

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Julia Faria Coutinho
Rafael Eudes Ferreira



INVESTIGAÇÃO DE RESULTADOS DE TAXAS DE
RECICLAGEM DE POLÍMEROS DE ESTIRENO
APRESENTADOS PELA INDÚSTRIA NO BRASIL

RIO DE JANEIRO

2023

Julia Faria Coutinho
Rafael Eudes Ferreira

INVESTIGAÇÃO DE RESULTADOS DE TAXAS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS
DE ESTIRENO APRESENTADOS PELA INDÚSTRIA NO BRASIL

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.

Orientadores: Bettina Susanne Hoffmann
Fábio de Almeida Oroski

Rio de Janeiro
2023

Julia Faria Coutinho
Rafael Eudes Ferreira

INVESTIGAÇÃO DE RESULTADOS DE TAXAS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS
DE ESTIRENO APRESENTADOS PELA INDÚSTRIA NO BRASIL

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.

Bettina Susanne Hoffmann, D. Sc., UFRJ

Fábio de Almeida Oroski, D. Sc., UFRJ

Marcelo Mendes Vianna, D. Sc., UFRJ

Hanna Schneider Rodrigues, B. Sc, UFRJ

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS - JULIA FARIA COUTINHO

Agradeço a minha família por me darem o exemplo, suporte, incentivo e também um pouco de pressão, completamente necessária para mim depois dos 5 anos, para que eu concluísse essa graduação.

Agradeço a todos os professores e colegas que conheci durante o curso, nem sempre foi em um processo fácil, mas teve muito aprendizado pessoal e técnico, com bons momentos que guardarei para sempre comigo.

Ao CirculaCT, agora CirculaUFRJ, o projeto de extensão que participei por boa parte do curso e tive a oportunidade de entrar logo em sua criação e acompanhar a sua adaptação durante a pandemia para continuar atuando e ampliar o seu impacto. Em períodos de laboratórios e matérias com longos cálculos massantes, foi nele que recuperei minha motivação e relembrei porque escolhi esse curso.

Por último, mas, com certeza, não menos importante, agradeço aos orientadores por mostrarem o caminho de desenvolvimento deste trabalho que finalmente será o meu último realizado nesta graduação. Em especial a Susanne Hoffmann, pelos vários anos de orientação, na extensão, iniciação científica e neste TCC; três projetos diferentes que me deram experiência altamente construtiva para o meu desenvolvimento profissional e ampliaram minhas visões do mundo. Quem sabe nos vemos por mais alguns anos no mestrado?

Obrigada por tudo!

As muitas horas de 485 valeram a pena.

AGRADECIMENTOS - RAFAEL EUDES FERREIRA

Gostaria de dedicar a realização deste trabalho às inúmeras pessoas que fazem parte da minha trajetória acadêmica durante os meus anos de estadia nesta universidade. Foram diversos desafios e conquistas que não seriam possíveis sem o suporte e solidariedade de diversas pessoas especiais.

Aos meus pais, José Eudes e Marlúcia Mendes, gostaria de agradecer por todo cuidado e perseverança na minha trajetória pessoal e profissional. Sem vocês não teria alcançado as conquistas que tive até hoje, e sou imensamente grato por ter vocês como pais. Mãe, obrigado por ser a minha primeira e principal educadora, e pai, obrigado por toda parceria e humildade.

Às minhas irmãs, Amanda Eudes e Claudia Coutinho, que sempre me apoiaram e vibraram com todas as conquistas alcançadas. O meu muito obrigado por todo afeto demonstrado ao irmão caçula de vocês.

Ao grupo de amigos da universidade “Tijucanos”, que estiveram presentes desde o começo da minha jornada nesta universidade até os dias de hoje: Beatris Serrano, João Guilherme, João Pedro, João Vitor, João Victor, e Vinícius Machado.

Aos grandes amigos de graduação, que deram apoio fundamental ao longo de diversas matérias, provas, trabalhos e festas em conjunto: Lara Sillman, Lurian Sigolo, Pedro Franco, Pedro Danenhauer, e Antônio Taboada (*in memoriam*).

Ao projeto de extensão Circula UFRJ, antigo Circula CT, que ao longo desses 5 anos de atividades foi responsável por abrir portas que jamais imaginei que seriam possíveis. O meu muito obrigado por me ajudar a escolher a carreira profissional que sigo hoje.

Aos orientadores Susanne Hoffman e Fábio Oroski, que tiveram papel fundamental na realização deste trabalho. Obrigado pela perseverança, confiança e dedicação em nos guiar em cada etapa deste processo. E um obrigado especial por todos os ensinamentos e conselhos à Susanne Hoffman, que me acompanha há tanto tempo nesta jornada por um mundo resíduo zero.

Finalmente, a todos os professores que fizeram parte da minha jornada no Instituto Federal do Rio de Janeiro e na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Obrigado por toda dedicação, paciência e compromisso na minha formação acadêmica e pessoal.

“If we cannot sustain the environment, we cannot sustain ourselves.”

Wangari Maathai.

RESUMO

COUTINHO, Julia Faria; FERREIRA, Rafael Eudes. **Investigação de Resultados de Taxas de Reciclagem de Polímeros de Estireno Apresentados pela Indústria no Brasil**. 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.

As principais aplicações de plásticos são nos setores de embalagens e construção civil. Muito utilizado nesses setores, o Poliestireno Expandido (EPS) tem a qualidade de possuir uma baixa densidade e bom isolamento térmico e acústico. Em contrapartida, o EPS, devido às mesmas características que levam a sua utilização, também ocupa um volume de até 20% dos aterros sanitários e é está sempre presente em análises de resíduos coletados de praias e ambientes marinhos. Outros polímeros que utilizam o estireno como monômero e têm amplo consumo são o poliestireno (PS) e o poliestireno extrudado (XPS), o último muitas vezes confundido com EPS devido às suas similaridades físicas. A Associação Brasileira da Indústria dos Plásticos (ABIPLAST) publica anualmente dados sobre taxas de reciclagem de plásticos, onde a taxa de reciclagem de PS se encontra acima de 30%. Para verificar esse valor, este estudo desenvolve uma metodologia para o cálculo da taxa de reciclagem, que utiliza estimativas de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) do Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR) e da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), baseadas nos volumes de RSU coletado. Para quantificar a participação de PS no RSU gerado foi utilizado o estudo nacional de análises gravimétricas do PNUMA. A taxa de reciclagem foi então calculada cruzando quantidades de PS pós-consumo (PCR) divulgado pela indústria e a fração de resíduos gerados utilizando PNUMA e dados de ABRELPE (Cenário base 1) e MDR (Cenário base 2). Notas fiscais de uma entidade gestora de créditos de logística reversa foram analisadas para avaliar o quantitativo de resíduos intermediados pela entidade que eram destinados à reciclagem. Foram comparados o dado da indústria para taxa de reciclagem (30,9%), os Cenário base 1 (7,66%) e 2 (8,49%) das estimativas de taxa de reciclagem e a análise das notas fiscais, e foi

constatado que o valor apresentado pela indústria é mais que o triplo dos dados estimados neste trabalho.

Palavras-chave: reciclagem; polímero; estireno; indústria.

ABSTRACT

COUTINHO, Julia Faria; FERREIRA, Rafael Eudes. **Investigação de Resultados de Taxas de Reciclagem de Polímeros de Estireno Apresentados pela Indústria no Brasil**. 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.

The main applications of plastics are in the packaging and civil construction sectors. Widely used in these sectors, Expanded Polystyrene (EPS) presents low density and good thermal and acoustic insulation. On the other hand, EPS, due to the same characteristics that lead to its wide use, it occupies a volume of up to 20% of landfills and is always present in waste leaked to the environment. Other polymers that use styrene as a monomer and are widely consumed are polystyrene (PS) and extruded polystyrene (XPS), the latter often confused with EPS due to its physical similarities. The Brazilian Plastics Industry Association (ABIPLAST) annually publishes data on plastics recycling rates, where the PS recycling rate is above 30%. To verify this value, this study develops a methodology for calculating the recycling rate, which uses Urban Solid Waste (MSW) generation estimates from the Ministry of Regional Development (MDR) and the Brazilian Association of Public Cleaning Companies and Special Waste (ABRELPE), based on the volumes of MSW collected. To quantify the participation of PS in the MSW generated, the UNEP national gravimetric analysis study was used. The recycling rate was then calculated by cross-referencing post-consumer PS (PCR) quantities reported by the industry and the fraction of waste generated using UNEP and data from ABRELPE (Base Scenario 1) and MDR (Base Scenario 2). Invoices from a reverse logistics credit management entity were analyzed to assess the amount of waste intermediated by the entity that was destined for recycling. Industry data for recycling rate (30.9%), Base Scenario 1 (7.66%) and 2 (8.49%) of recycling rate estimates and analysis of invoices were compared, and it was found that the value presented by the industry is more than three times the data estimated in this work.

Keywords: recycling; polymer; styrene; industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de (a) estrutura molecular e precursores do estireno e (b) processo de polimerização por suspensão para a formação de pérolas de poliestireno.

Figura 2 - Principais polímeros de estireno.

Figura 3 - Alguns exemplos de aplicações de EPS e XPS: (a) perfis de EPS, (b) copo térmico de XPS, (c) resíduos de EPS, (d) marmitta de XPS, (e) blocos de EPS e (f) caixas térmicas de EPS.

Figura 4 - Cadeia de suprimentos e canais reversos do EPS.

Figura 5 - Fluxograma do funcionamento da verificação, compra e comércio de créditos de logística reversa.

Figura 6 - Gravimetria total dos materiais recuperados pelos programas de logística reversa de embalagens em geral nos anos de 2021 e 2022.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Empresas signatárias do Acordo Setorial para Logística Reversa pelas associações ABIPLAST e PLASTIVIDA que tem como produtos polímeros de estireno.

Tabela 2 - Taxas de Reciclagem de EPS referentes ao ano de 2021, calculadas por diferentes entidades e referentes a diversas localidades.

Tabela 3 - Histórico de índice de reciclagem de plástico pós-consumo (PCR).

Tabela 4 - Comparativo em massa da produção de resina pós-consumo (PCR) em %.

Tabela 5 - Produção de resina pós-consumo (PCR) em mil ton.

Tabela 6 - Taxa de reciclagem estimada para o PS.

Tabela 7 - Comparativo em massa das resinas consumidas para compensação de crédito de logística reversa.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABRAPEX	Associação Brasileira do Poliestireno Expandido
ABRE	Associação Brasileira de Embalagem
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
BOPP	Poliestireno biorientado
EPS	Poliestireno expandido
GPPS	Poliestireno para propósitos gerais (cristal)
HIPS	Poliestireno de alto impacto
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
NCM	Nomenclatura Comum do Mercosul
PB	Polibutadieno
PCR	Resina pós-consumo
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PICPLAST	Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SAN	Estireno acrilonitrila
SBR	Borracha de Estireno Butadieno
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre o Saneamento
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
XPS	Poliestireno extrudado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.2.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 POLIESTIRENO (PS)	18
2.1.1 ASPECTOS GERAIS	18
2.1.1.1 POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS)	20
2.1.1.2 ESPUMAS SEMI-RÍGIDAS DE ESTIRENO	20
2.1.1.2.1 POLIESTIRENO EXTRUDADO (XPS)	20
2.1.1.2.2 POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	21
2.1.2 SOBRE A RECICLAGEM	22
2.1.2.1 PARTICULARIDADES DE RECICLAGEM DE EPS e XPS	23
2.1.2.2 AS TAXAS DE RECICLAGEM DE EPS PELO MUNDO	28
2.2 LOGÍSTICA REVERSA DE EMBALAGENS	30
2.2.1 ARCABOUÇO LEGAL DO PAÍS	30
2.2.2 PROGRAMAS DE LOGÍSTICA REVERSA	32
3 METODOLOGIA	34
3.1 DADOS DE RECICLAGEM DA INDÚSTRIA DE PLÁSTICO	35
3.2 ESTIMATIVA DA TAXA DE RECICLAGEM DO POLIESTIRENO	36
3.3 ANÁLISE DAS NOTAS FISCAIS DE UMA ENTIDADE GESTORA DE CRÉDITOS DE LOGÍSTICA REVERSA	37
3.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	38
4 RESULTADOS	38
4.1 DADOS FORNECIDOS PELA ABIPLAST	38
4.2 TAXA DE RECICLAGEM ESTIMADA PARA PS, XPS E EPS	40
4.3 PRINCIPAIS RESINAS CONSUMIDAS PARA CRÉDITO DE LOGÍSTICA REVERSA	41
4.4 COMPARATIVO DE DADOS	42

5 CONCLUSÕES	43
6 REFERÊNCIAS	45

43
45

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O plástico é um tipo de material altamente presente no cotidiano devido a sua variedade de propriedades físicas, químicas e mecânicas e seu custo de produção (Ocharán, 2017). O primeiro plástico semissintético produzido pelo homem, chamado de Parkesine, foi desenvolvido em 1855 pelo britânico Alexander Parkes (Rasmussen, 2021; Mossman, 2017). Mas apenas no período após a Segunda Guerra Mundial que o consumo de plásticos foi mais disseminado por ser um bom material para embalagens e facilitar o transporte (Freinkel, 2011).

Atualmente, os plásticos possuem uma diversa gama de aplicações e produtos que podem ser encontrados na forma de bens de consumo. Somente em 2021, foram produzidas globalmente mais de 390 milhões de toneladas do material (PLASTICS EUROPE, 2022) e de acordo com a tendência mundial, é esperado que 1,1 bilhão de toneladas por ano de plástico sejam produzidos anualmente em 2050 (GEYER, 2020).

No que se refere à origem dos plásticos produzidos, é estimado que atualmente cerca de 90,2% dos plásticos possuem matéria-prima de origem fóssil, 8,3% de reciclados e 1,5% de processos microbiológicos (PLASTICS EUROPE, 2022). A matéria-prima fóssil é a mais utilizada para a produção de plásticos, dependendo da região geográfica são utilizadas as reservas em gases ou em óleo, e aproximadamente 6% da extração mundial é destinada à produção dessas resinas. (NEUFELD et al., 2016). Os setores de embalagem e construção civil são os principais consumidores do material, totalizando cerca 44% e 18% da produção mundial, respectivamente. (PLASTICS THE FACTS, 2022).

Devido à grande diversidade de polímeros e aditivos utilizados na produção dos plásticos, a fim de atender uma série de propriedades físicas e químicas para diferentes aplicações, a reciclagem pode ser inviabilizada por dificuldades: na coleta dos resíduos, separação das diferentes resinas, transporte dos resíduos, pureza exigida na matéria-prima para a reciclagem. Mundialmente, apenas 10% de todo plástico produzido é reciclado, 14% incinerado e os outros 76% dos plásticos são destinados para a disposição final, como em aterros sanitários e lixões (GEYER, 2020). Há ainda a parte do material descartado que não é contabilizada porque não é coletada ou sofre vazamentos no sistema de coleta e transporte ou mesmo no local de disposição final, principalmente quando este é um lixão.

Dados de análise do consumo no Brasil mostram que 39,6% dos plásticos consumidos tem um ciclo de vida curto, isto é, o tempo entre a sua produção, distribuição, comercialização, uso e descarte é de menos de um ano, como é o caso das embalagens. Outros 41,5% têm um ciclo de vida longo, acima de 5 anos, e são utilizados por mais tempo antes de se tornarem resíduo, como no caso dos plásticos utilizados na construção civil. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), em 2020 foram produzidas 7,1 milhões de toneladas em produtos plásticos no país e descartados oficialmente 2,9 milhões de toneladas de resíduos plásticos (ABIPLAST, 2021).

No Brasil, considerando os dados de todos os resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no país (recicláveis secos, orgânicos e rejeitos), no ano de 2020, foram coletados 66,64 milhões de toneladas, onde 1,6% foram recuperados para reciclagem de secos, e 0,4% para compostagem de resíduos orgânicos. Dos resíduos coletados e que seguiram para disposição final, 73,8% foram para aterros sanitários, e 26,2% para lixões ou aterros controlados (MDR, 2022).

No Brasil, os tipos de plástico mais consumidos atualmente são: polipropileno (PP) 20,1%; policloreto de vinila (PVC) 14,9%; polietileno de alta densidade (PEAD) 12,5%; polietileno de baixa densidade (PEBD) 8,0%; e polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) 12,3%; polietileno tereftalato (PET) 8,5%; poliestireno (PS) 7,5% e poliestireno expandido (EPS) 2,4% (ABIPLAST, 2021).

O EPS é apenas 2,4% do consumo de plásticos, mas ocupa até 20% de volume nos aterros sanitários (SANTA LUZIA, 2020), representa aproximadamente 20% dos resíduos encontrados poluindo praias e superfícies marinhas (CHAN, H. H. S.; NOT, C., 2023) e é estimado que o material demore até 500 anos para se decompor. As indústrias produtoras de EPS no Brasil estão fortemente concentradas no sul e sudeste, houve um consumo aparente de 129,5 mil toneladas do material em 2021 com 19,3% de importações. (COMISSÃO SETORIAL DO EPS; 2023)

De acordo com os dados da ABIPLAST, a taxa de reciclagem de EPS alcançou 30,9% em 2020, só não sendo mais reciclado que o PET e tendo uma taxa maior que a média dos materiais plásticos, que é de 23,1% (ABIPLAST, 2021). Esse valor pode ser considerado alto pelas características do material e formas de recuperação: a coleta e separação de material para reciclagem, no Brasil, é um setor com muitos trabalhadores informais que têm uma remuneração de acordo com a massa do material coletado. Entretanto, a principal característica do EPS que torna vantajosa a sua utilização, a baixa densidade, faz com que o

seu resíduo não seja economicamente e logisticamente interessante para os trabalhadores do setor da reciclagem (OLIVEIRA, 2019).

O EPS é a forma expandida do polímero de estireno, utilizado principalmente na construção civil, para preenchimento de estruturas e isolamento térmico e acústico, por ser um material leve (98% de ar e 2% de poliestireno) e com boas propriedades de isolamento térmico, sendo o seu segundo maior uso no setor de embalagens por proteger contra impactos e manter a temperatura dos produtos (TERMOTÉCNICA, 2022).

Os demais polímeros que utilizam o estireno como monômero e serão abordados no trabalho são: o poliestireno (PS) que é um plástico rígido e transparente utilizado na produção de embalagens rígidas e o poliestireno extrudado (XPS) que adquire seu formato final após o processo de extrusão do poliestireno (GRASSI et al., 2001).

Todos esses polímeros são representados pelo número 6 dentro do triângulo de flechas símbolo de reciclagem de plásticos (ABNT, 2008) apesar de terem processos de reciclagem muito diferentes, como pode ser observado inclusive em suas taxas de reciclagem que por muitas vezes são reportadas separadamente e possuem valores diversos.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar as informações disponíveis sobre a cadeia de produção e reciclagem no Brasil das principais resinas obtidas a partir do estireno: poliestireno (PS), poliestireno extrudado (XPS) e poliestireno expandido (EPS); de forma a elaborar uma análise crítica dos atuais dados de reciclagem apresentados pela indústria.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 - Buscar na literatura valores de taxas de reciclagem do PS, EPS e XPS apresentados pela indústria no Brasil;
- 2 - Compreender a metodologia utilizada para o cálculo dessas taxas;
- 3 - Estabelecer estimativas de taxa de reciclagem a partir de dados de produção de resina pós-consumo (PCR) e quantidade de resíduos gerados;
- 4 - Comparar as estimativas com os dados encontrados na literatura.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho encontra se estruturado em 5 capítulos sendo o primeiro esta introdução; o segundo apresenta uma revisão bibliográfica sobre PS, XPS e EPS no Brasil abrangendo sua definição, produção, aplicação e destinação final; o terceiro a descrição da metodologia aplicada para cálculo da taxa de reciclagem mecânica das resinas de poliestireno; o quarto os resultados obtidos; e o quinto as principais conclusões.

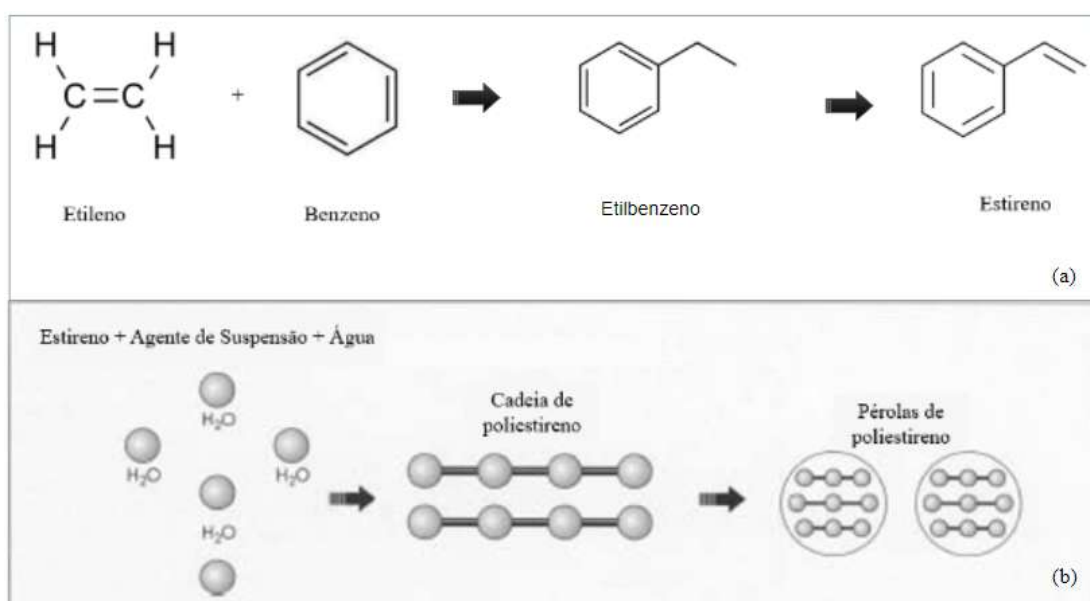
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POLIESTIRENO (PS)

2.1.1 ASPECTOS GERAIS

O poliestireno (PS) é uma resina termoplástica obtida a partir do processo de polimerização do estireno (vinil benzeno), e é comercializado desde 1931 (LASSEN, et al., 2019). Os processos mais utilizados para a obtenção do poliestireno são os de polimerização em massa e polimerização em suspensão (Figura 1). O estireno é um líquido oleoso e incolor, obtido a partir do etilbenzeno que é derivado do benzeno e eteno, majoritariamente obtidos a partir do petróleo (CORAZZA, 1995).

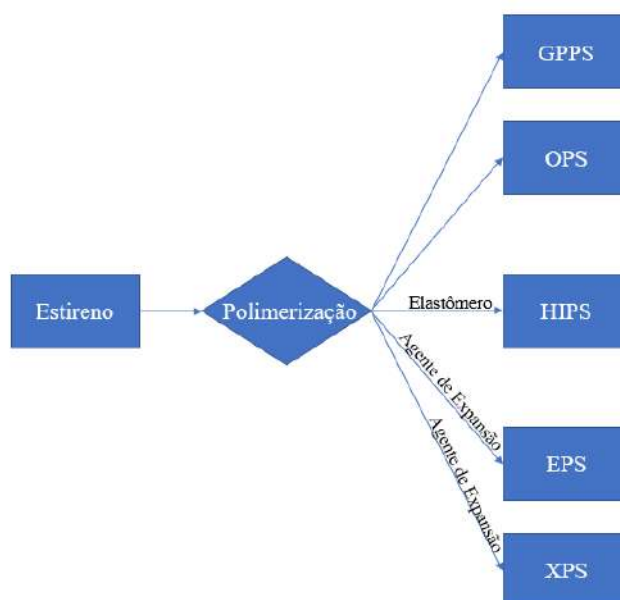
Figura 1 - Representação de (a) estrutura molecular e precursores do estireno e (b) processo de polimerização por suspensão para a formação de pérolas de poliestireno.



Fonte: adaptado de MADEHOW, 2023.

O poliestireno atualmente pode ser encontrado em diversas formas, que variam com as mais inúmeras aplicações. As principais formas do PS, apresentadas na Figura 2, são: o PS homopolímero (também conhecido como cristal ou standard, General Purpose Polystyrene (GPPS), e na forma orientado (OPS), o PS de alto impacto (HIPS) e o PS com estrutura alveolar (espumas semi-rígidas). O PS com estrutura alveolar possui dois tipos básicos, o PS expandido (EPS) e PS extrudado (XPS) (BNDES, 2002). Há ainda algumas resinas que utilizam o monômero de estireno que apresentam menor consumo por terem aplicações mais específicas, como a acrilonitrila butadieno estireno (ABS), estireno acrilonitrila (SAN) e borracha de estireno butadieno (SBR).

Figura 2 - Principais polímeros de estireno.



Fonte: elaboração própria.

Boa parte do PS é utilizado na confecção de produtos rígidos, como embalagens, caixas de CD, gabinetes de computador e equipamentos aeronáuticos e médicos (VERONESE, 2003). Devido à alta fragilidade e instabilidade em ambientes externos quando exposto a raios UV, o poliestireno de alto impacto foi desenvolvido como alternativa ao PS vítreo (GRASSI et al., 2001).

2.1.1.1 POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS)

O HIPS (ou AIPS - a sigla em português) é um heteropolímero do estireno com 5 a 10% de um elastômero, o mais usual sendo o polibutadieno (PB), mas podendo ser utilizado

também o SBS. (GRASSI et al., 2001; INNOVA, 2023). O PB pode ser disperso na matriz do polímero por meio da polimerização junto ao estireno para formar o HIPS ou as pérolas de PS podem ser misturadas mecanicamente ao elastômero em um moinho de dois rolos. Devido à adição de PB no PS, o HIPS possui uma maior resistência ao impacto e alongamento, coloração branca e não transparente.

As suas aplicações estão relacionadas a produtos que necessitam certa resistência ao impacto e boa tenacidade, como é demandado em peças de máquinas e veículos, peças externas de aparelhos eletrônicos, embalagens de proteção contra choque, e utensílios domésticos como brinquedos e jogos. É muito utilizado em placas de sinalização por estar disponível comercialmente em diferentes cores e ter boa aderência de tintas de impressão e adesivos (GRASSI et al., 2001; POLYBRASIL; 2023).

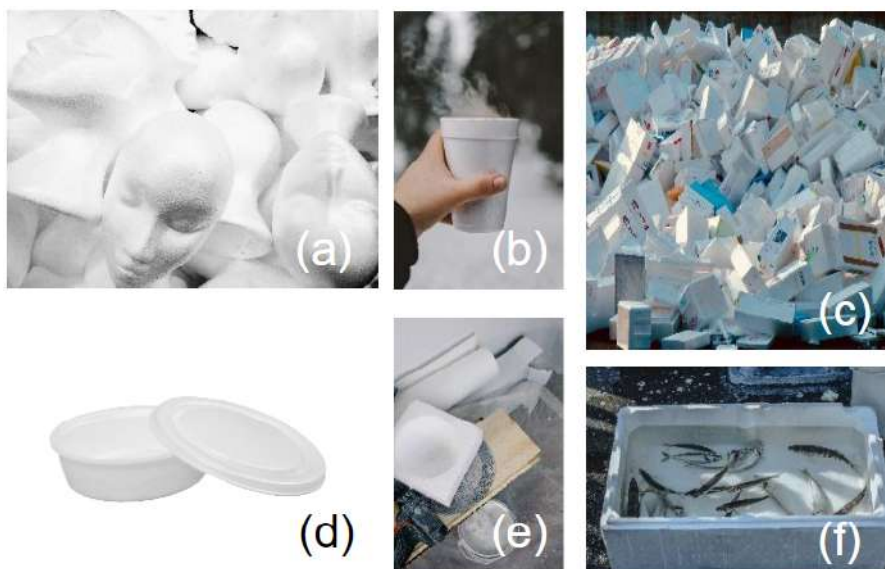
2.1.1.2 ESPUMAS SEMI-RÍGIDAS DE ESTIRENO

EPS e XPS são dois polímeros de estireno que utilizam agentes de expansão em seus processos de produção e assim possuem como principal característica determinante para suas aplicações a baixa densidade (CELLA, 2012). As diferenças entre o EPS e XPS se referem ao método de produção, aditivos e a estrutura celular (GABRIEL-CHEMIE, 2010; AKSIT et al., 2019). O EPS é produzido a partir das pérolas de PS em um processo de moldagem e o XPS por extrusão.

2.1.1.2.1 POLIESTIRENO EXTRUDADO (XPS)

O poliestireno extrudado, XPS, é produzido a partir de cristais sólidos de poliestireno expansível, que ao serem extrudados juntamente com aditivos e um agente de expansão, em condições específicas de temperatura e pressão, se tornam um fluido plástico viscoso. Este então é forçado a entrar em uma matriz maquinada, em que será resfriado, moldado e recortado conforme a aplicação (COPCUTT, 1964). Com sua espessura na faixa de 0,13 mm a 6,4 mm e bastante utilizado na indústria alimentícia, o XPS possui aplicação em embalagens termoformadas, como as de ovo, carne bovina, frango e alimentos pré-prontos, e é aplicado na construção civil em forros de isolamento térmico (WELSH, 2003; CELLA, 2012). A Figura 3 ilustra algumas das aplicações dessas espumas semi-rígidas.

Figura 3 - Alguns exemplos de aplicações de EPS e XPS: (a) perfis de EPS, (b) copo térmico de XPS, (c) resíduos de EPS, (d) marmita de XPS, (e) blocos de EPS e (f) caixas térmicas de EPS.



Fonte: Pixaby, Unsplash, Pexels.

2.1.1.2.2 POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

O EPS foi produzido pela primeira vez em 1949, nos laboratórios da BASF na Alemanha, pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz (OLIVEIRA, 2013). Conhecido popularmente no Brasil pelo nome Isopor®, marca registrada da Knauf Isopor Ltda., o poliestireno expandido é utilizado em diversas aplicações, como materiais de construção, embalagens de alimentos, equipamentos eletrônicos, agricultura e refrigeração, desde os desenvolvimentos de aplicações para o material em 1968. (PARK et al., 2003; ABRAPEX, 2023)

Para que o EPS seja produzido é necessária a adição de um agente de expansão ao PS, o mais usual agente de expansão sendo o pentano. Essa adição pode ser realizada no processo de polimerização em suspensão que gera um poliestireno expansível utilizando como insumos água, o agente de suspensão, o monômero estireno, um agente expensor, e os aditivos que dependem da aplicação desejada ao produto final, com retardantes de chama sendo desejados para aplicações na construção civil (OLIVEIRA, 2013; DOMINICK,1993). Uma forma alternativa de incorporar o agente de expansão é impregnar as pérolas de PS já prontas. O produto são pérolas expansíveis de 1 a 3 mm de diâmetro (ABIQUIM, 2023).

Na indústria química, para gerar o EPS, primeiramente é realizada a pré-expansão das pérolas expansíveis utilizando uma fonte de calor, como o vapor, que penetra nas pérolas de

forma mais rápida do que a saída do agente expensor, criando uma pressão suficiente para a expansão final de 40 a 50 vezes em relação ao seu volume original. Após esta etapa, as pérolas descansam em um processo de maturação e na próxima são inseridas em um molde e novamente expostas ao calor para que ocorra adesão das pérolas umas nas outras e seja moldado o produto final com o resfriamento do molde (YUAN et al., 1991).

Por ser composto de 98% ar e 2% de poliestireno, o EPS é um material leve, isolante térmico e acústico com resistência mecânica e resistência química a ácidos, bases e sais e possui baixa absorção de água, não oxida nem é propenso à proliferação de microorganismos (ABIQUIM, 2023; OCHARÁN, 2017). As aplicações que mais utilizam o EPS no Brasil são a indústria de construção, demandando 58% do consumo, e a indústria de embalagem, com 29% (MAXIQUIM MARKET OUTLOOK, 2016). Em embalagens é utilizado para o transporte e conservação de produtos alimentícios e medicamentos, proteção de equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos. Na construção civil é utilizado em molduras, acessórios de decoração, isolamento térmico e acústico, construção de lajes e dutos de refrigeração. Outros usos incluem acessórios de pesca, barcos e pranchas e sistemas de aeração e drenagem de solos, brinquedos e automóveis. (ABRAPEX, 2023; ABIQUIM, 2023; MAGRINI et al, 2012)

2.1.2 SOBRE A RECICLAGEM

A reciclagem reduz a quantidade de materiais enviados para aterros sanitários reduzindo a possibilidade de vazamentos para logradouros e corpos hídricos durante o encaminhamento para a destinação final, diminui a necessidade de matéria prima, conservando recursos naturais (MAGRINI, 2012). O processo para a reciclagem de qualquer material se inicia na separação e coleta seguido de um armazenamento, comercialização, transporte para a indústria recicladora, transformação dos resíduos em pellets, geração do produto final. No Brasil, a coleta é realizada nos pontos de entrega voluntária (PEV) ou nos galpões de cooperativas de catadores que coletam o material pela cidade e o acumulam até possuírem um volume economicamente vantajoso para a comercialização. O material segregado e coletado é encaminhado para as indústrias onde é limpo e triturado e depois, os expandidos, são compactados para a eliminação do ar, reduzindo de forma significativa seu volume. A etapa seguinte consiste na extrusão do material para que o resíduo triturado seja homogeneizado e fundido e gere filamentos que são resfriados e picotados, gerando os pellets de resina pós-consumo reciclada (PCR) (AMARAL, 2011; OLIVEIRA, 2018).

O material a ser reciclado deve ser armazenado em local apropriado, preferencialmente coberto e separado de outros materiais para que se mantenha limpo e seco. As tecnologias atuais não permitem a reciclagem se há graxas ou gordura devido à possibilidade de criarem instabilidades no processo (OLIVEIRA, 2018). As aplicações da resina reciclada são principalmente na construção civil em argamassa, concreto leve, azulejos, ladrilhos termoacústicos, rodapés e bancadas, sendo 80% do consumo. Os 20% restantes de resina reciclada são utilizados nas indústrias de calçados, móveis, utilidades domésticas e embalagens (MAXIQUIM MARKET OUTLOOK, 2016).

Regulamentações específicas para a utilização de plástico reciclado em contato direto com alimentos existem devido à probabilidade de produtos químicos tóxicos serem absorvidos em tais plásticos reciclados, podendo migrar para alimentos. Essas contaminações poderiam ser geradas por solventes, agentes desinfetantes, pesticidas, e ação microbiológica dos resquícios dos alimentos, entre outros (SANTOS et al., 2004).

No Brasil, a Resolução nº 105, de 19 de maio de 1999, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) proíbe o uso de plástico reciclado para contato com alimentos, exceto no caso de materiais reprocessados pelo mesmo processo de transformação. A legislação brasileira vigente também determina limites do teor de monômero residual para plásticos em contato com alimentos. No caso do poliestireno, o limite de composição do monômero estireno residual é de 0,25%, sem fazer distinção entre produtos reciclados ou não. Essas restrições são importantes pois benzeno e estireno são substâncias classificadas como carcinogênicas e seus resíduos são mais facilmente transferidos para alimentos gordurosos e quando são aquecidos (SAINT LOUIS UNIVERSITY, 2016).

2.1.2.1 PARTICULARIDADES DE RECICLAGEM DE EPS E XPS

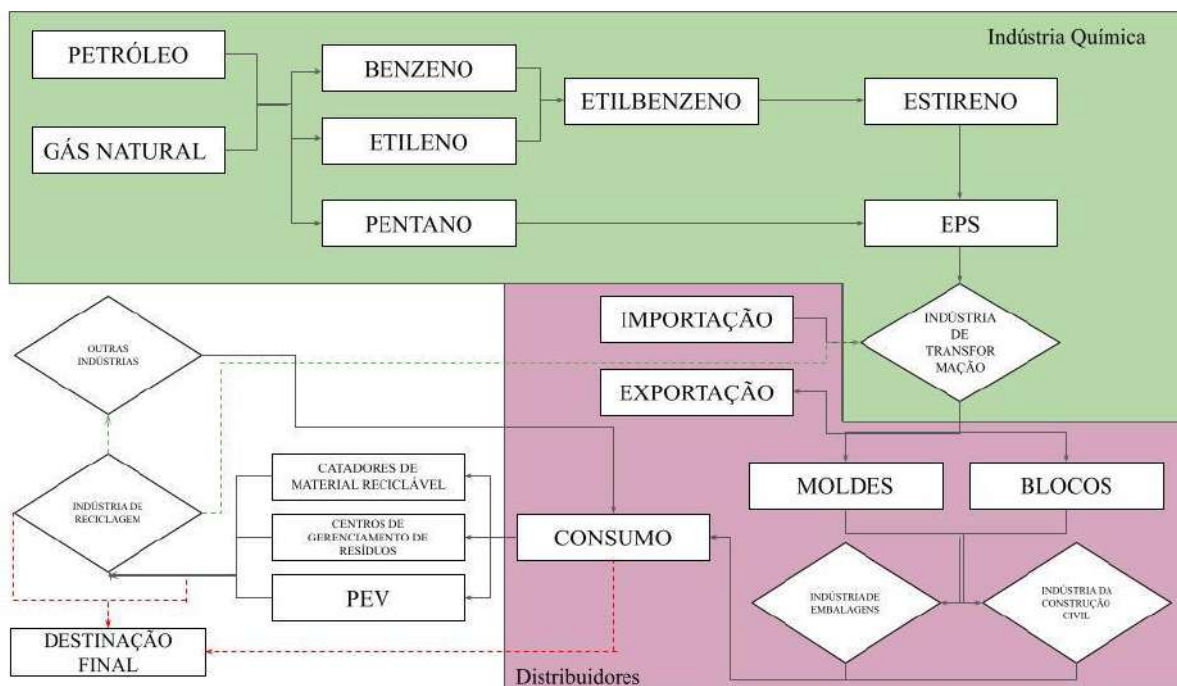
De acordo com a indústria produtora de bens a partir de EPS, seu processo de produção é mais barato, consome pouca água e energia e gera poucos resíduos e efluentes quando comparados aos materiais alternativos. Os produtos são expandidos, mas em sua fabricação não são utilizados clorofluorocarbonos (CFC) nem hidrofluorcarbonetos (HCFC). O material é inodoro e quimicamente inerte o que junto a outras características que comprovam a segurança alimentar faz com que ele seja muito utilizado na embalagem e conservação de alimentos e medicamentos que necessitam de temperatura controlada. Além dele ser 100% reciclável, havendo capacidade técnica do material voltar ao processo de

produção como substituto da matéria-prima na proporção de 1:1 (ABRAPEX, 2023; MAGRINI et al, 2012, SANTA LUZIA, 2023; TERMOTÉCNICA, 2023)

Por ser um material expandido, a identificação do EPS e XPS no RSU é fácil e auxilia na separação dos resíduos, porém, devido a sua baixa densidade, o custo logístico de encaminhar o material para a reciclagem, incluindo coleta, separação, armazenamento e transporte, pode ser até 9x maior que o de envio para um aterro sanitário por não ser utilizada na logística reversa a mesma infraestrutura, recursos materiais e humanos já disponíveis no canal direto (OCHARÁN, 2017). De acordo com a classificação da ABNT NBR 10004/2004, EPS é um resíduo Classe II B, não perigoso e inerte, e pode ser destinado para aterros sanitários. A leveza e fácil fluotabilidade do material fazem com ele ocupe até 20% em volume de aterros sanitários (SANTA LUZIA, 2023) e seja facilmente disperso e particulado no ar e na água, principalmente se disposto em lixões ou não coletado, podendo acabar em ambientes marinhos onde é degradado sob ação da luz solar e pode causar impactos de poluição visual e interferências na fauna e flora (AMBROSI, 2009; SAINT LOUIS UNIVERSITY, 2016). Hinojosa e Thiel (2009) analisaram que a maior quantidade de detritos marinhos flutuantes (DMF) na costa chilena eram de fragmentos de poliestireno expandido.

Produtos de EPS costumam ter apenas um ciclo de vida especialmente as embalagens com aplicação única frequentemente descartadas sem valor de reutilização gerando um grande volume de resíduos (OLIVEIRA, 2018). Até 32% das embalagens plásticas são desviadas do sistema de coleta (NEUFELD et al., 2016), esses resíduos leves e volumosos têm um alto custo de transporte o que dificulta a comercialização e o interesse das empresas na logística reversa (OLIVEIRA, 2018). Gastos com transportes na logística reversa representam 29% dos custos totais (ABRAPEX, 2012), e são necessários amplos espaços para armazenamento com 130 m³ de EPS pesando apenas 600 kg (PLASTIVIDA, 2019). A cadeia de reciclagem do EPS é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Cadeia de suprimentos e canais reversos do EPS.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2018.

O processo de reciclagem do EPS é caro (SAINT LOUIS UNIVERSITY, 2016) e uma grande fraqueza do sistema de reciclagem é o custo de transporte do local de armazenamento dos resíduos até as indústrias que por vezes é solucionado realizando o processo de “degasagem” do material no local do armazenamento. A prática não é universalizada por depender de um grande investimento financeiro para a aquisição de máquinas e de transferência de conhecimento para a sua operação. Portanto, o uso desses equipamentos geralmente ocorre por meio de parcerias das cooperativas de catadores com as indústrias recicladoras (OCHARÁN, 2017; OLIVEIRA, 2018).

Indústrias de EPS possuem linhas com divulgação pública de utilização de material reciclado na produção variando de 20 a 100% de substituição do material virgem (TERMOTÉCNICA, 2023; INNOVA, 2023; UNIGEL, 2023). Seguindo o Acordo Setorial de Produtores de Embalagens, baseado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), as indústrias de EPS tem pontos de entrega voluntária (PEV) em grandes centros comerciais próximos às suas fábricas e em suas próprias fábricas para a coleta de resíduos destinados à reciclagem, além de acordos com prefeituras e cooperativas de cidades vizinhas (OCHARÁN, 2017; TERMOTÉCNICA, 2023; SANTA LUZIA, 2023).

Na tabela 1 são apresentadas empresas pertencentes às associações ABIPLAST e PLASTIVIDA que tem como produtos polímeros de estireno, signatárias deste acordo setorial. É possível observar que entre as empresas participantes do Acordo estão produtores

de resinas e produtores de bens de consumo, alguns deles com produtos de PCR e outros também contendo aditivos orgânicos que os tornam biodegradáveis quando descartados em condições adequadas.

Tabela 1 - Empresas signatárias do Acordo Setorial para Logística Reversa pelas associações ABIPLAST e PLASTIVIDA que tem como produtos polímeros de estireno.

Empresa	Localidade	Produto
PLASDIL	Divinópolis - MG	Estruturas coextrudadas para embalagens flexíveis
ISOCIL	Vila Velha - ES	EPS
CEPEL	São Paulo - SP	Copos e Pratos descartáveis de PS
TERMOPOT	Goiânia - GO	Copos e Pratos descartáveis de PS
TERMOTÉCNICA	Joinville - SC	Embalagens e Componentes, Agronegócio, Conservação, Cadeia Fria e Movimentação de Cargas de EPS Possui uma linha de EPS reciclado
TERMOTÉCNICA	Manaus - AM	Embalagens e Componentes, Agronegócio, Conservação, Cadeia Fria e Movimentação de Cargas de EPS Possui uma linha de EPS reciclado
TERMOTÉCNICA	São José dos Pinhais - PR	Embalagens e Componentes, Agronegócio, Conservação, Cadeia Fria e Movimentação de Cargas de EPS Possui uma linha de EPS reciclado
TERMOTÉCNICA	Rio Claro - SP	Embalagens e Componentes, Agronegócio, Conservação, Cadeia Fria e Movimentação de Cargas de EPS Possui uma linha de EPS reciclado
TERMOTÉCNICA	Petrolina - PE	Embalagens e Componentes, Agronegócio, Conservação, Cadeia Fria e Movimentação de Cargas de EPS Possui uma linha de EPS reciclado
STRAWPLAST	São Ludgero - SC	Copos, canudos e pratos descartáveis de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	Manaus - AM	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis

		Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	São Ludgero - SC	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
		Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	Marialva - PR	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
		Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	Guarulhos - SP	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
		Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	Conde – PB	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
		Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	Carmópolis de Minas – MG	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
		Bandejas, copos, pratos, marmitas e porta ovos de EPS
COPOBRAS	João Pessoa – PB	Copos, potes e pratos de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
NOVAPACK	Bento Gonçalves - RS	Pratos descartáveis de PS
RECORTE EPS	São José dos Pinhais - PR	Proteção para móveis e telhas para a construção civil de EPS
RECORTE EPS	Joinville - SC	Proteção para eletrodomésticos e eletroeletrônicos de EPS
DART EMBALAGENS DO BRASIL	Canoas - RS	Copos e potes de EPS
FORTYMIL	Itatiba - SP	Distribuidora de PS, HIPS, SAN e ABS
SANTA LUZIA	Braço do Norte - SC	Molduras, revestimentos e rodapés de EPS reciclado
MEIWA	Arujá - SP	Embalagens para alimentos em EPS e poliestireno biorientado (BOPP)

T&M	Osasco - SP	Bandejas, Marmitas e embalagens de EPS, pratos, copos e talheres de PS Opções com aditivos orgânicos para produtos biodegradáveis
UNIGEL	São José dos Campos - SP	GPPS e HIPS reciclados
UNIGEL	Guarujá - SP	GPPS e HIPS reciclados
INNOVA	Manaus - AM	GPPS, HIPS, PS para filamentos de impressoras 3D, EPS EPS com até 30% de PCR
INNOVA	Triunfo - RS	GPPS, HIPS, PS para filamentos de impressoras 3D, EPS EPS com até 30% de PCR
PEPASSA PLÁSTICOS DE ENGENHARIA	Santos - SP	ABS

Fonte: BRASIL, 2015.

2.1.2.2 AS TAXAS DE RECICLAGEM DE EPS PELO MUNDO

De acordo com a Fundação Ellen MacArthur, para que uma embalagem seja considerada reciclável, além da capacidade técnica de reciclar o material, deve existir a reciclagem na prática e em escala. É considerado que há a reciclagem na prática e em escala de um material quando ele é reciclado com taxas acima de 30% em múltiplas regiões que juntas somem ao menos 400 milhões de habitantes. Ou, para uma avaliação mais local, a embalagem reciclável deve ter uma taxa de ao menos 30% de reciclagem em todos os mercados em que é comercializada. (NEW PLASTIC ECONOMY, 2021)

Um relatório da associação dinamarquesa dos representantes da cadeia de EPS, EPS Branchen, apontou que as taxas de reciclagem desse material podem ser mal calculadas ou mal interpretadas principalmente devido aos três motivos a seguir: EPS é confundido com outros materiais expandidos como o XPS; reciclagem pós consumo é considerada apenas como a referente aos resíduos residenciais; a taxa de reciclagem de resíduos de EPS de embalagens e da construção civil é utilizada como a taxa de reciclagem de embalagens pós-consumo.

Na Tabela 2 são apresentadas as taxas de reciclagem de diferentes localidades. Pode ser observado que altas taxas de reciclagem do material são divulgadas em diferentes países, por associações da indústria e órgãos governamentais. Os dados são de locais que possuem

uma ampla coleta de resíduos e também possuem controles capazes de permitir que seja realizada a análise do tipo de material presente no RSU e a destinação dele.

Tabela 2 - Taxas de Reciclagem de EPS referentes ao ano de 2021, calculadas por diferentes entidades e referentes a diversas localidades.

Localidade	Dado Apresentado	Taxa	Fonte
Japão	Reciclagem de EPS pós-consumo	39%	Ellen MacArthur Foundation
Japão	Reciclagem de EPS	>50%	Ministério da Economia do Japão
Noruega	Reciclagem de embalagens de EPS pós-consumo	>76%	Norwegian EPR Scheme
União Européia	Reciclagem de EPS pós-consumo	37%	EUMEPS
União Européia	Reciclagem de embalagens de EPS pós-consumo	40%	JRC
Reino Unido	Reciclagem de embalagens de EPS pós-consumo	>50%	BPF
Reino Unido	Reciclagem de EPS	>30%	Fidra
Estados Unidos da América	Reciclagem de embalagens de EPS pós-consumo	>30%	EPS Industry Alliance
China	Reciclagem de embalagens de EPS pós-consumo	>30%	INTCO
China	Reciclagem de EPS	57%	Chinese EPS Association
Alemanha	Reciclagem de embalagens de EPS pós-consumo	>50%	CONVERSIO

Fonte: adaptado de EPSBRANCHEN, 2022.

2.2 LOGÍSTICA REVERSA DE EMBALAGENS

2.2.1 ARCABOUÇO LEGAL DO PAÍS

O Brasil produz 66,64 milhões de toneladas de RSU por ano (MDR, 2022). A coleta não é universalizada, tendo o país uma cobertura de coleta de RSU de 93,04% (ABRELPE,

2022). Do total coletado, 39,5% são destinados inadequadamente, incluindo lixões e aterros controlados, e somente 75,1% dos municípios contam com iniciativas de coleta seletiva (ABRELPE, 2022).

No Brasil, a Lei Federal nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e regulamentada pelo Decreto 10.936/22, define diretrizes para o desafio da gestão e destinação adequada de resíduos sólidos no país. Conforme definido na PNRS, a hierarquia dos recursos deve seguir a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Conforme descrito no art. 5º da PNRS, esta integrou a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei Federal nº 6.838/81), que possui por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no país, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana.

A Política Nacional do Meio Ambiente, a partir do artigo 4º, parágrafo VII, constituiu o princípio de poluidor-pagador, que impõe que ao próprio poluidor, que utilizou de recursos ambientais para fins econômicos, a obrigação de diminuir, recuperar ou neutralizar os danos causados pelo seu processo produtivo.

Conforme Moreira (2016), não se deve distorcer o princípio do poluidor-pagador como uma possibilidade de permissão para poluir. A partir da premissa de que o ônus das externalidades negativas é experimentado por terceiros que não usufruem dos seus fins econômicos de origem, deve-se reconhecer o caráter preventivo e reparatório deste princípio.

Além do princípio de poluidor-pagador, existe também o princípio de protetor-recebedor, que permite a concessão de incentivos àqueles que buscam uma melhora na qualidade ambiental por meio de ações e comportamentos socioambientais desejáveis.

O Brasil, visando incorporar a dinâmica ambiental nas indústrias, adotou, a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o conceito de responsabilidade compartilhada:

“A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos” (BRASIL, 2010, art.30º).

Devido à variedade de aplicações e composições dos materiais que constituem os resíduos gerados, principalmente os plásticos, e as dificuldades associadas à seleção e

identificação, se fundamenta a necessidade do estudo de viabilidade da reinserção dos materiais na indústria, já que possuem elevado potencial econômico para aplicações como reutilização e reciclagem (SILVA, 2010). Com esta finalidade, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define o conceito de logística reversa como:

“Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada" (BRASIL, 2010, art.3º).

A PNRS estabelece uma série de obrigações a fabricantes, importadores, revendedores e distribuidores dos seguintes setores industriais a realizarem a logística reversa: pneus, óleos lubrificantes, baterias, agrotóxicos, lâmpadas fluorescentes e produtos elétricos e eletrônicos. Há também um planejamento de extensão da legislação para embalagens plásticas, metálicas e de vidros e demais embalagens (BRASIL, 2010).

Após a aprovação da PNRS em 2010, Ministério do Meio Ambiente firmou com o setor empresarial, representado por uma coalizão empresarial de 22 entidades (COALIZÃO EMPRESARIAL, 2015), o Acordo Setorial de Embalagens em Geral em 2015 (BRASIL, 2015). O objetivo deste acordo é implementar o sistema de logística reversa de embalagens pós-consumo, contidas na fração seca dos resíduos sólidos (papel, plástico, metal, e vidro). O acordo possui como meta destinar para reciclagem no mínimo 22% das embalagens que seriam dispostas em aterros, até 2018, o que corresponde a uma média de 3815,81 ton/dia.

Além da expectativa pela implementação de logística reversa de embalagens em geral, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), Decreto Nº 11.043, de 13 de abril de 2022, também estabelece metas progressivas até 2040. Conforme o Plano, em 2024, os setores deverão demonstrar a recuperação de 25% das embalagens colocadas no mercado, e um aumento progressivo da recuperação das embalagens até 40% em 2040 (BRASIL, 2022).

Para os cálculos de taxas de reciclagem de embalagens há a orientação da ABNT NBR 15792:2010 - Embalagens - Índice de Reciclagem - Definições e Método de Cálculo para que o cálculo seja realizado dividindo a massa de material de embalagens pós-consumo direcionadas para a reciclagem, pela soma da massa de embalagens reutilizáveis colocadas ao mercado e utilizadas pela primeira vez subtraídas da massa de embalagens colocadas no mercado para uma única aplicação com a massa de embalagens usadas que não estão disponíveis para a reciclagem devido a outros usos secundários. Todos os valores devem ser

limitados aos limites geográficos do país, incluir embalagens importadas e excluir as exportadas. A norma também estabelece as seguintes definições:

“Reciclagem: reprocessamento, num novo processo de produção, dos resíduos de materiais para o fim inicial ou para outros fins, mas não incluindo a revalorização energética e a orgânica.

Processo de reciclagem: processo que converte embalagens pós-consumo e/ou aparas de conversão industrial, separadas e coletadas, em um produto ou matéria prima secundária.

Material pós-consumo: material gerado por domicílio ou por instalações comerciais, industriais e institucionais como usuários finais do produto, que já não pode mais ser usado para o fim ao qual se destina.

Embalagem de uso único: embalagem projetada para ser utilizada apenas uma vez, também denominada descartável.

Disposição final: depósito definitivo de resíduos não revalorizados em aterros sanitários e industriais após a coleta, triagem, transporte e tratamento.” (ABNT, 2010).

2.2.2 PROGRAMAS DE LOGÍSTICA REVERSA

Com base em Leite (2009), os canais reversos de bens pós-consumo são constituídos nas diversas etapas de comercialização e industrialização nos quais os produtos ou seus materiais fluem após o seu descarte, até sua reintegração ao processo produtivo.

Com o objetivo de propor soluções econômicas para a implementação da logística reversa, foi criado em 2013 devido à iniciativa da Bolsa Verde do Rio (BVRio) o conceito de Crédito de Logística Reversa (CLR). Esta é ferramenta de remuneração através da emissão de certificados pelos serviços ambientais prestados de coleta, triagem e destinação dos resíduos. O pagamento desta certificação é feito por empresas produtoras de embalagens que possuem responsabilidade de implementar a logística reversa e é destinado a cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis, e empresas privadas de recuperação de resíduos. Uma representação deste programa é exibida na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do funcionamento da verificação, compra e comércio de créditos de logística reversa.



Fonte: elaboração própria.

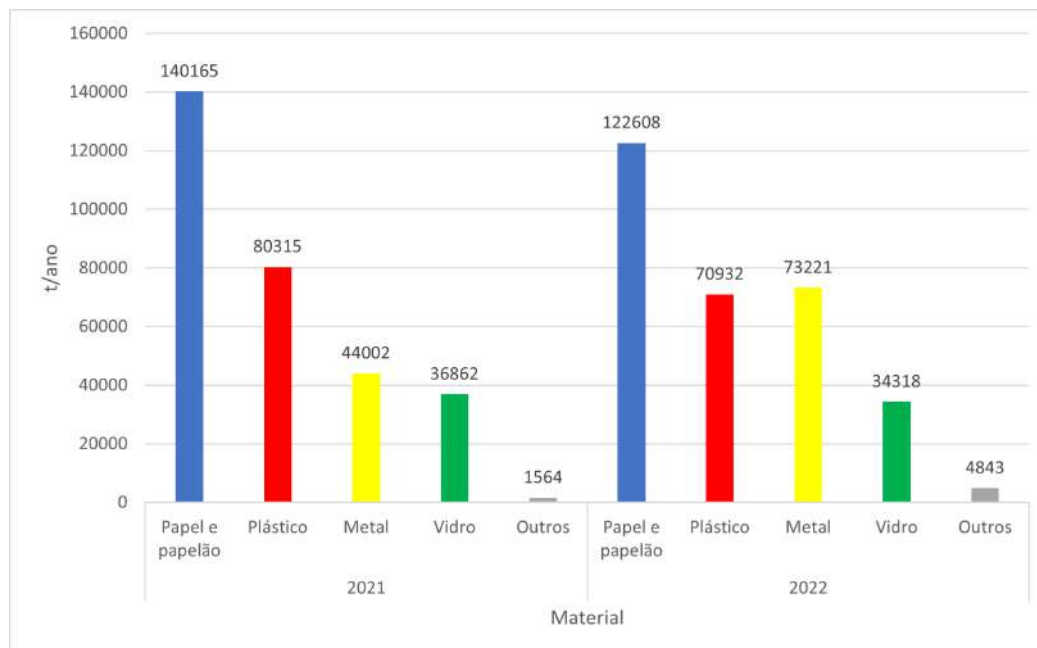
Atualmente, além da BVRio, existem outras Entidades Gestoras que atuam neste mercado realizando a compensação através de créditos de logística reversa, como Polen, Eureciclo, Programa Recupera e Programa Dê a Mão Para o Futuro.

A prática de emissão de CLR foi regulamentada a partir da publicação do Decreto 11.413/2023, que institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR), o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral (CERE) e o Certificado de Crédito de Massa Futura. Este decreto também prevê a figura do verificador de resultados, que possui como objetivo garantir a unicidade e consistências nas notas fiscais e certificados emitidos pelas entidades gestoras.

A figura do verificador de resultados não é única no país, podendo ser realizada por mais de uma organização. Atualmente, é possível citar a atuação da Central de Custódia e do Compromisso Empresarial para Reciclagem como responsáveis por verificar as notas fiscais utilizadas para Crédito de Logística Reversa.

A Figura 6 mostra a gravimetria total validada por um verificador de resultados de atuação nacional. Pode ser observada a predominância da recuperação de embalagens de papel e papelão e a relevância dos plásticos que somaram nos 22 meses avaliados (de janeiro de 2021 a segunda quinzena de novembro de 2022) o total de 151.247 toneladas.

Figura 6 - Gravimetria total dos materiais recuperados pelos programas de logística reversa de embalagens em geral nos anos de 2021 e 2022.



Fonte: ABRELPE, 2022.

De acordo com PNUMA (2022), os créditos de plásticos podem levar a uma falsa impressão de responsabilidade ambiental para o público, investidores e consumidores. Isto pode ocorrer quando estes sistemas de créditos de plásticos forem associados apenas a medidas voluntárias, e na ausência de regimes obrigatórios. Para regimes obrigatórios, as empresas são requeridas a atingir metas quantitativas conforme a legislação vigente, enquanto para medidas voluntárias, nenhuma obrigação é imposta. Apesar disso, medidas desenvolvidas por empresas para redução da poluição plástica devem ser incentivadas. Conceitos como “neutralidade de plásticos” podem não evidenciar possíveis divergências entre os impactos ambientais do resíduo produzido por uma empresa e o plástico que é efetivamente coletado e compensado quando consideradas diferenças entre os tipos de materiais e as localidades.

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida no presente trabalho consiste nas seguintes etapas:

- 1) Pesquisa de dados da indústria das taxas de reciclagem, compreensão da metodologia da indústria utilizada e levantamento da produção PCR;
- 2) Cálculo de uma estimativa de taxa de reciclagem:

2.1) Levantamento da quantidade de resíduo total gerado pelos dados do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE);

2.2) Análise dos dados do PNUMA para quantificação dos resíduos de polímeros de estireno gerados

2.3) Levantamento da quantidade dos resíduos derivados de estireno destinados a indústria de reciclagem:

2.3.1) Coleta de informações de notas fiscais de uma entidade gestora de créditos de logística reversa;

2.3.2) Tratamento dos dados presentes nas notas fiscais relativas às transações comerciais de polímeros de estireno relacionados a este trabalho;

3) Análise dos Resultados.

3.1 DADOS DE RECICLAGEM DA INDÚSTRIA DE PLÁSTICO

Para que fosse desenvolvida uma análise crítica das taxas de reciclagem mecânica do poliestireno, foi realizado um levantamento dos dados apresentados nacionalmente nos últimos anos.

As taxas da reciclagem mecânica dos plásticos disponíveis são as fornecidas anualmente pela Associação Brasileira de Plásticos (ABIPLAST) com base na elaboração e consolidação dos dados pela MaxiQuim, e publicados pelo Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico (PICPLAST). Estas taxas são calculadas a partir da produção de resina pós-consumo (PCR) e da geração de resíduos plásticos. Ambos dados coletados e analisados pela MaxiQuim a partir de diferentes fontes, como produtores de matérias-primas plásticas, organizações de gestão de resíduos, dados oficiais do governo e dados fornecidos pela Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) (MAXIQUIM, 2021).

Conforme a metodologia da MaxiQuim, o método de cálculo da geração de resíduo plástico pós-consumo provém dos volumes envolvidos na cadeia de produção do plástico, e não através de dados de coleta dos plásticos. Também é possível ressaltar que a metodologia considera apenas a geração de resíduos plásticos provenientes de plásticos de vida curta, isto é, os que são descartados dentro de um período de aproximadamente um ano.

3.2 ESTIMATIVA DA TAXA DE RECICLAGEM DO POLIESTIRENO

A metodologia aplicada para a estimativa da taxa de reciclagem do PS neste trabalho segue a de PNUMA (2023), trabalho no qual foi realizada uma revisão bibliográfica de estudos de campo em relação à composição gravimétrica do RSU dos municípios do Brasil. Este relatório foi responsável por selecionar 144 estudos municipais, possuindo, assim, uma abrangência de cerca de 40 milhões de habitantes e representando 20 dos 27 estados brasileiros.

Em PNUMA (2023), para que fosse garantido um padrão de qualidade nos estudos selecionados, 6 critérios foram utilizados: 1) Data de publicação, 2) Significância da amostra de RSU analisado com relação à realidade do município, 3) Coleta e preparo da amostra analisada, 4) Classificação do RSU, 5) Definição de rejeitos (quando utilizado) e 6) Classificação e identificação dos plásticos.

Observando os estudos selecionados por PNUMA (2023), pôde-se constatar que nem todos analisaram a fração dos plásticos no RSU em relação às diferentes resinas. Conforme PNUMA (2023), dos 144 estudos, 59 fizeram a identificação da fração de PS presente no RSU durante a gravimetria, representando 41% do total dos estudos. Destes estudos, 80% analisaram a fração de PS a partir da identificação das resinas EPS ou XPS, sendo um total de 44 estudos. Estas resinas foram apresentadas de forma conjunta devido a suas similaridades, o que pode gerar algum grau de incerteza na diferenciação durante a sua identificação (OLIVEIRA, 2006).

Como atualmente o Brasil não possui abrangência de coleta do RSU em 100% dos municípios, o total de RSU gerado deve ser estimado. Conforme PNUMA (2023), atualmente existem duas metodologias para o cálculo do RSU gerado, que se baseiam no valor conhecido do RSU coletado nos municípios em determinado ano, e fornecido através do Sistema Nacional de Informações Sobre o Saneamento (SNIS).

A taxa de reciclagem do PS é estimada então para dois cenários do RSU total gerado: a partir da estimativa de RSU gerado da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) e do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR).

A quantidade de PCR de PS produzida no ano foi obtida através dos dados apresentados por MAXIQUIM (2021), no qual são analisados os dados da indústria de reciclagem das principais resinas plásticas produzidas no Brasil, incluindo o PS.

Devido à similaridade entre as diferentes resinas produzidas a partir do PS (XPS e EPS), o presente estudo propõe analisar a taxa de reciclagem mecânica estimada do PS de forma conjunta, que pode ser calculada a partir da Equação (3.1):

$$\text{Taxa de reciclagem do PS} = \frac{\text{Resina PCR de PS/XPS/EPS produzida no ano (tonel)}}{\text{Descarte de PS/XPS/EPS gerado no ano (tonel)}} \quad (3.1)$$

Para o cálculo da quantidade de resinas de PS, XPS e EPS descartadas no ano, foi utilizada a quantidade de RSU gerado anualmente a partir das estimativas da ABRELPE e MDR, e a estimativa do PNUMA para a porcentagem de PS, XPS e EPS presente no total de RSU gerado no país.

3.3 ANÁLISE DAS NOTAS FISCAIS DE UMA ENTIDADE GESTORA DE CRÉDITOS DE LOGÍSTICA REVERSA

Para ser desenvolvida uma estimativa da porcentagem de poliestireno destinado para a reciclagem em comparação com outras resinas plásticas, foi realizada uma análise de todos os plásticos compensados através de uma empresa do setor de Crédito de Logística Reversa. Foram analisadas as Notas Fiscais de comercialização utilizadas para compensação de uma Entidade Gestora que possui abrangência em todo o Brasil, e que comercializa Créditos de Logística reversa de todos os materiais associados a embalagens em geral, sendo estes plástico, papel, vidro e metal. Estas Notas Fiscais utilizadas abrangem cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis, e empresas privadas de triagem de resíduos.

As Notas Fiscais utilizadas na compensação passam por um processo de validação interno, para que seja comprovada a origem pós-consumo do material. As Notas Fiscais também são validadas em um verificador de resultados, que é uma entidade responsável por comprovar a unicidade e a não colidência das Notas Fiscais operadas pela Entidade Gestora. A necessidade de um verificador de resultados para compensação de embalagens em geral é exigida através do Decreto 11.413/2023 (BRASIL, 2023).

As Notas Fiscais comercializadas pela Entidade Gestora e analisadas no presente estudo foram emitidas entre os anos 2018 e 2023. Estas então passaram por um processo de padronização da unidade de massa, visto que as Notas Fiscais podem ser comercializadas tanto em quilogramas, quanto em toneladas. Adicionalmente, foi conduzida uma análise em relação à Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) apresentada nas Notas Fiscais, sendo utilizadas no presente estudo apenas as iniciadas em 39, por se tratar de itens plásticos.

As Notas Fiscais referentes a plásticos, foram então categorizadas em relação aos tipos de resina conforme as informações presentes na descrição dos produtos, dado obrigatoriamente presente nas Notas Fiscais. Por ser um campo de escrita livre, foram filtrados os termos designados para determinada resina plástica que continham o nome do polímero por extenso ou abreviado (por exemplo, “poliestireno” ou “PS”). O termo “isopor” também foi incluído na categoria do PS, pois este é o nome comercial popularmente utilizado.

3.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Finalmente, após o levantamento das taxas de reciclagem mecânica das resinas de PS, XPS e EPS através das metodologias apresentadas por MaxiQuim e PNUMA, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos. Desta forma, foi realizada uma análise crítica dos dados apresentados pela indústria em comparação com os dados gerados no presente estudo. O mesmo foi feito para a porcentagem de PCR de PS, XPS e EPS em relação ao total de resinas plásticas recicladas, comparando os dados apresentados atualmente pela ABIPLAST com os dados analisados pela Entidade Gestora de Crédito de Logística Reversa.

4 RESULTADOS

4.1 DADOS FORNECIDOS PELA ABIPLAST

Os dados do histórico do índice de reciclagem dos plásticos pós-consumo são fornecidos pela ABIPLAST anualmente, com base na elaboração e consolidação dos dados pela MaxiQuim, e publicados pelo Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico (PICPLAST). Os dados consolidados disponibilizados na literatura são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Histórico de índice de reciclagem de plástico pós-consumo (PCR).

Resina	2018	2019	2020
PET	54,3%	56,5%	53,5%
PEAD	28,2%	25,1%	27,0%
PVC	19,6%	20,7%	17,1%
PEBD/PEBDL	10,6%	11,3%	10,1%
PP	14,2%	19,1%	20,2%
PS/XPS	10,1%	13,3%	11,3%
EPS	31,0%	30,7%	30,9%
Outros tipos	20,3%	21,1%	17,6%

Todos os plásticos	22,1%	24,0%	23,1%
--------------------	-------	-------	-------

Fonte: ABIPLAST, 2019, 2020, 2021. Outros tipos inclui ABS, PC, POM, PBT, PA, PU, SAN.

Conforme os dados apresentados, o EPS apresenta uma taxa de reciclagem de 30,9% no último levantamento apresentado pela ABIPLAST, sendo apenas inferior à taxa do PET, que é 54,4%. Entretanto, as taxas de reciclagem do PS e XPS são as menores em comparação com as outras resinas. De acordo com MAXIQUIM (2021), a taxa de reciclagem apresentada refere-se às resinas apenas com aplicação em embalagens plásticas, pois para um relatório anual, apenas os plásticos de vida curta de 1 ano devem ser considerados.

Apesar da taxa de reciclagem expressiva para o EPS, outras resinas possuem maior quantidade de PCR produzidos em termos de massa. Comparativamente, o PET, PEAD, PP, e PEBD/PEBDL produzem maior massa de PCR ao ano, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo em massa da produção de resina pós-consumo (PCR) em %.

Resina	2018	2019	2020	Média
PET	43%	42%	41%	42%
PEAD	18%	18%	19%	18%
PP	15%	16%	17%	16%
PEBD/PEBDL	17%	17%	16%	16%
PS/XPS	3%	3%	3%	3%
PVC	3%	2%	2%	2%
EPS	1%	1%	1%	1%
Outros tipos	1%	1%	1%	1%

Fonte: MAXIQUIM, 2021. Outros tipos inclui ABS, PC, POM, PBT, PA, PU, SAN.

É possível observar que os dados das resinas de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL), assim como os dados do Poliestireno (PS) e Poliestireno Expandido (XPS) são apresentados respectivamente de forma agregada sem diferenciação entre as resinas. Acredita-se que isto ocorre devido à semelhança em termos dos aspectos físicos e de aplicação dos produtos obtidos, o que dificulta a segregação destas resinas após o descarte. Os dados de produção de PCR anual dos plásticos foram então avaliados em relação à quantidade de massa produzida, e são exibidos na Tabela 5. Nas tabelas 4 e 5 pode ser observado que o PET é a resina mais produzida, tanto pela avaliação mássica quanto pelo percentual, e o EPS, apesar do grande percentual de reciclagem, é uma massa muito pequena em relação ao total de PCR produzido.

Tabela 5 - Produção de resina pós-consumo (PCR) em mil ton.

Resina	2018	2019	2020
PET	328	352	366
PEAD	137	153	168
PP	111	133	148
PEBD/PEBDL	128	139	143
PS/XPS	20	24	24
PVC	19	20	17
EPS	10	12	14
Outros tipos	4	5	5
Total	757	838	884

Fonte: MAXIQUIM, 2021. Outros tipos inclui ABS, PC, POM, PBT, PA, PU, SAN.

4.2 TAXA DE RECICLAGEM ESTIMADA PARA PS, XPS E EPS

A porcentagem de PS presente no RSU foi obtido através de PNUMA (2023), que estimou o valor de 0,6% em relação a todo o RSU gerado. Esta porcentagem representa uma média de 59 estudos gravimétricos municipais que analisaram a fração de PS presente no RSU coletado. Já para o valor de PCR produzida de PS/XPS/EPS, foi utilizado os valores somados de resina pós-consumo de PS/XPS e EPS apresentados pela MaxiQuim para o ano base de 2020, conforme Tabela 5. A taxa de reciclagem de PS foi então estimada e apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Taxa de reciclagem estimada para o PS, XPS e EPS.

Indicador	Cenário base 1 (ABRELPE, 2022)	Cenário base 2 (MDR, 2022)
Geração de RSU (toneladas por ano)	82.664.213	74.616.553
Materiais de PS/XPS/EPS no RSU gerado (%)	0,6%	0,6%
PS/XPS/EPS pós-consumo descartado (toneladas por ano)	495.985	447.699
PCR produzida de PS/XPS/EPS (toneladas por ano)	38.000	38.000
Taxa de reciclagem de PS/XPS/EPS estimada	7,66%	8,49%

Fonte: Adaptado de PNUMA, 2023.

Com base nas estimativas realizadas, é considerado que a taxa de reciclagem das resinas de PS estaria entre 7,66% e 8,49%. Esta estimativa diverge do dado apresentado pela ABIPLAST, que estima uma taxa de reciclagem de 11,3% e 30,9% para o PS/XPS e EPS, respectivamente.

A estimativa anual apresentada pela indústria leva em consideração apenas o plástico de vida curta, que corresponde ao plástico que foi produzido e descartado no período de um ano (MAXIQUIM, 2022). Para o presente estudo, foi considerado todo o plástico identificado como PS no RSU dos municípios amostrados, independente do ciclo de vida. Conseqüentemente, a quantidade de resina plástica descartada apresenta um maior valor. Isto ocorre pois é levado em consideração o plástico de vida média e longa, que teve a sua estimativa de uso maior que um ano, e foi eventualmente descartado no RSU.

4.3 PRINCIPAIS RESINAS CONSUMIDAS PARA CRÉDITO DE LOGÍSTICA REVERSA

Foi conduzida também uma análise comparativa no das principais resinas consumidas na cadeia de reciclagem através das Notas Fiscais compensadas por uma Entidade Gestora de Créditos de Logística Reversa. A composição de uma amostra apenas das Notas Fiscais identificadas como plástico é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo em massa das resinas consumidas para compensação de crédito de logística reversa.

Resina	%
PET	14,6%
PEAD	20,5%
PVC	3,2%
PEBD	4,9%
PP	10,6%
PS	0,8%
Outros	45,5%

Fonte: elaboração própria. Outros incluem plásticos em que a resina não foi identificada.

A fração de PS inclui as Notas Fiscais identificadas como a resina de PS e EPS, sendo estas as únicas resinas de estireno identificadas em todos os dados amostrados. É possível

observar uma menor quantidade de PS com destinação para a reciclagem que o estimado pela indústria como um total de 4% no ano de 2020, conforme a Tabela 3.

Conforme a Tabela 7, é possível relatar que 45,5% das massas de plástico identificadas nas Notas Fiscais apresentaram uma descrição insuficiente para ser identificada a resina plástica associada àquela comercialização. Estas Notas Fiscais estão associadas prioritariamente ao primeiro elo da cadeia de reciclagem, responsável por conduzir a triagem dos resíduos recicláveis e destiná-los para um intermediário da cadeia ou a indústria recicladora final. Portanto, estes dados não correspondem à quantidade de resíduos plásticos que efetivamente chegam à reciclagem, visto que existem perdas durante a cadeia.

4.4 COMPARATIVO DE DADOS

Após análise dos dados do cenário atual da reciclagem das resinas de PS, EPS e XPS obtidos nas seções anteriores, estes foram então compilados na Tabela 8. É importante ressaltar que os dados de taxa de reciclagem mecânica e produção de PCR fornecidos pela ABIPLAST apresentados referem-se ao ano base de 2020. A taxa de reciclagem mecânica estimada leva em consideração a produção de PCR da ABIPLAST em toneladas também para o ano base de 2020. Os dados de produção de PCR obtidos pela Entidade Gestora de CLR são a média das massas compensadas entre os anos de 2018 e 2023.

Tabela 8 - Comparativo entre os dados de reciclagem obtidos pela ABIPLAST e estimados.

Indicador	Dados da ABIPLAST	Estimado	
Taxa de reciclagem mecânica	PS/XPS	11,30%	
	EPS	30,90%	
	PS/XPS/EPS	-	7,66% a 8,49%
Produção de PCR	PS/XPS	3%	-
	EPS	1%	-
	PS/XPS/EPS	4%	0,8%

Fonte: elaboração própria.

É possível observar que a taxa de reciclagem mecânica estimada para as resinas de poliestireno apresentam valor menor do que as apresentadas pela indústria, devido a maior quantidade de resíduo plástico gerado anualmente.

Já para a porcentagem de produção de PCR a partir de resinas de poliestireno, é possível observar uma diferença considerável entre o valor calculado através das Notas Fiscais de compensação de CLR, com os dados apresentados pela indústria, que foram apresentados na Tabela 4.

Através das duas estimativas apresentadas no presente estudo, é possível observar que mais resinas plásticas de poliestireno estão sendo descartadas no RSU do que o apresentado na literatura, e que proporcionalmente menos resina plástica de poliestireno está sendo destinada para a reciclagem.

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados analisados, é possível observar uma divergência entre os dados da indústria, e os observados na taxa de reciclagem de PS estimada, e os destinados para a indústria de reciclagem. Esta divergência ocorre pois a estimativa apresentada se baseia na quantidade total de resinas plásticas de poliestireno descartadas pelos municípios brasileiros, enquanto que a indústria de plástico apresenta a quantidade de resíduo descartado apenas para os plásticos de vida curta.

Foi observada uma dificuldade na aquisição de informações sobre as produções de PCR, sendo encontrada uma única fonte dos dados de uma indústria que possui diversos atores. Uma melhor confiabilidade, e confirmação dos valores divulgados, talvez possa ser alcançada com mais levantamentos sobre as produções diretamente com a indústria.

Uma quantidade expressiva de estudos de composição gravimétrica dos municípios do Brasil foram analisados no presente trabalho em relação à geração de resíduos de resinas de poliestireno. Entretanto, é recomendado que mais municípios possuam um corpo técnico capacitado e condição orçamentária para que seja realizada a categorização e posterior gravimetria dos resíduos plásticos gerados de acordo com as diferentes resinas plásticas comercializadas no Brasil. É possível observar, tanto na composição gravimétrica dos municípios, quanto nas Notas Fiscais geradas pelos operadores logísticos, que uma maior identificação e diferenciação entre as resinas de PS, EPS e XPS é necessária, visto que possuem aplicações e aspectos físicos similares.

Quando analisadas as Notas Fiscais comercializadas através da Entidade Gestora para compensação de créditos de logística reversa, é possível ressaltar que os operadores logísticos que fornecerem as melhores condições comerciais podem ser priorizados. Estas condições

estão associadas aos valores do CLR por massa comercializada, e na quantidade de material comercializado pelo operado logístico.

Também é possível salientar que em uma análise a partir do RSU coletado pelos municípios e através dos operadores logísticos de CLR, o resíduo plástico gerado pela indústria consumidora de plásticos e comercializado diretamente para a indústria recicladora pode não ser contabilizado.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, quando o resíduo de PS não é reinserido na cadeia ou não é destinado para disposição final ambientalmente correta, este pode vazar para os oceanos e gerar um impacto ambiental negativo. Portanto, mais estudos são necessários para que todas as fontes de geração e descarte de plásticos sejam mapeadas.

6 REFERÊNCIAS

- ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico). **Perfil 2021**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2021/>. Acesso em 26 jun. 2023.
- ABIPLAST. **Perfil 2020**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2020/>. Acesso em 26 jun. 2023.
- ABIPLAST. **Perfil 2019**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>. Acesso em 26 jun. 2023.
- ABRAPEX (Associação Brasileira do Poliestireno Expandido). **O que é EPS?**. Disponível em: <http://www.abrapex.com.br/01OqueeEPS.html>. Acesso em: 02 jun. 2023..
- ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama 2022**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 07 maio. 2023.
- ABIQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química). Comissão Setorial de EPS. **O que é EPS?**. 2023. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>. Acesso em: 15 mai.2023.
- AKSIT, M., ZHAO, C., KLOSE, B., et al. "Extruded Polystyrene Foams with Enhanced Insulation and Mechanical Properties by a Benzene-Trisamide-Based Additive", **Polymers**, v. 11, n. 2, p. 268, 5 fev. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/2/268/pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- AMARAL, G. do. et al. **Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos**. São Paulo: CETESB: SINDIPLAST, 2011. 90 p.
- AMBROSI, T. V. **Logística reversa de embalagens de isopor**. Monografia, Programa de Pós-graduação em Administração, Especialização em Gestão de Operações Logísticas. Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009, 19 p.
- ABNT (Associação Brasileira de Norma Técnicas). **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. ABNT, 2004.
- ABNT (Associação Brasileira de Norma Técnicas). **NBR 13230: Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia**. ABNT, 2008.
- ABNT (Associação Brasileira de Norma Técnicas). **NBR 15792: Embalagens - Índice de Reciclagem - Definições e Método de Cálculo**. ABNT, 2010.
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). **Aspectos Gerais do Poliestireno**. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- BRASIL. “**Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**“ (2010). Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 26 jun. 2023.

BRASIL. **Decreto 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”**. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/D11413.htm. Acesso em: 26 jun. 2023.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. 2022. Disponível em:

https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Acesso em: 26 jun. 2023.

BRASIL. **Acordo Setorial de Embalagens em Geral, 2015**. Disponível em:

<<http://www.sinir.gov.br/web/guest/embalagens-em-geral>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

CELLA, R. **Reciclagem de espumas semi-rígidas de poliestireno pela dissolução em terpenos e secagem em secador de tambor**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/103433/316857.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 06 jun. 2023.

COALIZÃO EMPRESARIAL. **Relatório de Atividades da Coalizão Empresarial 2012-2015**. Acordo Setorial Embalagens

COMISSÃO SETORIAL DO EPS. **Mercado**. EPS Brasil, 2023. Disponível em:

<https://www.epsbrasil.eco.br/mercado.html>. Acesso em 26 jun. 2023.

COPCUTT, D. P. T.; CROFT, P. W.. **Paper 8: polyurethane and polystyrene as thermal insulants**. Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Proc. 179, 72–79, 1964. Disponível em:

https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1964_179_032_02. Acesso em: 22 jun. 2023.

CORAZZA FILHO, E. C. **Termoplásticos: os materiais e suas transformações**. 4 ed. São Paulo, s.n., 1995.

DOMINICK, V. R. **Plastics: encyclopedia and dictionary**. Editora: Hanser Publishers. New York, 1993.

EPSBRANCHEN. **Recycling of Post-consumer EPS Packing: the facts**. Copenhagen, 2022. Disponível em:

<https://eps-airpop.dk/wp-content/uploads/2022/12/Global-recycling-of-EPS-december-2022.pdf>. Acesso em 15 jun. 2023.

FREINKEL, Susan. **Plastic: a toxic love story**. 2011.

GABRIEL-CHEMIE GROUP. **Additive and Colour Preparations for Extruded Polystyrene Foams**. Áustria, 2010. Disponível em:

https://www.gabriel-chemie.com/downloads/folder/XPS-foam_en.pdf. Acesso em 15 jun. 2023.

GEYER, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. **Plastic waste and recycling**, p. 13–32, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5>. Acesso em: 26 jun. 2023.

GRASSI, V. G.; FORTE, M. M. C.; PIZZOL, M. F. D. Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 2, p. 158-168, 2001.

INNOVA. **Poliestireno alto impacto (HIPS). Brasil, 2023**. Disponível em: <https://www.innova.com.br/wp-content/uploads/2022/12/HIPS.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2023.

LASSEN, C.; WARMING, M.; KJØLHOLT, J.; LINE GEEST JAKOBSEN, N. V.; NOVICHKOV, B.; STRAND, J. et al. **Survey of polystyrene foam (EPS and XPS) in the Baltic Sea**. Lyngby: Danish Fisheries Agency, 2019. Disponível em: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/10/Survey-of-polystyrene-foam-EPS-and-XPS-in-the-Baltic-Sea.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.

LEITE, P. R. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MADEHOW. **Expanded Polystyrene Foam (EPF)**. Disponível em: <http://www.madehow.com/Volume-1/Expanded-Polystyrene-Foam-EPF.html#:~:text=Polystyrene%20is%20made%20in%20a,to%20form%20droplets%20of%20polystyrene>. Acesso em: 10 de jul. 2023.

MAXIQUIM. **Cálculo dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil**, 2021. Disponível em: <https://www.picplast.com.br/portal/picplast/arquivos/Indices-Reciclagem-2020-PICPlast-divulgacao-final.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.

MDR (Ministério do Desenvolvimento Regional) e SNIS (Secretaria Nacional de Saneamento) (2022). **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: Visão Geral ano de referência 2021**. Disponível em: https://arquivos-snis.mdr.gov.br/DIAGNOSTICO_TEMATICO_INFRAESTRURA_PARA_O_S_SERVICOS_RS_SNIS_2022.pdf. Acessado em: 26 jun. 2023.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos 2019**. Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos (SINIR), 2021. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/relatorios/inventario-nacional/>. Acesso em: 26 jun. 2023.

MAXIQUIM MARKET OUTLOOK. **Plastics PS & EPS Brazil - Perfil da indústria brasileira de transformação**. MaxiQuim, 2016.

MOREIRA, D. D. A., RAMOS ZAIDAN, S., KOZLOWSKI, H. L., et al. Responsabilidade ambiental pós-consumo à luz do princípio do poluidor-pagador: uma análise do nível de implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos prevista na

Política Nacional de Resíduos Sólidos, **Revista de Direito da Cidade**, v. 8, n. 4, 25 nov. 2016. DOI: <https://doi.org/10.12957/rdc.2016.25492>.

MOSSMAN, S. Early Plastics : Influences and Connections. **Materials: Research, Development and Applications**, v. 15, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1484/m.dda-eb.5.113422>. Acesso em: 26 jun. 2023.

NEUFELD, L.; STASSEN, F.; SHEPPARD, R.; GILMAN, T. The new plastics economy: rethinking the future of plastics. **World Economic Forum**, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2087.pdf>. Acesso em 26 jun. 2023.

NEW PLASTICS ECONOMY. **Recycling Rate Survey results summary**. Ellen MacArthur Foundation. 2021. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/link/glw5k7awhdym-qfl3fa/@/>. Acesso em: 12 jun, 2023.

OLIVEIRA, P.F **Reciclagem de Embalagens de Alimentos Produzidas a partir de Poliestireno Extrusado Pós-Consumo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88288> Acesso em: 26 jun. 2023.

OLIVEIRA, C. T.; LUNA, M. M. M.; CAMPOS, L. M. S.. **Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy**. *Journal of Cleaner Production*, v. 235, p. 562-573, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.319>. Acesso em: 26 jun. 2023.

OLIVEIRA, L. S. de. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios**. 2013. 75 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. 2013.

OLIVEIRA, C. **Avaliação Dos Facilitadores E Barreiras Da Economia Circular Na Cadeia Reversa Do Poliestireno Expandido No Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/194477/PEPS5712-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 jun. 2023.

OCHARÁN, J. **Avaliação da coleta e reciclagem do poliestireno expandido visando o incremento da logística reversa no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2087.pdf>. Acesso em 26 jun. 2023.

PARK, H.-M., LEE, W.-K., PARK, C.-Y., et al. "Environmentally friendly polymer hybrids Part I Mechanical, thermal, and barrier properties of thermoplastic starch/clay nanocomposites", **Journal of Materials Science**, v. 38, n. 5, p. 909–915, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1022308705231>. Acesso em: 2 jun. 2023.

PLASTICS EUROPE. **Plastics - the facts 2022**. 2022. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>. Acesso em 07 mai. 2023.

PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente). **Quanto plástico é descartado e reciclado no Brasil? Uma análise da quantidade, composição e complexidade da poluição plástica no Brasil.** 2023.

PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente). **Assessing the Contribution of Plastic Credit Schemes to Reducing Plastics Pollution and Improving Recycling.** 2022. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42469>. Acesso em: 28 jun. 2023.

POLYBRASIL. **Poliestireno alto impacto (PSAI) - resistência e baixo custo.** Brasil, 2023. Disponível em: <https://polybrasil.com.br/poliestireno-de-alto-impacto/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

RASMUSSEN, S. C. **From Parkesine to Celluloid: The Birth of Organic Plastics,** Angewandte Chemie International Edition, v. 60, n. 15, p. 8012–8016, 12 fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.202015095>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SANTA LUZIA. **Sustentabilidade.** Indústria Santa Luzia, 2023. Disponível em: <https://www.industriasantaluzia.com.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SANTOS, A.S.F.; AGNELLI, J.A.M; MANRICH, S. **Tendências e desafios da reciclagem de embalagens plásticas.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.14, n.5, p.307-312, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000500006>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SILVA, E. A. DA .; MOITA NETO, J. M.. **Logística reversa nas indústrias de plásticos de Teresina-PI: um estudo de viabilidade.** Polímeros, v. 21, n. 3, p. 246–251, 2011.

TERMOTÉCNICA. **Relatório de Sustentabilidade 2021/2022.** Joinville, 2022. Disponível em: https://www.termotecnica.ind.br/sustentabilidade-reciclagem-de-eps/?utm_source=blog&utm_medium=banner-lateral&utm_campaign=Relat%C3%B3rio%20de%20Sustentabilidade. Acesso em 26 jun. 2023.

SAINT LOUIS UNIVERSITY. **Real cost of styrofoam.** Novembro, 2016. Disponível em: https://greendiningalliance.org/wp-content/uploads/2016/12/real-cost-of-styrofoam_written-report.pdf. Acesso em 20 abr. 2023.

VERONESE, V. B.. **Desenvolvimento e avaliação de propriedades de misturas de poliestireno (PS) e copolímeros em bloco de estireno-butadieno-estireno (SBS).** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/4609>. Acesso em: 26 jun. 2023.

WELSH, G.C. Polystyrene packaging applications: Foam sheet and oriented sheet. **Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers.** John Wiley & Sons, Inc., p.233-246, 2003.

YUAN, H. G.; KALFAS, G.; RAY, W. H. Suspension Polymerization. **Journal of Macromolecular Science-Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics**, vol. C31,

p. 215-259, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15321799108021924>. Acesso em: 26 jun. 2023.