ácido isoftálico
28	7,5	Ácido tereftálico
29	0,05	Ácido 6-hidróxi-hexanoico + Caprolactona
30	5	1,4-butanodiol
31	30	Soma das substâncias do grupo
32	60	Soma das substâncias do grupo

Fonte: Diretriz N° 10/2011

Algumas substâncias possuem restrições específicas, fora dos grupos de restrição, como pode ser visto na Tabela 7:

Tabela 7. Limites de migração específicos

Substância	Limite de migração (mg/kg)
Alumínio ¹	1
Bário	1
Cobalto	0,05
Cobre	5
Ferro	48
Lítio	0,6
Manganês	0,6
Níquel ²	0,02
Zinco	25
Aminas primárias	0,01

Fonte: diretriz N° 10/2011

As migrações são analisadas em meios simulantes padronizados, que se dividem em 6 categorias, apresentadas na Tabela 8:

Tabela 8. Meios simulantes padronizados (Europa)

Simulante	Categoria
Etanol 10%	A
Ácido acético 3%	B
Etanol 20%	C
Etanol 50%	D1
Óleo vegetal	D2
óxido de poli(2,6-difenil-p-fenileno)	E

Fonte: Diretriz N° 10/2011

Os meios A, B e C são utilizados para alimentos com caráter hidrofílico. O meio B é utilizado para alimentos com pH menor do que 4,5. O meio C é utilizado para alimentos que contenham álcool em sua composição ou que apresentem um caráter mais lipofílico.

Os meios D1 e D2 são designados para alimentos com caráter lipofílico. O meio D1 é usado para alimentos com teor alcoólico alto ou para emulsões óleo-água. Já o meio D2 é usado para alimentos com maiores teores de gordura. Já o meio E é usado para testes mais específicos de migração em alimentos secos.

A regulamentação 1935/2004 exclui de seu texto regras para uso de corantes em embalagens alimentícias. Alguns países membros como Itália e Holanda, exigem certo grau de

pureza para os corantes, mas outros, como a França, não possuem legislação vigente regulamentando seu uso.

4.2.2.1 Material reciclado em embalagens alimentícias

A regulamentação N° 282/2008 da C.E. trata do uso de materiais plásticos reciclados em embalagens alimentícias. Exclui-se do texto polímeros reciclados via rotas químicas como a solvólise. Excetua-se também a regulamentação de resíduos, sobras ou aparas da produção industrial de embalagens plásticas, desde que estes não tenham entrado em contato com alimentos ou outros contaminantes.

O plástico reciclado deve respeitar os mesmos limites de migração de substâncias previstos para plásticos virgens. O método de descontaminação do resíduo deve ser comprovado caso a caso junto à EFSA, excetuando-se as reciclagens feitas em ciclo fechado que apresentem completa rastreabilidade do resíduo utilizado, garantindo que este não foi utilizado em contato com alimentos (exceto alimentos secos). Embalagens multicamadas nas quais o plástico reciclado se encontra em camada intermediária ou exterior também não são tratadas na regulamentação.

Um dos principais pontos definidos fica na determinação de procedimentos padronizados e rastreáveis de garantia de qualidade para os produtores de plásticos, com a exigência de auditorias e registros de procedimentos de controle de qualidade. Fica definido então em seu Anexo II:

- a. um manual de política de qualidade, contendo uma definição clara dos objetivos de qualidade do reciclador, a organização do negócio e, em particular, as estruturas organizacionais, as responsabilidades da equipe gerencial e sua autoridade organizacional no que diz respeito à fabricação do plástico reciclado;
- b. os planos de controle de qualidade, incluindo aqueles para caracterização de plástico de entrada e reciclado, qualificação de fornecedores, processos de triagem, processos de lavagem, processos de limpeza profunda, processos de aquecimento ou qualquer outra parte do processo relevante para a qualidade do plástico reciclado, incluindo a escolha de pontos críticos para o controle de qualidade dos plásticos reciclados;
- c. os procedimentos gerenciais e operacionais implementados para monitorar e controlar todo o processo de reciclagem, incluindo as técnicas de inspeção e

garantia de qualidade em todas as etapas de fabricação, especialmente o estabelecimento de limites críticos nos pontos que são cruciais para a qualidade dos plásticos reciclados;

- d. os métodos de monitoramento da operação eficiente do sistema de qualidade, e em particular sua capacidade de alcançar a qualidade desejada do plástico reciclado, incluindo o controle de produtos que não estão em conformidade;
- e. os testes e protocolos analíticos, ou qualquer outra evidência científica aplicada antes, durante e após a produção de plástico reciclado, a frequência com que serão realizados e o equipamento de teste utilizado; deve ser possível rastrear adequadamente a calibração do equipamento de teste;
- f. os documentos de registro adotados.

Em outubro de 2022 passou a entrar em vigor a regulamentação N° 2022/1616 da C.E., substituindo a 282/2008. Passa a ser obrigatório atender a regulamentação da C.E., não sendo mais permitido a introdução de produtos ao mercado sujeitos apenas a leis nacionais. A EFSA registra em toda a UE uma lista pública catalogando todos os recicladores e instalações produtoras de plásticos reciclados de grau alimentício, que atualmente registra 132 empresas recicladoras com aprovação.

Somente dois tipos de tecnologia são consideradas adequadas para produzir embalagens alimentícias com plástico reciclado no mercado europeu então: PET-PCR (reciclado mecanicamente) e reciclagem em ciclos fechados e controlados, exigindo um esquema de reciclagem com rastreio da origem do resíduo plástico utilizado e com apenas uma empresa responsável por todo o esquema de reciclagem. Novas regras para as instalações de descontaminação do material são estabelecidas como:

- a descontaminação deve ser localizada em uma única unidade, evitando a possibilidade de novas contaminações;
- sua configuração e operação correspondem ao processo de reciclagem que ela aplica;
- deve ser operada conforme folha de resumo de processo mandatória para monitoramento de conformidade junto a regulamentação;
- registros da qualidade dos lotes produzidos devem ser mantidos por pelo menos 5 anos.

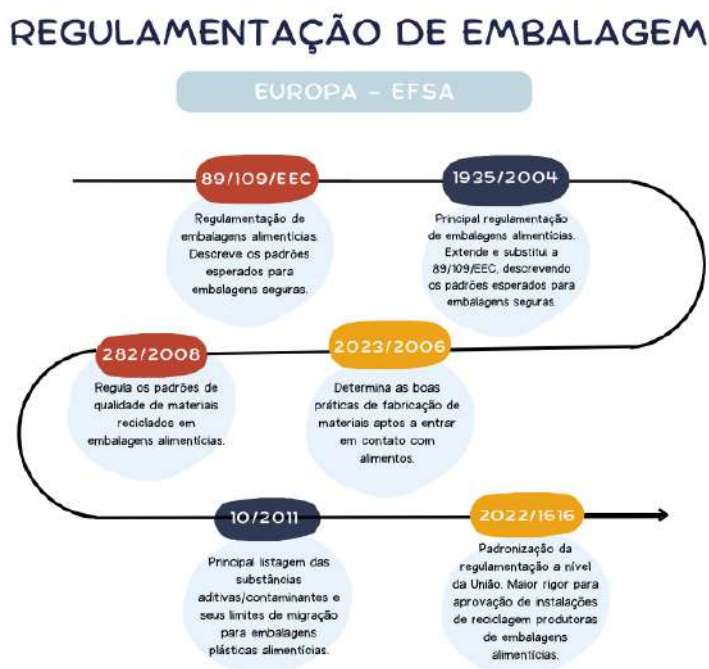
É aberta uma exceção para novas tecnologias, permitindo aprovações temporárias para que sejam coletados dados o suficiente para se minimizar as incertezas em relação ao processo.

Para tal a empresa responsável deve fornecer:

- um resumo explicando a tecnologia;
- o embasamento científico do processo;
- a comprovação de níveis seguros de contaminantes microbiológicos e químicos;
- resultados de ensaios de migração e que comprovem conformidade com os limites estabelecidos;
- diagramas ou fluxogramas que representem o processo;
- explicações dos diferenciais da tecnologia classificada como inovadora;
- uma estimativa do número de instalações de descontaminação que serão operadas e suas localidades.

O monitoramento frequente de níveis de contaminantes biológicos ou químicos deve ser mantido pelas recicladoras, com elaboração de relatórios semestrais de acompanhamento.

Figura 27. Linha do tempo das regulamentações de embalagens alimentícias – UE



Fonte: Elaboração própria.

Como observado por meio das regulações acerca da utilização de materiais plásticos reciclados em embalagens alimentícias, tanto para o Brasil quanto para a UE, somente o PET-PCR é considerado adequado para esta finalidade. Portanto, visto que o PE não é permitido em tais embalagens, este não pode passar pelo processo *bottle-to-bottle*, ficando assim fora do escopo dos próximos capítulos.

5 Estatísticas e metas de reciclagem de plásticos

5.1 No Brasil

Segundo a ABRE (Associação Brasileira de Embalagem), a indústria de embalagens em 2022 apresentou um crescimento de 3,9% de seu montante bruto em relação a 2021. A participação de embalagens plásticas no total do mercado de embalagens sofreu uma queda de 2020 a 2022, mas o plástico continua sendo o material mais utilizado para fabricação de embalagens no Brasil.

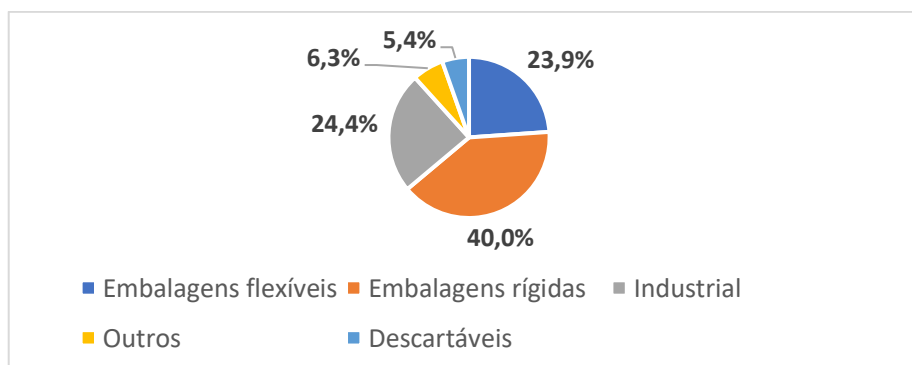
Tabela 9. Participação percentual de cada material de embalagem por valor bruto de produção do mercado de embalagens de 2020 a 2022.

	2020	2021*	2022*	
Plástico	36,0%	34,6%	33,6%	↓
Metal	22,9%	23,1%	20,8%	↓
Papelão Ondulado	18,9%	19,1%	19,6%	↑
Cartolina e Papel-Cartão	6,8%	7,2%	8,7%	↑
Vidro	4,8%	3,9%	5,2%	↑
Papel	5,9%	5,3%	5,7%	↑
Têxtil	3,1%	4,3%	3,4%	↓
Madeira	1,7%	2,6%	3,1%	↑

Fonte: ABRE, 2023.

Do total de resíduo plástico reciclado nacional, este é composto majoritariamente por embalagens, sendo o segmento responsável por 63,9% do material utilizado pela indústria como mostra a Figura 28.

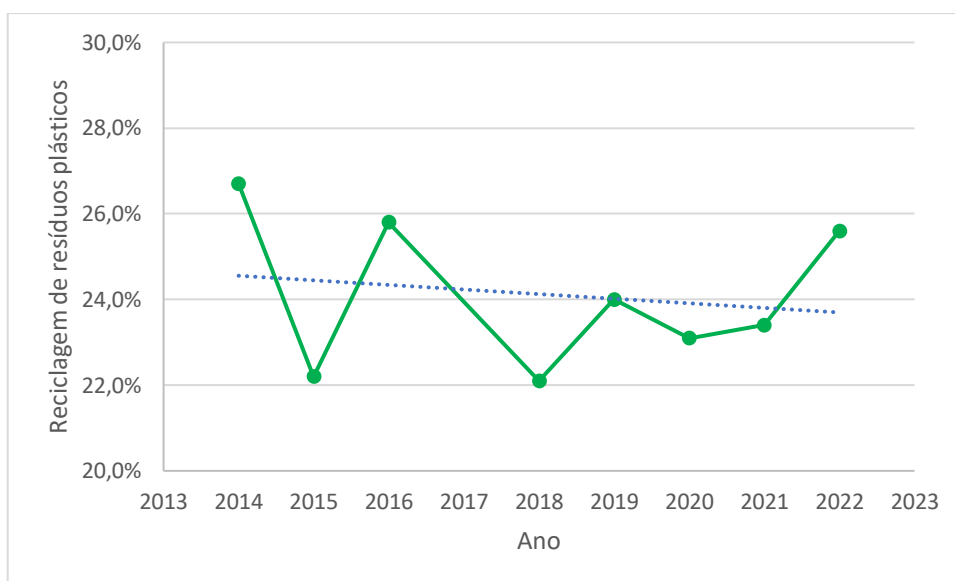
Figura 28. Volume de resíduo plástico consumido na reciclagem nacional em 2022



Fonte: Adaptado de PICPLAST, 2023.

Em 2021, segundo dados do relatório 2022 da Abiplast (Associação Brasileira da Indústria do Plástico), com dados da pesquisa realizada pela MaxiQuim, a taxa de reciclagem de PET no Brasil foi de 54,4%, o índice geral de reciclagem de plásticos foi de 23,4% e o índice de reciclagem de embalagens plásticas foi de 26,4%. A taxa de reciclagem de plásticos evoluiu para 25,6% em 2022 (PICPLAST, 2023). A progressão histórica do índice de reciclagem de resíduos plásticos no Brasil pode ser vista na Figura 29.

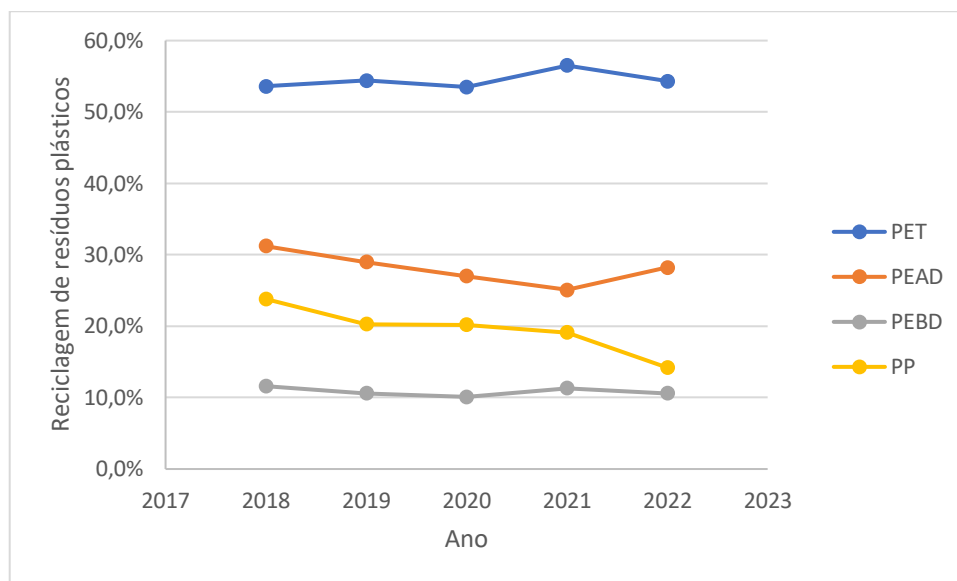
Figura 29. Índice de reciclagem de resíduos plásticos no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPLAST, 2023.

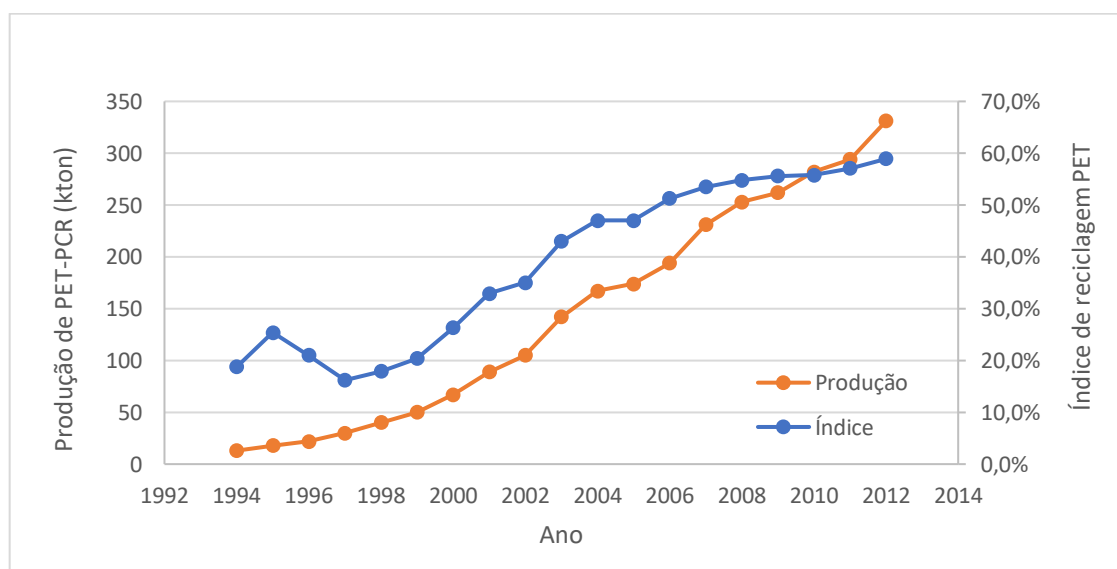
Pela linha de tendência, é possível notar uma leve declividade no índice de reciclagem de resíduos plásticos no Brasil. De 2014 até 2022, o índice não apresentou uma melhora considerável, apresentando um valor abaixo do encontrado para 9 anos atrás.

Com relação aos diferentes tipos de materiais plásticos no Brasil, o índice de reciclagem difere bastante entre eles, tendo o PET o valor mais significativo, porém sem uma evolução considerável do indicador de 2018 a 2022, permanecendo em uma faixa de 53,5-56,5%. Já o PP teve um decréscimo considerável do indicador durante o mesmo período, passando de 23,8% para 14,2%. O histórico do índice de reciclagem para PET, PEAD, PEBD e PP de 2018 a 2022 é apresentado na Figura 30.

Figura 30. Índice de reciclagem histórico de plástico PCR no Brasil

Fonte: Adaptado de PICPLAST, 2023.

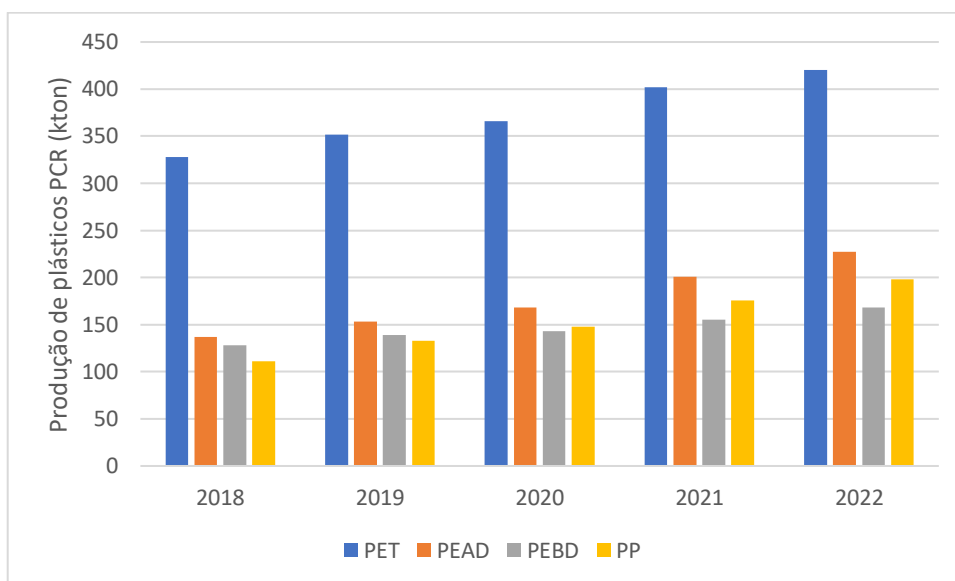
Apesar do PET ser o material plástico mais reciclado no Brasil, ao observar a série histórica do mesmo, o índice de reciclagem apresenta uma desaceleração entre 2006 e 2012, em relação aos anos anteriores, avançando menos de 8 p.p.. Considerando os índices de reciclagem de PET do período de 2018 a 2022 acima, tem-se uma estabilização do indicador, não havendo mais um progresso apreciável após 2012. A evolução histórica do índice de reciclagem de PET, assim como a produção de PET-PCR no Brasil é apresentada na Figura 32.

Figura 31. Produção e índice de reciclagem de PET-PCR no Brasil

Fonte: ABIPET, 2013.

Apesar das flutuações no índice de reciclagem de plásticos no Brasil nos últimos anos, a produção de resina PET reciclada vem evoluindo progressivamente, atingindo valores acima de 400 kton em 2022. A evolução deste indicador ao de 2018 a 2022 é apresentada na Figura 32.

Figura 32. Produção histórica de plástico PCR no Brasil



Fonte: Adaptado de PICPLAST, 2023.

Atualmente existem 76 produtos de embalagens recicladas no Brasil validados pela ANVISA, além de 34 produtos que já possuíam registro, porém sem a renovação do mesmo, totalizando assim 110 aprovações de solicitações de 2008 a 2023. Todos estes produtos possuem a denominação “PET-PCR” ou “PET PÓS CONSUMO RECICLADO” em seu registro, sendo assim todos produzidos a partir do PET. Estes produtos com registro ativo pertencem a 28 diferentes empresas apresentadas na Tabela 10. Além disso, o número de registros ativos ao final de cada ano é apresentado na Figura 33, assim como os valores de registros efetuados e vencimentos de licenças não renovadas ao longo dos anos são apresentados na Adaptado de ANVISA, 2023.

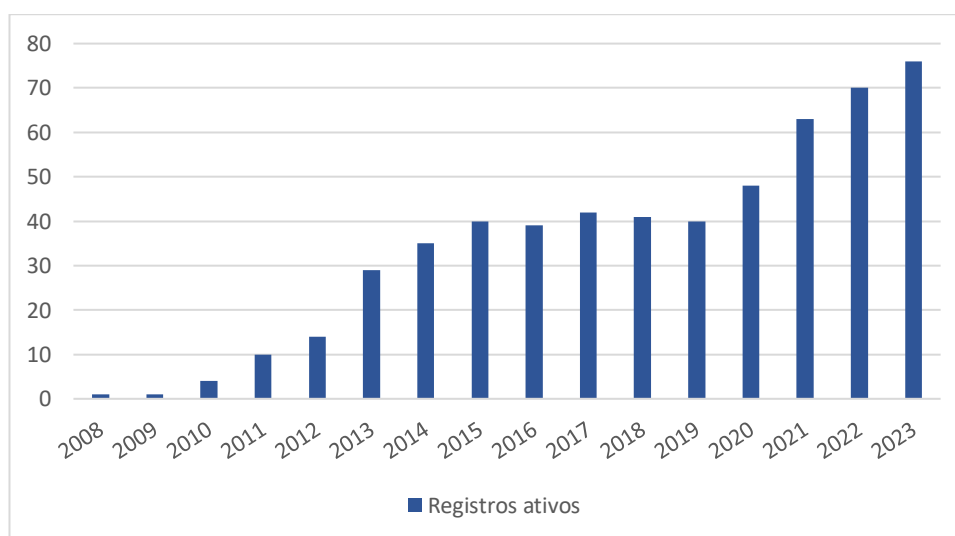
Figura 34.

Tabela 10. Empresas com registro de embalagens contendo PET-PCR no Brasil

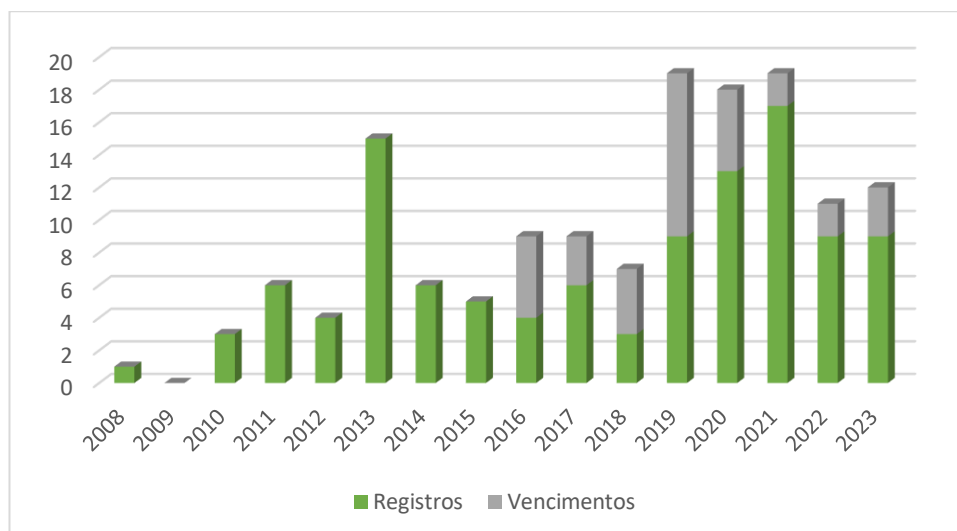
EMPRESAS COM REGISTRO DE PRODUTOS PET-PCR
AMBEV S.A
AMCOR PACKAGING DO BRASIL LTDA.
BRASALPLA BRASIL IND DE EMBALAGENS LTDA
CARGILL AGRICOLA S/A
CASTELO ALIMENTOS S.A.
CLEAR PET INDÚSTRIA, COMÉRCIO DE PLÁSTICOS LTDA EPP
CLODAX RECICLAGEM LIMITADA
CRISTALPET DO BRASIL INDUSTRIA DE EMBALAGENS LTDA
DARNEL EMBALAGENS LTDA.
ENGEPACK EMBALAGENS SÃO PAULO SA
EVERTIS BRASIL PLASTICOS S/A
FIBRAFORM INDUSTRIA DE EMBALAGENS PLASTICAS LTDA.
GLOBAL PET RECICLAGEM SA
GREEN PCR INDUSTRIA E COMÉRCIO LTDA
HNK BR INDUSTRIA DE BEBIDAS LTDA
INDORAMA VENTURES SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS BRASIL LTDA
LAMINA INDÚSTRIA PLÁSTICA LTDA
LOGOPLASTE DO BRASIL LTDA
PLASTIPAK PACKAGING DO BRASIL LTDA.
RESIPOL COMERCIO DE RESIDUOS E POLIMEROS PLASTICOS LTDA
RIOPET EMBALAGENS SA
SANPET IND COM PLASTICOS LTDA
SULPET PLASTICOS LTDA
TEPX RECICLAGEM DE MATERIAIS BENEFICIADOS LTDA
TERPHANE LTDA
VALGROUP PE INDÚSTRIA DE EMBALAGENS RÍGIDAS LTDA
VISCOTECH INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE PLÁSTICOS TÉCNICOS LTDA

Fonte: Adaptado de ANVISA, 2023.

Figura 33. Quantidade de produtos PET-PCR com registro ativo na Anvisa

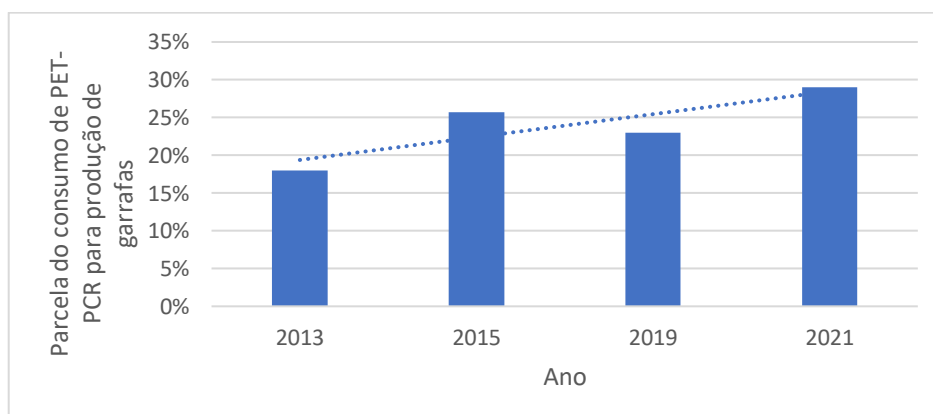


Fonte: Adaptado de ANVISA, 2023.

Figura 34. Evolução do cadastro de produtos PET-PCR na Anvisa

Fonte: Adaptado de ANVISA, 2023.

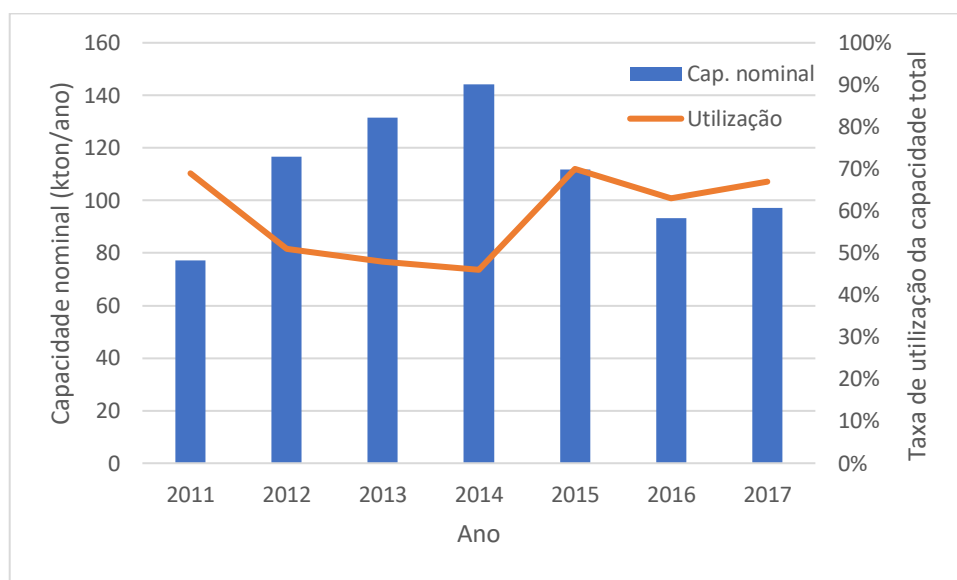
Os dados dos 9º, 10º, 11º e 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil mostram que a destinação do PET-PCR variou consideravelmente. Através destes censos realizados pela Abipet, pode-se observar o padrão da utilização do PET-PCR nacional transacionando da industrial têxtil para a indústria de embalagens. Segundo o 9º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, em 2013, 38% do consumo de PET-PCR era destinado à industrial têxtil, sendo somente 18% destinado para a produção de embalagens (alimentícias e não-alimentícias). Em 2021 esse número aumentou para 29%, sendo 24% designado para produção de têxteis, demonstrando um aumento progressivo da taxa de reciclagem *bottle-to-bottle*. Pode-se observar essa transição ao longo do tempo na Figura 35.

Figura 35. Parcela de resina PET-PCR destinada à produção de garrafas - Brasil

Fonte: Adaptado de ABIPET, 2023.

Além do índice de destinação de PET-PCR para produção de garrafas, com relação aos recicladores *bottle-to-bottle*, pode-se observar que estes atuaram abaixo de sua capacidade nominal para dados obtidos entre 2011 e 2017 como apresentado na Figura 36.

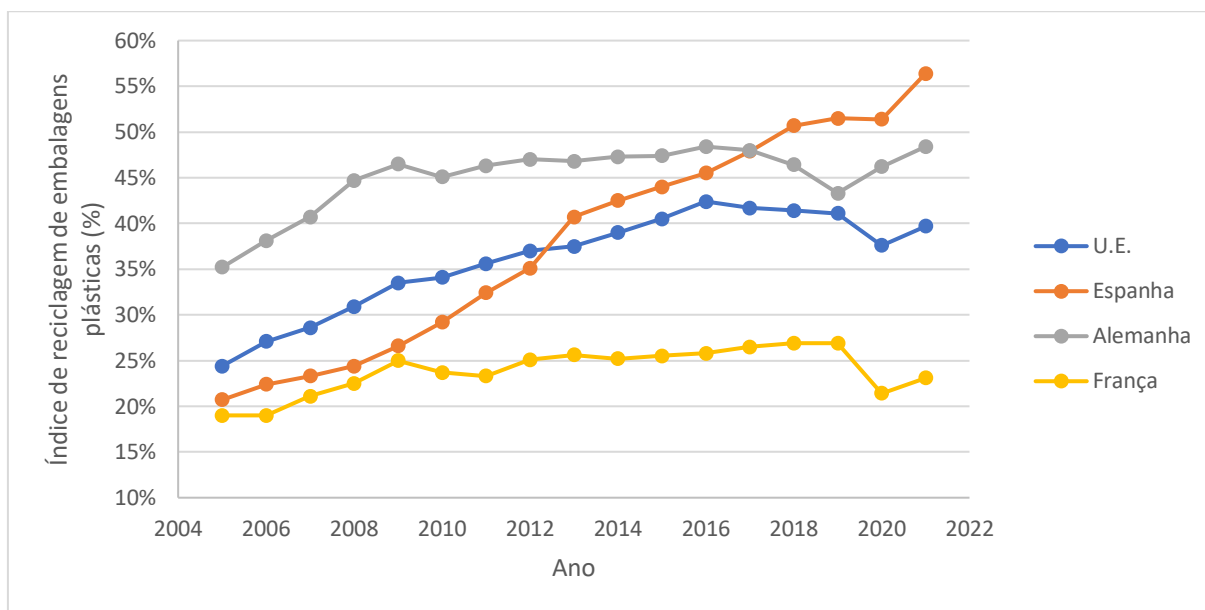
Figura 36. Capacidade nominal e taxa de utilização de recicladoras *bottle-to-bottle* (PET-PCR) no Brasil



Fonte: Adaptada de GILENO, 2020.

5.2 Na União Europeia

As diretrizes da UE têm sua aplicação e implementação individualizadas para cada país como apresentado no tópico 4.2.2. Dessa forma, espera-se que os indicadores como o índice de reciclagem de embalagens plásticas também reflitam as singularidades. Portanto, uma série histórica deste parâmetro para Espanha, Alemanha, França, e na União como um todo é apresentada na Figura 37.

Figura 37. Índice histórico de reciclagem de embalagens plásticas na Europa

Fonte: Adaptado de EUROSTAT, 2023.

Desta forma, pode-se observar uma grande discrepância entre os países analisados. O índice alemão sempre esteve acima do apresentado para a UE como um todo no período analisado. Além disso, de 2009 em diante, enquanto a França manteve a reciclagem de embalagens plásticas no país estagnada, a Espanha obteve uma curva de crescimento bem acentuada, fazendo com que ultrapassasse o índice da UE em 2013, e posteriormente o índice da Alemanha que apresentava um leve decréscimo em 2018. Entretanto, o índice alemão voltou a crescer em 2020 contrariando a tendência de decréscimo observada para a UE.

PET é o plástico de embalagens mais reciclado na Europa. Sua reciclagem se dá principalmente por processos de reciclagem mecânica. Segundo dados do relatório de 2022 – “*PET Market in Europe: State of Play*”, 97% do PET virgem é utilizado em embalagens.

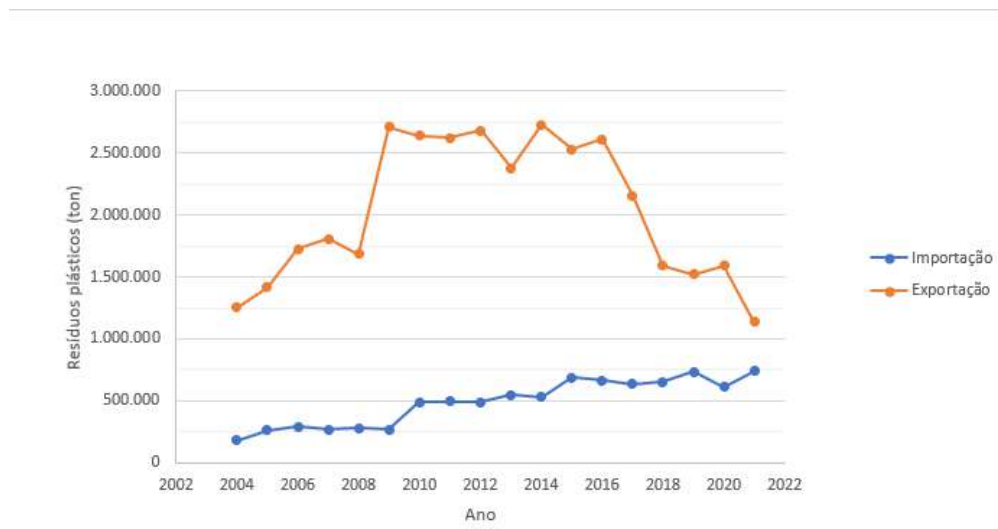
A capacidade instalada para reciclagem de PET na Europa não apresentou um crescimento notável de 2014 a 2018, mas o índice de utilização dessas instalações cresceu progressivamente no mesmo período. O estado da capacidade de reciclagem, coleta de PET e produção de PET-PCR na Europa é apresentado na Figura 38.

Figura 38. Coleta de PET, capacidade e produção de PET-PCR na Europa



Fonte: EUNOMIA, 2020.

A taxa de exportação de resíduos plásticos para territórios externos à UE apresentou um grande aumento de 2004 a 2012, apresentando um aumento maior do que 100% no período. A partir de 2014/2015 nota-se um intenso decréscimo nas exportações, anos em que foram implementadas a Reg. N° 660/2014 e o CEAP, respectivamente. A importação de resíduos plásticos mantém um padrão de crescimento consistente no período entre 2004 e 2021, partindo de 179 kton e progredindo até 740 kton. Os dados históricos de exportações e importações de resíduos plásticos da Europa podem ser vistos na Figura 39.

Figura 39. Exportações/importações de resíduo plástico na Europa

Fonte: Adaptado de EUROSTAT, 2023.

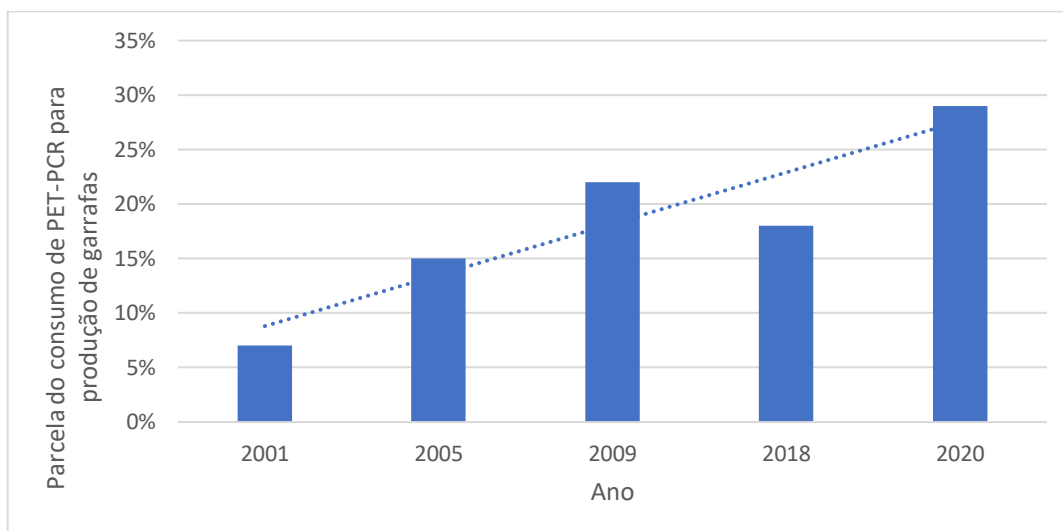
Em 2014, a EFSA emitiu uma listagem de 89 processos aprovados para produção de PET-PCR grau alimentício na Europa através da reciclagem mecânica. Este número subiu para 233 no 1º semestre de 2023. A distribuição desses processos de produção de PET-PCR está concentrada principalmente em três países: Itália, Espanha e Alemanha, que juntos concentram 54% do total. Os países com maior número de processos aprovados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11. Países europeus com maior quantidade de instalações autorizadas pela EFSA

País	Processos	Participação
Itália	58	24,9%
Espanha	37	15,9%
Alemanha	31	13,3%
França	15	6,4%
Holanda	13	5,6%
Polônia	13	5,6%

Fonte: Adaptado de EFSA, 2023.

Assim como no Brasil, existe um aumento da parcela de PET-PCR produzido que se destina a produção de garrafas plásticas e este foi se tornando o principal segmento de consumo do PET-PCR na Europa. Este aumento, indicativo do avanço da reciclagem *bottle-to-bottle*, pode ser visto na Figura 40.

Figura 40. Parcela de resina PET-PCR destinada à produção de garrafas - Europa

Fonte: Adaptado de PETCORE EUROPE, 2022.

Com o intuito de fortalecer a cadeia *bottle-to-bottle*, as diretrizes e metas estabelecidas pela C.E. e implementadas a nível nacional pelos países membros estão afetando as metas de reciclagem para grandes empresas operando na Europa. Na Tabela 12 abaixo pode-se observar algumas das maiores produtoras de garrafas PET alimentícias e suas metas estabelecidas de conteúdo reciclado em garrafas para 2025 e 2030. Algumas empresas estão estabelecendo metas que excedem os requisitos das atuais diretrizes da União.

Tabela 12. Metas estabelecidas pelos maiores produtores de garrafas PET alimentícias na Europa

Empresa	Metas 2025	Metas 2030
Coca-Cola	25% de plástico PCR em todas as embalagens plásticas ¹	50% de plástico PCR em todas as embalagens plásticas
PepsiCo	25% de plástico PCR em todas as embalagens plásticas ¹	50% de PET-PCR em todas as garrafas PET na Europa
Danone	50% de PET-PCR em todas as garrafas PET 100% de PET-PCR em todas as garrafas PET de água na Europa	
Nestlé	30% de plástico PCR em todas as embalagens plásticas 50% de PET-PCR em todas as garrafas PET de água	

Fonte: Adaptado de EUNOMIA, 2022

6 Discussão

Utilizando como base os conceitos e fundamentos técnicos apresentados no Capítulo 3, as principais legislações apresentadas no Capítulo 4, os dados e indicadores apresentados no Capítulo 5 com relação ao cenário da reciclagem de embalagens plásticas alimentícias no Brasil e na UE, pode-se gerar uma discussão unindo os três pontos-chave deste trabalho.

Com relação às tecnologias de reciclagem apresentadas no Capítulo 3, em âmbito legislativo brasileiro, não há diferenciação entre elas. Sendo assim, cabe às autoridades competentes avaliarem a solicitação de registro da resina após envio das documentações apresentadas no Capítulo 4. A legislação europeia restringe o uso da tecnologia para a produção do plástico PCR apenas à reciclagem mecânica, exigindo avaliações específicas para novas tecnologias.

A PNRS, apresentada na lei 12.305, pode ser considerada um dos maiores marcos nacionais, que por sua vez espelha-se em muitas partes no modelo europeu proposto na *Waste Framework Directive* de 2008, elaborado a partir da revisão de um modelo que se encontrava em vigor desde 1975. É possível notar uma evolução temporal no arcabouço legal brasileiro de forma similar ao europeu, que aparenta servir de referência na implementação de medidas no Brasil. As legislações foram se tornando progressivamente mais restritivas, exigindo maior responsabilidade pelo resíduo plástico inserido no meio ambiente.

As legislações brasileiras determinam, assim como as diretrizes europeias, sistemas de responsabilidade estendida do produtor, tornando os fabricantes e comerciantes responsáveis pelo impacto gerado durante o ciclo de vida dos produtos, incluindo seu descarte e reutilização. Porém, em sua implementação, os países membros da UE determinam taxas aplicadas aos produtores e importadores com relação a geração do resíduo plástico inerente aos produtos comercializados, além da diminuição tributária para produtos contendo plástico reciclável. Esta é uma das formas dos estados membros se adequarem aos requisitos da união. Além disso, diferentemente da UE, o Brasil ainda não implementou a nível nacional uma lei que proíba o uso de plásticos de uso único em seu território. Apenas alguns municípios estabeleceram restrições locais a alguns produtos desta categoria, como São Paulo e Rio de Janeiro.

No Brasil, as metas de reciclagem mais recentes, estabelecidas em 2022, apresentam índices de reciclagem de embalagens plásticas de 30% a partir de 2024. Já na Europa, em 2018 foram estabelecidas as metas de reciclagem de embalagens plásticas de 50% a partir de 2025. Comparando os índices de reciclagem com suas respectivas metas, no Brasil, é esperado um

aumento de 4,4% em relação ao último índice apresentado na seção 5.1. Na Europa, espera-se um aumento de 10,3%. Nota-se então uma abordagem mais agressiva adotada pela UE, principalmente quando se considera a implementação da meta de reciclagem de embalagens PET na UE, estabelecida em 77% até 2025. No Brasil, tal meta ainda não foi estabelecida.

Acerca da regulamentação de embalagens plásticas alimentícias, as legislações brasileira e europeia são similares no que tange limites de migração e presença de substâncias em embalagens alimentícias. Com relação ao material, tanto a Anvisa como a EFSA reconhecem o PET como o único plástico PCR próprio para contato direto com alimentos. Essas semelhanças existem principalmente porque a regulamentação brasileira se adequa às regras estipuladas pelo Mercosul, que por sua vez, utiliza como referência as regulamentações adotadas na UE, como por exemplo a lista positiva de monômeros, de corantes, limites de migração, entre outros.

Com relação a produção de PET-PCR grau alimentício, existe um número significativo de produtos com autorização no Brasil, sendo que este valor cresceu gradativamente de 2019 a 2023 levando a um total de 76 produtos com registro ativo. Este valor, mostra-se significativo quando comparado aos 233 produtos com registro em toda UE.

No cenário brasileiro, como apresentado em 5.1, até 2017, as empresas produtoras de PET-PCR para o processo *bottle-to-bottle* atuaram com, no máximo, 70% de sua capacidade total. Enquanto isso, as empresas europeias apresentaram o valor de 85,5% de utilização da sua capacidade nominal. Um dos possíveis fatores que influenciam diretamente nesse valor de ociosidade é a eficiência da coleta e segregação dentro do país, que faz com que as recicladoras tenham maior dificuldade de acesso a matéria-prima.

Com relação à coleta e segregação, cabe salientar que apesar das diretrizes da UE se aplicarem a todos os estados membros, questões como data de início da implementação, forma como é implementada e fiscalização ficam a cargo dos governos de cada país. Dessa forma, dentro da União, alguns países têm um grande foco em sistemas de depósito, enquanto outros giram em torno de uma boa coleta e segregação domiciliar. O sistema *pfand* alemão para coleta de garrafas plásticas gera um bom resultado com relação a porcentagem coletada desse material, porém a Bélgica consegue obter resultados também satisfatórios com o seu sistema mais focado na segregação domiciliar dos resíduos. Além disso, a França se mostra participativa no que diz respeito a instalações para produção de PET-PCR, porém os índices de reciclagem do país são historicamente abaixo da média esperada para a União. Este fator deve-se a sua ineficiência na coleta e segregação de seus resíduos sólidos, como demonstrado na seção 4.1.2.1, pelo seu baixo índice de retorno de garrafas PET – 47%.

No Brasil, com relação a coleta seletiva domiciliar, utilizando dados de atendimento da coleta seletiva municipal em 2021 do SNIS (Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento), foi possível obter, para a população urbana que respondeu à pesquisa, uma não abrangência pela coleta seletiva domiciliar de 60,28%, sendo assim a maior parcela da população, mostrando a ineficiência deste método de captação de recicláveis no país. A meta estipulada pelo PNRS é que este valor seja menor que 30% até 2040 como mostra a seção 4.1.1. Além disso, a nível nacional, não há atuação significativa de sistemas de depósito de embalagens que envolvem diretamente o consumidor final dos produtos como o *pfand*. Sendo assim, a obtenção da matéria prima para abastecer as recicladoras provém principalmente de cooperativas de catadores e sucateiros, que representam 86% do volume de embalagens PET coletadas no país, segundo o 12º Censo da Reciclagem de PET no Brasil, realizado pela Abipet. Esse valor, além de atrelado a parâmetros socioeconômicos como a desigualdade social, deixa evidente que o Brasil ainda possui uma estrutura muito precária para coleta e segregação quando comparado a alguns sistemas europeus bem-sucedidos. Além disso, mostra a necessidade de regulamentação para os trabalhadores desse setor, que não são tão prioritárias no cenário europeu, como o Decreto 11.414 apresentado em 4.1.1.

Além disso, o grande foco das legislações vigentes para embalagens recicladas tanto no cenário nacional quanto no europeu é o PET, por este ser o único plástico que pode passar pelo processo *bottle-to-bottle*, além de ser o plástico com maiores taxas de reciclagem e maior foco na cadeia da economia circular como visto no Capítulo 5. Com relação ao PE, este apresenta maiores desafios para que possa ser reutilizado no setor alimentício por não possuir um processo de descontaminação adequado necessário para garantia da segurança do produto final em contato com alimentos. As poliolefinas apresentam maior grau de penetração de substâncias com maior peso molecular, tornando os processos de descontaminação necessários menos eficientes durante o processo de reciclagem. Essa maior dificuldade de descontaminação limita o uso do PE reciclado como embalagem plástica alimentícia.

Como estratégia adotada para aumento da reciclagem *bottle-to-bottle*, tem-se as metas de conteúdo reciclado de embalagens PET na UE, estabelecidas em 25% até 2025 e 30% até 2030. Estas são reforçadas através de alguns instrumentos legislativos como os abordados no capítulo 4.1.2.1 que visam incentivar o aumento de conteúdo reciclado nas embalagens PET. No Brasil, durante este estudo, não foram encontradas medidas legislativas que incentivem ou reforcem maior utilização de resina PET-PCR em garrafas plásticas alimentícias.

Devido ao requisito do processo de descontaminação, a resina PET-PCR grau alimentício requer mais processamento para sua produção quando comparada à resina têxtil,

aumentando os custos operacionais de produção desta, encarecendo a resina alimentícia e tornando-a menos atrativa comercialmente. Além disso, devido a estes requisitos sanitários, a produção de PET-PCR alimentício tem um processo que apresenta menores rendimentos quando comparada à produção de PET-PCR têxtil (GILENO, 2020). Por esta razão, torna-se necessária a presença de instrumentos legislativos que reforcem a destinação da produção de PET-PCR para o setor alimentício, ainda não observados no arcabouço legal atual.

Apesar de que no Brasil existe a meta de reciclagem geral de plásticos estipulada para o ano de 2024 de 30%, devendo chegar a 40% até 2032 como mostra a seção 4.1.1, não há nenhuma meta que determine a utilização desse material reciclado para produção de novas embalagens alimentícias. Enquanto isso, a UE estipula uma meta de 55% de reciclagem de embalagens plásticas até 2030 como apresentado na seção 4.1.2 e ainda estipula uma meta específica para contemplar o sistema *bottle-to-bottle*, sendo esta de um conteúdo de 25% de PET reciclado em embalagens PET produzidas até 2025, mostrando assim uma maior preocupação com o fechamento da cadeia de economia circular de embalagens plásticas alimentícias.

7 Conclusão

Entende-se que o grande gargalo tecnológico que limita uma maior utilização de material reciclado para a produção de embalagens alimentícias está na etapa de descontaminação da matéria-prima, portanto, pode-se pontuar alguns fatores para tornar este mercado mais atrativo no cenário brasileiro. Primeiramente, as ferramentas legislativas já existentes, ou novas propostas de lei, deveriam fomentar de forma específica o uso do PET-PCR para o processo *bottle-to-bottle*, pois as metas de sustentabilidade e incentivos fiscais até o momento visam a reciclagem sem determinar a finalidade, fazendo com que grande parcela do material seja mais utilizado para a indústria têxtil ou outras aplicações que exijam um menor grau de descontaminação, dificultando a economia circular no setor de embalagens plásticas alimentícias. Além disso, não há uma legislação em âmbito nacional que determine metas da obrigatoriedade de utilização da resina reciclada em parte da composição de novas embalagens como já foi proposto no modelo europeu.

Ademais, metas mais abrangentes como índices de reciclagem, coleta e segregação para os próximos anos, que impactam diretamente na cadeia *bottle-to-bottle* estão sendo mais desafiadoras para o cenário europeu, enquanto no Brasil propôs-se um crescimento mais desacelerado desses indicadores. Além disso, o alto índice de ociosidade das recicladoras juntamente da baixa abrangência da coleta seletiva dentre os municípios brasileiros (como visto pelos dados do SNIS) mostram a necessidade de uma evolução no cenário brasileiro no quesito coleta e segregação de recicláveis, por essa ser uma etapa indispensável para obtenção da matéria-prima e facilitação na triagem da mesma para a produção de resina PCR. Portanto, entende-se que parte do arcabouço legal poderia destinar-se a um plano de coleta e segregação mais robusto e que não seja majoritariamente dependente da influência de catadores e sucateiros que não são capazes de atender toda a demanda de coleta e segregação de material plástico gerado no país.

Por fim, pode-se concluir que a implementação efetiva da logística reversa no Brasil permanece como um desafio significativo, indicando que um extenso caminho ainda precisa ser percorrido como mostram os indicadores atuais e metas estabelecidas. Apesar do considerável índice de reciclagem do PET no país, a baixa eficiência do sistema de coleta seletiva ainda limita uma maior utilização da capacidade instalada de recicladores. Como comentado no capítulo 6, a maior parte do resíduo plástico coletado no país se origina do trabalho de catadores e sucateiros, diferentemente do cenário europeu onde políticas de retorno de embalagens

envolvem diretamente os consumidores no plano de logística reversa e sistemas de coleta seletiva abrangentes que permitem um acesso facilitado à matéria-prima por parte dos recicladores. Ainda que existam avanços notáveis em algumas áreas, reconhecer a lacuna existente significa que a jornada rumo a uma logística reversa eficiente requer um comprometimento contínuo.

Ao longo deste estudo, algumas legislações e metas que diferenciam os dois cenários estudados foram estipuladas nos últimos anos, desta forma suas implementações ainda estão em estado embrionário, fazendo com que seu reflexo direto nos principais índices estudados não possa ser devidamente relacionado e alguns desafios ainda podem ser observados. Portanto, novas iniciativas devem ser conduzidas para superar os obstáculos atuais, promovendo a sustentabilidade, a gestão responsável de resíduos e contribuindo para a construção de uma economia circular mais robusta no cenário brasileiro.

8 Referências

ABIPET. 9º Censo da Reciclagem do PET no Brasil. 2013. Disponível em:

<<https://www.plastico.com.br/noticias-censo-crescimento-revalorizacao-pet/>>.

ABIPET. 10º Censo da Reciclagem do PET no Brasil. 2016. Disponível em: <<https://abipet.org.br/>>.

ABIPET. 11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil. 2020. Disponível em: <<https://abipet.org.br/>>.

ABIPET. 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://abipet.org.br/>>.

ABIPLAST. Perfis anuais das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil, 2022. Acessado via <<https://www.abiplast.org.br/publicacoes/>>

ABRE. Estudo ABRE Macroeconômico da Embalagem e Cadeia de Consumo. 2023. Disponível em:

<<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2022-2/>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Informe Técnico n. 71/2016 –GGALI/ANVISA - Pag . 15 de 16 Gerência Geral de Alimentos – GGALI Registro de Produtos Importados Pertinentes à Área de Alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, de 16 de março de 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 17, de 17 de março de 2008. Dispõe sobre Regulamento Técnico sobre Lista Positiva de Aditivos para Materiais Plásticos destinados à Elaboração de Embalagens e Equipamentos em Contato com Alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, de 18 de março de 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 20, de 26 de março de 2008. Dispõe sobre o Regulamento Técnico sobre embalagens de polietilenotereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos. Diário Oficial da União n. 59, Poder Executivo, de 27 de março de 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 51, de 26 de novembro de 2010. Dispõe sobre migração em materiais, embalagens e equipamentos plásticos destinados a entrar em contato com alimentos. Diário Oficial da União n. 228, Poder Executivo, 30 de novembro de 2010. Republicada no Diário Oficial da União n. 244, em 22 de dezembro de 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 52, de 26 de novembro de 2010. Dispõe sobre corantes em embalagens e equipamentos plásticos destinados a estar em contato com alimentos. Diário Oficial da União n. 229, Poder Executivo, de 1 de dezembro de 2010. Republicada no Diário Oficial da União n. 244, em 22 de dezembro de 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 56, de 16 de novembro de 2012. Dispõe sobre a lista positiva de monômeros, outras substâncias iniciadoras e polímeros autorizados para a elaboração de embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, de 21 de novembro de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 259, de 20 de setembro de 2002. Dispõe sobre a rotulagem dos alimentos embalados.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 727 de 1 de julho de 2022. Dispõe sobre a rotulagem dos alimentos embalados.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução n. 105, de 19 de maio de 1999. Aprova os Regulamentos Técnicos: Disposições Gerais para Embalagens e Equipamentos Plásticos em contato com Alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, de 20 de maio de 1999.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução n. 23, de 15 de março de 2000. Dispõe sobre O Manual de Procedimentos Básicos para Registro e Dispensa da Obrigatoriedade de Registro de Produtos Pertinentes à Área de Alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, de 16 de março de 2000.

ALEMANHA CAST. *Pfand*: o Sistema de recipientes retornáveis da Alemanha. 2022. Disponível em: <<https://www.alemanhacast.com.br/pfand-o-sistema-de-recipientes-retornaveis-da-alemanha/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Projeto de revisão NBR 13230: Simbologia Indicativa de Reciclabilidade e Identificação de Materiais Plásticos. Rio de Janeiro, 8p. 2006.

BARNES, K. A. SINCLAIR, C. R. WATSON, D. H. *Chemical Migration and Food Contact Materials*. 1ª ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2007.

BERNARD, E et al. *Chemolytic depolymerisation of PET: a review*. Green Chem, 2021.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

BRASIL. Decreto nº 11.044, de 13 de Abril de 2022. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem - Recicla+

BRASIL. Decreto nº 11.413, de 13 de Fevereiro de 2023. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura, no âmbito dos sistemas de logística reversa de que trata o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

BRASIL. Decreto nº 11.414, de 13 de Fevereiro de 2023. Institui o Programa Diogo de Sant’Ana Pró-Catadoras e Pró-Catadores para a Reciclagem Popular e o Comitê Interministerial para Inclusão Socioeconômica de Catadoras e Catadores de Materiais Reutilizáveis e Recicláveis.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. Lei 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecicle) e Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle).

BRASIL. Lei Federal Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a Educação Ambiental, institui a Política da Educação Ambiental e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

CABALLERO, B. M. DE MARCO, I. ADRADOS, A. LÓPEZ-URIONABARRENECHEA, A. SOLAR, J. GASTELU, N. *Possibilities and limits of pyrolysis for recycling plastic rich waste streams rejected from phones recycling plants*. Amsterdã: *Waste Management*, 57, 226-234, 2016.

CALLISTER JR., W. D. RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: an introduction*. 8ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

CANEVAROLO JR., S. V. *Ciência dos Polímeros*. 2ª ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CHANDA, M. ROY, S. K. *Plastics Fundamentals, Properties, and Testing*. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

CHEMISTRY STEPS. *What is Transesterification?*. Disponível em: <<https://www.chemistrysteps.com/what-is-transesterification>>.

COMISSÃO EUROPEIA. *Commission Regulation (EC) No 2023/2006 of 22 December 2006 on good manufacturing practice for materials and articles intended to come into contact with food*. *Official Journal of the European Union*, de 29 de dezembro de 2006. L 384, p. 75.

COMISSÃO EUROPEIA. *Commission Regulation (EC) No 282/2008 of 27 March 2008 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods and amending Regulation (EC) No 2023/2006*. *Official Journal of the European Union*, de 28 de março de 2008. L 86, p. 9.

COMISSÃO EUROPEIA. *Commission Regulation (EU) 2022/1616 of 15 September 2022 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods, and repealing Regulation (EC) No 282/2008*. *Official Journal of the European Union*, de 20 de setembro de 2022. L 243, p. 3.

COMISSÃO EUROPEIA. *Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food*. *Official Journal of the European Union*, de 15 de janeiro de 2011. L 12, p. 1.

COMISSÃO EUROPEIA. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. COM(2015) 614 de 2 de dezembro de 2015.

COMISSÃO EUROPEIA. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*. COM(2018) 28 de 16 de Janeiro de 2018.

COMISSÃO EUROPEIA. *Council Decision 2020/2053 of 14 December 2020 on the system of own resources of the European Union and repealing Decision 2014/335/EU, Euratom*. *Official Journal of the European Union*, de 15 de dezembro de 2020. L 424, p. 1.

COMISSÃO EUROPEIA. *Council Directive 75/442/EC of 15 July 1975 on waste*. *Official Journal of the European Communities*, de 25 de julho de 1975. L 194, p. 39.

COMISSÃO EUROPEIA. *Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste*. *Official Journal of the European Communities*, de 31 de dezembro de 1994. L 365, p. 10.

COMISSÃO EUROPEIA. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste*. *Official Journal of the European Union*, de 22 de novembro de 2008. L 312, p. 3.

COMISSÃO EUROPEIA. *Directive 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*. *Official Journal of the European Union*, de 14 de junho de 2018. L 150, p. 109.

COMISSÃO EUROPEIA. *Directive 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment*. *Official Journal of the European Union*, de 12 de junho de 2019. L 155, p. 1.

COMISSÃO EUROPEIA. *Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC*. *Official Journal of the European Union*, de 13 de novembro de 2004. L 338, p. 4.

COMISSÃO EUROPEIA. *Regulation 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*. *Official Journal of the European Union*, de 9 de junho de 2021. L 243, p. 1.

COMISSÃO EUROPEIA. *Regulation No 66/2010 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the EU Ecolabel*. *Official Journal of the European Union*, de 30 de janeiro de 2010. L 27, p. 1.

COMISSÃO EUROPEIA. *Regulation No 660/2014 of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 amending Regulation (EC) No 1013/2006 on shipments of waste*. *Official Journal of the European Union*, de 27 de junho de 2014. L 189, p. 135.

COMISSÃO EUROPEIA. *Union register of technologies, recyclers, recycling processes, recycling schemes, and decontamination installations*. Disponível em: < https://food.ec.europa.eu/safety/chemical-safety/food-contact-materials/plastic-recycling/resources-plastic-recyclers_en >. Acesso em 15 de nov. 2023.

CUSANO, I. CAMPAGNOLO, L. AURILIA, M. COSTANZO, S. GRIZZUTI, N. *Rheology of Recycled PET*. Basiléia: *Materials*, 16, 3358, 2023.

DAI, L et al. *Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review*. Amsterdã, *Progress in Energy and Combustion Science*, Elsevier, 2022.

DOGU, O et al. *The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions*. *Progress in Energy and Combustion Science*. Elsevier, 2021.

EMBLEM, A. EMBLEM H. *Packaging technology: Fundamentals, materials and processes*. 1ª ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2012.

EUNOMIA. “How circular is PET?”, 2022. Acessado via < <https://zerowasteeurope.eu> >

EUNOMIA. *PET Market in Europe: State of Play*. 2020. Disponível em: <<https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/pet-market-in-europe-state-of-play/>>.

EUROPEAN COMMISSION. *Waste Framework Directive*. 2023. Disponível em: <https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en>.

EXPLAINTHATSTUFF. *Eco labeling*. 2022. Disponível em: <<https://www.explainthatstuff.com/eco-labelling.html>>.

FOODPRINT. *The FoodPrint of Food Packaging*. 2019. Acessado via < foodprint.org/reports/the-foodprint-of-food-packaging >.

FRANCIS, R. *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. Wiley-VCH, 2016

GAYLORD, N. G. *Compatibilizing Agents: Structure and Function in Polyblends*. Abingdon: *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*, 26, 8, 1211-1229, 2006.

GILENO, L. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET EM CONTEXTO BRASILEIRO: ROTAS B2B (BOTTLE-TO-BOTTLE) E B2F (BOTTLE-TO-FIBER). Poços de Caldas-MG: Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alfenas, 2020.

GROH, K. J. BACKHAUS, T. CARNEY-ALMROTH, B. GEUEKE, B. INOSTROZA, P. A., LENNQUIST, A. LESLIE, H. A. MAFFINI, M. SLUNGE, D. TRASANDE, L. WARHURST, A. M. MUNCKE, J. *Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards*. Amsterdã: *Science of The Total Environment*, 651, 2, 3253-3268, 2019.

HASANZADEH, R; MOJAVER, P. *Plastic Waste Treatment and Management: Gasification Processes*. Berlin, Springer, 2021.

HONUS, S et al. *Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I: Production and physical properties*. Elsevier, 2018.

JAYAKUMAR, A. RADOOR, S. PARAMESWARANPILLAI, J. RADHAKRISHNAN, E. K. NAIR, I. C. SIENGCHIN, S. *3 – Elastomer-based blends*. Amsterdã: *Elastomer Blends and Composites*, 33-43, 2022.

- Ji, Li-na. *Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET)*. Bedok: *Applied Mechanics and Materials*, 312, 406-410, 2013.
- JIANG, J et al. *From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review*. Elsevier, 2021.
- JORGE, N. Embalagens para Alimentos. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2013.
- KIYATAKA, P. Chumbo, Mercúrio e Arsênio em Embalagens Poliméricas Para Alimentos Por ICP OES. Campinas, 2013.
- Li, H et al. *Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges*. Green Chem, 2022.
- LODGE, T. P. HIEMENZ, P. C. *Polymer Chemistry*. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.
- LÓPEZ, M. d. M. C. PERNAS, A. I. A. LÓPEZ, M. J. A. LATORRE, A. L. VILARIÑO, J. M. L. RODRÍGUEZ, M. V. G. *Assessing changes on poly(ethylene terephthalate) properties after recycling: Mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material*. Amsterdã: *Materials Chemistry and Physics*, 147, 884-894, 2014.
- MAISELS, A., HILLER, A. and SIMON, F.-G. *Chemical Recycling for Plastic Waste: Status and Perspectives*. 2022
- MANO, E. B. MENDES, L. C. Introdução a Polímeros. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 1999.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. Secretaria de Vigilância Sanitária. Portaria nº 987, de 08 de dezembro de 1998. Aprova o Regulamento Técnico para embalagens descartáveis de polietileno tereftalato - PET - multicamada destinadas ao acondicionamento de bebidas não alcóolicas carbonatadas. Diário Oficial da União; Poder Executivo, de 09 de dezembro de 1998.
- MORELLE, R. *Mariana Trench: Deepest-ever sub dive finds plastic bag*. BBC News. 13 de maio de 2019. Disponível em: < <https://www.bbc.com/news/science-environment-48230157> >. Acesso em 02 dez. 2023.
- OTTO, G. *Plastic Packaging: Interactions with Food and Pharmaceuticals*. 2ª ed. Weinheim, Wiley-VCH, 2008.
- PETCORE EUROPE. *PET Market in Europe: State of Play*. 2022. Disponível em: <<https://www.petcore-europe.org/news-events/409-pet-market-in-europe-state-of-play-2022.html>>.
- PICPLAST. Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil. 2023. Webinar acessado via <https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/09/Indices-Reciclagem-2022_PICPlast_divulgacao.pdf>.
- PROPEQ. Por que a reciclagem de PET é importante? Venha aprender seu processo e benefícios! 2021. Disponível em: < <https://propeq.com/reciclagem-de-pet/> >
- PWC. *Plastic Packaging Tax*. 2023. Disponível em: <<https://www.pwc.co.uk/services/tax/plastic-packaging-tax.html>>.

- ROSATO, D. V., ROSATO, D. V. ROSATO, M. V. *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*. 1ª ed. Amsterdã: Elsevier Science, 2004.
- SCHYNS, Z. O. G. SHAVER, M. P. *Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review*. Weinheim: *Macromolecular Rapid Communications*, 42, 2000415, 2021.
- SENSONEO. *Detailed overview and results of the current deposit return scheme implementations in Europe*. 2022. Disponível em: <<https://sensoneo.com/waste-library/deposit-return-schemes-overview-europe/>>.
- SOARES, N.D.F.F., SILVA, W.A., PIRES, A.C.S., et al., Novos desenvolvimentos e aplicações em embalagens de alimentos, *Ceres*, v. 56, n. 4, pp. 370–378, 2009.
- SOONG, Y.-H. V. SOBKOWICZ, M. J. Xie, D. *Recent Advances in Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Wastes*. Basileia: *Bioengineering*, 9, 98, 2022.
- SOUZA, S. F.; & Fonseca, U. L. (2010). Logística reversa: oportunidades para redução de custos em decorrência da evolução do fator ecológico. *Revista Terceiro Setor & Gestão- UnG*, 3(1), 29-39.
- SPINACÉ, M. PAOLI, M. *Tecnologia da Reciclagem de Polímeros*. Campinas: Quím. Nova, Vol. 28, No. 1, 65-72, 2005.
- STAHEL, W. R. *The circular economy*. Londres: *Nature*, 531, 435-438, 2016.
- STOKES, V. K. *Introduction to Plastics Engineering*. 1ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.
- SU, Q.-Z. VERA, P. NERÍN, C. LIN, Q.-B. ZHONG, H.-N. *Safety concerns of recycling postconsumer polyolefins for food contact uses: Regarding (semi-)volatile migrants untargetedly screened*. Amsterdã: *Resources, Conservation & Recycling*, 167, 105365, 2021.
- THIOUNN, T., & SMITH, R. C. (2020). *Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste*. *Journal of Polymer Science*. Wiley, 2020.
- TORRES, D. JIANG, Y. SANCHEZ-MONSALVE, D. A. LEEKE, G. A. *Hydrochloric acid removal from the thermogravimetric pyrolysis of PVC*. Amsterdã: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020.
- ULLMANN *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 7ª ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
- UNEP. *Plastics pollution toolkit*. Sem data. Disponível em: <<https://leap.unep.org/en/content/basic-page/plastics-pollution-toolkit-about>>. Acesso em 03 dez. 2023.
- VOLANTI, M. CESPI, D. PASSARINI, F. NERI, E. CAVANI, F. MIZSEY, P. FOZER D. *Terephthalic acid from renewable sources: early-stage sustainability analysis of a bio-PET precursor*. Londres: *Green Chemistry*, 4, 21, 885-896, 2019.
- WAGNER, M. *Plastics tax in Germany - the Single-Use Plastic Fund Act*. 2023. Acesso via <<https://www.bdo.de/en-gb/insights/publications/tax-legal>>.
- WALKER, T. et al. *Recycling of multilayer plastic packaging materials by solvent-targeted recovery and precipitation*. Washington: *Science Advances*, 6, 47, 2020.

WTS GLOBAL. *Plastic Taxation in Europe: Update 2023*. 2023. Disponível em:
<<https://wts.com/global/publishing-article/20230522-plastic-taxation-europe-update-2023~publishing-article>>.

YOUNG, R. J. LOVELL P. A. *Introduction to Polymers*. 3^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.