



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Análise do Panorama de Reciclagem de Plásticos em Porto Alegre

Autora: Luiza Cittolin Lenz

Orientadora: Débora Jung Luvizetto Faccin

Porto Alegre, maio de 2021

Autora: Luiza Cittolin Lenz

Análise do Panorama de Reciclagem de Plásticos em Porto Alegre

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientadora: Débora Jung Luvizetto Faccin

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Jordana Corralo Spada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família pelo incentivo ao estudo desde sempre, além de me proporcionar condições de finalizar todo curso e realizar este trabalho.

Agradeço a minha orientadora, prof.^a Débora Jung Faccin, pelo apoio e motivação durante todo trabalho, além de ter sido uma excelente professora.

Agradeço a todos meus amigos que me motivaram durante esse período, em especial, Renan Bortoluzzi e Fernanda Quiroga, que me propiciaram exatamente o estímulo que eu precisava para escrever este trabalho. Um agradecimento especial ao meu amigo e colega, Eduardo João Damiani, o qual teve grande papel me auxiliando a finalizar meu trabalho.

Agradeço aos professores Cesar Liberato Petzhold e Douglas Gamba, do Instituto de Química, e toda equipe do SINPOL (2015 a 2017) por auxiliarem a desenvolver minha paixão por polímeros na minha primeira bolsa de Iniciação Científica, o que me levou a seguir estudando essa área durante minha graduação.

Agradeço também ao Departamento Municipal de Limpeza Urbana pelos dados fornecidos, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à UFRGS e ao DEQUI pela oportunidade. Sem o ensino público de qualidade e os professores do corpo docente do curso de Engenharia Química, quem fazem esse ensino possível, certamente não haveria tantos profissionais formados como temos hoje.

RESUMO

Plásticos são materiais amplamente utilizados, sendo empregados nas mais diversas aplicações, que vão desde para-choque de carros até embalagens, devido às suas características, tais como baixo custo, alta durabilidade e excelentes propriedades mecânicas. Contudo, com o passar do tempo, os plásticos estão se transformando em um vilão mundial, especialmente por serem utilizados em grandes volumes em materiais descartáveis, possuírem degradação extremamente lenta e serem descartados incorretamente. Este último item, acarreta o acúmulo de boa parte do material no meio ambiente, causando diversos danos à fauna e flora terrestre e marinha. Observa-se um avanço nas tecnologias de reciclagem para tratar esse problema, porém, para serem empregadas adequadamente é preciso compreender o perfil e a legislação local. Com esse intuito, foi caracterizado o perfil da cidade de Porto Alegre. O mapeamento do perfil foi feito a partir de dados do Departamento Municipal de Limpeza Urbana e estimativas baseadas em dados de associações nacionais. A legislação vigente foi pesquisada, a fim de compreender as possibilidades e restrições de tratamentos a serem aplicados. Os resultados do mapeamento indicam um baixo índice de coleta (18,7%) e baixa taxa de reciclagem (5,2%) no ano de 2019. Também foi identificada uma preocupante tendência de queda no percentual de plástico reciclado frente ao coletado, a qual reitera a importância da discussão do assunto. A pesquisa acerca da legislação revela uma recente predisposição à adoção de novas tecnologias de reciclagem. Campanhas governamentais são necessárias para educação ambiental da população, além de melhorias no sistema da coleta seletiva, como por exemplo extensão do sistema de coleta automatizada para os rejeitos.

Palavras-chave: reciclagem, gerenciamento de resíduos urbanos

ABSTRACT

Plastics are materials widely used in most diverse applications, from bumpers to packaging, due to low production-cost, high durability and excellent mechanical properties. However, as a result of the full-scale use, especially in single-use applications, allied with the extremely low degradability and improper disposal, plastics are becoming a villain worldwide. The improper disposal leads on plastic accumulation in the environment, causing problems to the flora and fauna, both soil and marine. There have been advances in recycling techniques in order to deal with this threat but is essential to understand local recycling profile and law, so that those technologies can be properly applied. Therefore, the local profile of Porto Alegre city was characterized. Profile mapping was made with data from the Municipal Urban Cleaning Department and with estimates based on national associations' data. The mapping results indicate a low waste collection index (18,7%) and low recycling index (5,2%) in 2019. Also, an alarming decreasing tendency in recycling of collected plastic percentage was observed, which reaffirms the importance of the discussion over this matter. Research about legislation reveals an increasing willingness to adopt new recycling technologies. Government campaigns are needed to develop population environmental education, as well as improvement in the selective waste collection system, for example extension of automated organic waste collection system to all wastes collection.

Keywords: *recycling, urban waste management*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos polímeros quanto a arquitetura.....	3
Figura 2. Cadeia do plástico simplificada.	4
Figura 3. Representação dos quatro métodos de reciclagem.....	5
Figura 4. Percentual de consumo das diferentes fontes energéticas para o setor residencial .	9
Figura 5. Percentual de consumo das diferentes fontes energéticas para o setor comercial .	10
Figura 6. Matriz de energia elétrica do Brasil.....	10
Figura 7. Esquema representativo das diretrizes para gestão e gerenciamento do resíduo sólido no Brasil.....	12
Figura 8. (a) Publicações por ano, referentes a "terciary recycling" ou "chemical recycling", e (b) divisão pelas regiões.....	14
Figura 9. Publicações por ano no Brasil referentes a "chemical recycling" ou "terciary recycling".....	15
Figura 10. Teor de plástico presente no RSU, consumo e descarte de plástico ao longo dos anos.....	20
Figura 11. Relação entre consumo de plástico e conteúdo de plástico no RSU.	20
Figura 12. Dados obtidos através dos modelos 1 e 2, juntamente com dados reais.....	20
Figura 13. Comparação entre quantidade coletada pelo DMLU de RSR em 2019 e 2020.....	23
Figura 14. Diversidade de plásticos pós-consumo reciclados em 2019	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo per capita de plásticos pelo brasileiro ao longo dos anos.....	19
Tabela 2. Quantidade de plástico presente no RSU.....	19
Tabela 3. Dados nacionais sobre produção de plástico pós-consumo e reciclado.....	21
Tabela 4. Consumo de plástico estimado em Porto Alegre ao longo dos anos.....	21
Tabela 5. Dados referentes à coleta seletiva realizada.....	22
Tabela 6. Análise da reciclagem e coleta dos plásticos residuais em Porto Alegre.....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico

CONSEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

CS - Coleta seletiva

DMLU - Departamento Municipal de Limpeza Urbana

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EU - União Europeia

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISO - International Organization for Standardization, 2016)

LCA - Análise do ciclo de vida (Life Cycle Assessment)

MNCR - Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis

PE - Polietileno

PERS-RS - Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul

PET - Poli(tereftalato de etileno)

PICPLAST - Plano de Incentivo da Cadeia do Plástico

PNRS - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Poli(cloreto de vinila)

RSR - Resíduos sólidos recicláveis

RSU - Resíduos sólidos urbanos

UT - Unidades de triagem

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Conceitos chave	2
2.1.1 Polímeros e plásticos	2
2.1.2 Análise de Ciclo de Vida	4
2.2 Métodos de reciclagem e disposição de resíduos plásticos	4
2.2.1 Reciclagem primária	5
2.2.2 Reciclagem secundária ou mecânica	6
2.2.3 Reciclagem terciária ou química	6
2.2.4 Reciclagem quaternária ou incineração com recuperação energética	8
2.2.5 Aterros	10
2.3 Descarte e coleta em Porto Alegre	11
2.4 Legislação acerca de reciclagem e tratamento de resíduos	11
3 Materiais e Métodos	16
3.1 Obtenção de dados para caracterização da situação presente	16
3.2 Busca de material bibliográfico acerca de tecnologias e metodologias de gerenciamento	17
3.3 Pesquisa acerca de legislação, normativas e diretrizes sobre destinação e tratamento de resíduos sólidos urbanos	18
4 Resultados	19
4.1 Caracterização da reciclagem em Porto Alegre	19
4.2 Possíveis tratativas e meios de solucionar ou amenizar a situação da cidade	23
5 Considerações finais	28
REFERÊNCIAS	29
APÊNDICE A	32
APÊNDICE B	33

1 Introdução

Plásticos são matérias com boa resistência mecânica, leves, que possuem custo de produção baixo e apresentam alta durabilidade. Essas características tornaram o plástico uma excelente alternativa de material para as mais diversas aplicações, sendo essenciais na nossa rotina. Essa preferência por estes materiais plásticos, aumentou a produção mundial deles progressivamente. Por outro lado, a criação de uma cultura de “uso único” e a lenta degradação desses materiais, aliadas ao baixo nível de educação ambiental de grande parte da população intensificaram o descarte incorreto, ocasionando em um grave problema ambiental.

Estima-se que entre 1950 e 2017, 8300 Mt de plástico virgem tenham sido produzidas e cerca de 4900 Mt (~60%) tenham sido descartadas, ou em aterros, ou no meio ambiente. Geyer et al. (2017) estimaram ainda 12 Gt serão descartadas em aterros ou no meio ambiente até 2050. Ainda, de 1950 até 2017, estimou-se que apenas 600 Mt haviam sido recicladas, equivalente a 7% do total produzido para o mesmo período.

Cada vez mais, observa-se a necessidade de um modelo circular de economia para os plásticos. Nesses modelos, disposição em aterros é uma tratativa secundária, sendo priorizados processos de reciclagem. Nesse contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem e o gerenciamento de resíduos sólidos eficiente são medidas necessárias para evitar que o plástico acabe em locais inadequados. Ambientalistas, naturalistas e pesquisadores em todo mundo alertam sobre os problemas do plástico nos ambientes aquático e terrestre, além de problemas para os próprios seres humanos (Chen et al., 2021).

Ao mesmo tempo, uma pandemia assola o mundo e exige uso de equipamentos de proteção individuais muitas vezes descartáveis. Autores apontam que, mesmo sendo uma questão de saúde pública o uso desses materiais descartáveis, é necessário se atentar ao gerenciamento correto desses resíduos gerados (Parashar e Hait, 2021; Vanapalli et al., 2021). Arduso et al. (2021) reportaram piora em sistemas de gerenciamento de resíduo já precários na América do Sul e alerta sobre o potencial impacto ambiental dos microplásticos.

Neste contexto, o presente estudo visa mapear a situação de Porto Alegre quanto ao descarte, coleta e reciclagem de plásticos, possibilitando identificar o panorama presente e passado, e apontar tendências. Ainda, será feita uma análise sobre as atuais tecnologias disponíveis para tratamento de resíduos e uma análise baseada nas normas e legislação vigentes para averiguar quais dessas tecnologias podem ser aplicadas para tratamento dos resíduos na cidade de estudo.

2 Revisão Bibliográfica

A fim de analisar o sistema atual de reciclagem de plásticos na cidade de Porto Alegre, é necessário entender o destino dos resíduos e percentual enviado a cada destinação. Não obstante, é importante compreender as opções disponíveis de tratamento e disposições para esses resíduos plásticos, no âmbito mundial. Adicionalmente, é importante compreender o que a legislação atual permite com respeito aos tratamentos que serão apresentados. Além disso, serão explanados alguns conceitos-chaves para a compreensão do trabalho.

2.1 Conceitos chave

2.1.1 Polímeros e plásticos

Polímeros são macromoléculas, ou seja, moléculas com alta massa molar, formados pela repetição de unidades químicas. A etimologia da palavra remete a isso também: *poli* significa muitos e *meros* significa partes. O processo químico que dá origem aos polímeros é denominado polimerização.

Plásticos são um subgrupo dos polímeros, os quais apresentam comportamento mecânico plástico. A palavra plástico deriva do latim, *plasticus*, que significa “de moldagem”, remetendo a um material passível de ser moldado. Para entender restrições dos processos de reciclagem dos plásticos, é importante conhecer algumas classificações dos polímeros. Essas classificações não são restritas apenas aos plásticos, mas abrangem todos os polímeros.

Os polímeros são classificados quanto a sua arquitetura molecular, podendo ser lineares, ramificados ou reticulados (Lucas et al., 2001). Young e Lovell (2011) também trazem para classificação da arquitetura molecular a cadeia cíclica, não tão usual entre os polímeros mais comercializados. Na Figura 1 é exemplificado tipos de arquitetura molecular.

Também são classificados quanto ao seu comportamento térmico, sendo divididos em termoplásticos ou termofixos, também chamados de termorrígidos (Lucas et al., 2001). Termorrígidos são materiais que, após serem processados, não podem ser fundidos. Por outro lado, termoplásticos podem ser fundidos posteriormente ao seu processamento, sendo assim passíveis de reprocesso. É pertinente esclarecer que termofixos podem ser plásticos, já que antes são processados termicamente para chegar na forma desejada, mesmo que posteriormente não possam ser reprocessados. A exemplo disso, existe a baquelite, utilizado em cabos de panela.

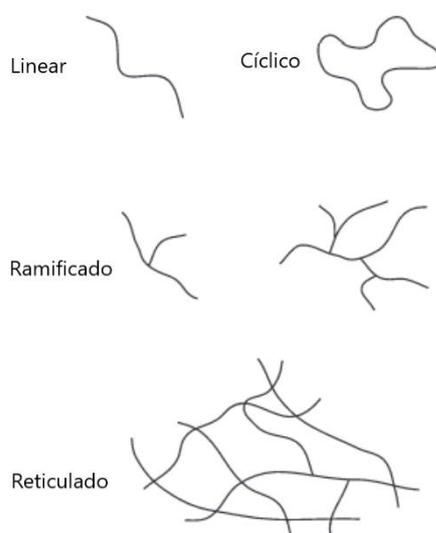


Figura 1. Classificação dos polímeros quanto à arquitetura. Adaptado de Young e Lovell (2011).

Outra forma de classificação para polímeros está na forma como ocorre a polimerização. Existem duas grandes categorias quanto à polimerização: polímeros de adição (reação em etapas); polímeros de condensação (reação em cadeia). Essa classificação foi proposta por Carothers em 1929 e foi aprimorada posteriormente por Flory ao focar nos mecanismos de polimerização (Billmeyer, 1984).

- **Condensação (reação em etapas):** polímeros de condensação são formados a partir de reações entre monômeros polifuncionais com a eliminação de alguma molécula pequena. A reação é em etapas, é lenta e ocorre de forma gradual. Alguns exemplos de polímeros de condensação são poli(tereftalato de etileno) (PET), poli(amida) (nylons),
- **Adição (reação em cadeia):** polímeros de adição são formados sem eliminação de moléculas. Usualmente, possuem uma ligação dupla que é convertida numa ligação saturada durante a polimerização (Lucas et al., 2001). As reações em cadeia são extremamente rápidas e macromoléculas com a massa molar final são formadas logo no início da reação. Os polímeros de adição mais usuais são polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(cloreto de vinila) (PVC), poliestireno (PS)

Existem outras classificações em relação à origem, resposta mecânica, constituição, configuração, conformação, entre outras, as quais não serão exploradas aqui, por não serem relevantes para o entendimento do restante do trabalho.

A partir deste ponto do trabalho, apenas será abordada a temática de plásticos, portanto, quando for mencionado “polímero”, entenda-se apenas os polímeros que podem ser classificados como plásticos. O plástico também pode ser categorizado como um polímero virgem ou reprocessado. Polímero virgem consiste em todo aquele que é proveniente diretamente do processo de polimerização industrial ou de polímeros naturais, como exemplo a borracha natural. Já polímeros reprocessados, são polímeros que já sofreram um processo

de manufatura para adquirirem forma de um produto e são submetidos novamente a um segundo processamento. Geralmente, esse segundo processamento ocorre pós consumo do produto ou no final da vida útil dele. Na Figura 2 está ilustrado um possível ciclo que os plásticos podem ser submetidos.

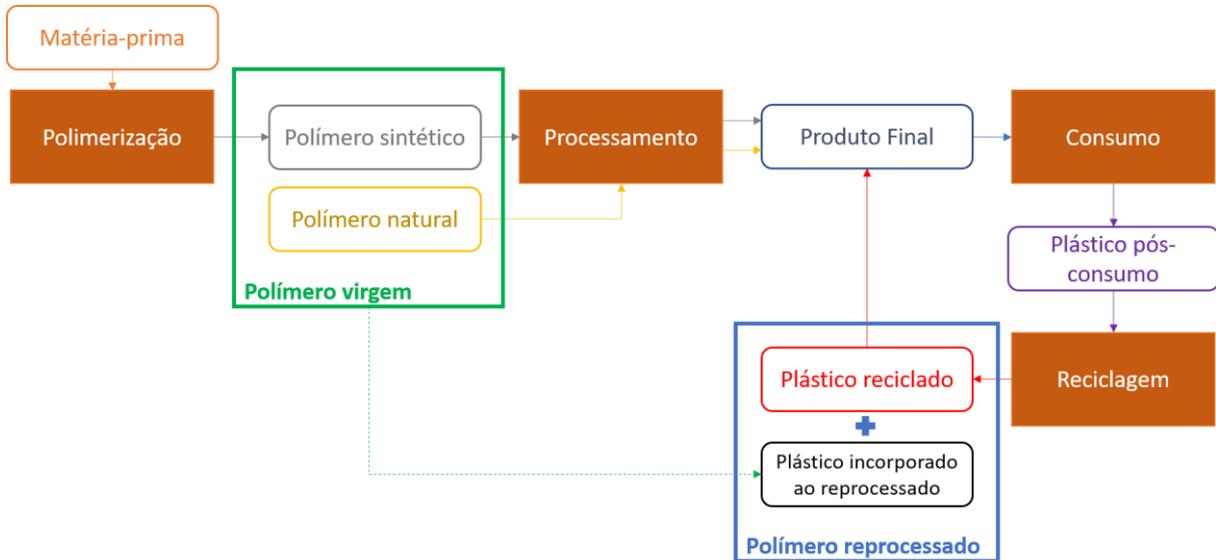


Figura 2. Cadeia do plástico simplificada. Fonte: autora.

2.1.2 Análise de Ciclo de Vida

A análise do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) é uma metodologia utilizada para determinar o impacto ambiental potencial de uma técnica ou produto através de modelagem (Davidson et al., 2021). Esse potencial é analisado com base nos recursos utilizados e liberados pelo objeto de estudo. De acordo com padrões da *International Organization for Standardization*, uma análise de ciclo de vida deve ser feita com base no inventário do ciclo de vida, ou seja, um balanço dos recursos utilizados, e uma análise de impacto durante e pós processo, se for o caso (Abejón et al., 2020).

É relevante pontuar que, por ser um modelo, ele é aplicado nas condições que foram conduzidos os estudos, sendo assim necessário que cada estudo especifique as condições e impactos que foram utilizados. Além disso, observa-se na literatura uma grande variedade de resultados de LCA sobre uma mesma técnica, que podem levar a conclusões diferentes (Jeswani et al., 2021; Meys et al., 2020). Essas diferenças podem ocorrer pelas condições diferentes propostas, que são dependentes também da localidade de estudo.

2.2 Métodos de reciclagem e disposição de resíduos plásticos

Existem diversos métodos de reciclagem e eles são classificados em reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária (Davidson et al., 2021; Francis, 1984). Cada uma dessas classificações faz referência ao tipo de processo que o plástico pós-consumo passa para ser reaproveitado. Segundo Davidson (2021), podemos definir da seguinte forma:

- **Primário:** resíduo gerado dentro de uma unidade industrial, proveniente de produtos defeituosos, é retornado para início do processo, para mesmo uso, sem mudanças na estrutura química ou perdas de propriedades.
- **Secundário:** resíduo é processado mecanicamente, podendo sofrer perdas de propriedades. Neste ponto entram produtos de reciclagem mecânica.
- **Terciário:** os resíduos sofrem mudanças em sua estrutura química. São tratados via reciclagem química, dando origem a produtos como monômeros, óleos e combustíveis.
- **Quaternário:** os resíduos são utilizados para produção de energia. Basicamente, enquadra-se como reciclagem quaternária a incineração.

Importante ressaltar que nessa classificação não entram aterros (controlados ou não), uma vez que não possuem um produto que possa ser utilizado. De acordo com Davidson (2021), disposição em aterros e incineração, por envolverem decomposição e perda de material, não são consideradas técnicas que integram um sistema de economia circular, pois não há um retorno da matéria no ciclo. Entretanto, é necessário abrangê-las quando se realiza uma análise de reciclagem, pois estes são utilizados para disposição de diversos resíduos passíveis ou não de reciclagem. Na Figura 3, pode-se ver de forma representativa o ciclo do plástico incluindo todas as formas de disposição e reciclagem que aqui serão apresentadas.

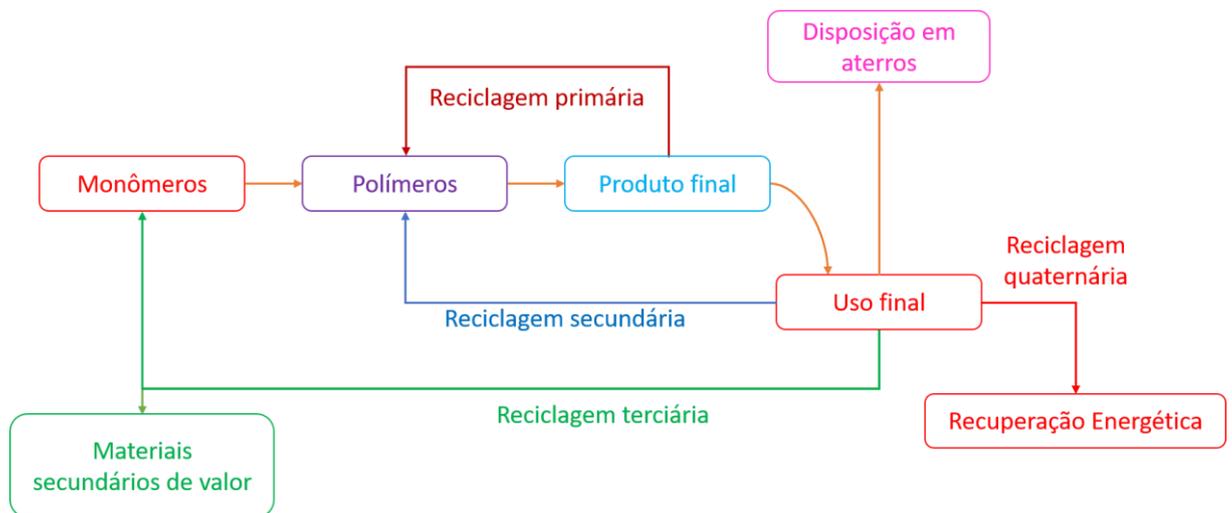


Figura 3. Representação dos quatro métodos de reciclagem. Adaptada de Francis (1984).

As seções subsequentes tratam dos métodos existentes para reciclagem e outras formas de disposição utilizadas (aterros).

2.2.1 Reciclagem primária

Usualmente, esse tipo de reciclagem ocorre apenas dentro da própria planta de produção do produto, ou seja, antes mesmo do produto chegar ao consumidor (Francis, 1984). O material submetido a reciclagem primária é processado novamente, mas retorna para mesma

função, por exemplo, uma garrafa PET com defeito é reprocessada para criar uma nova garrafa PET. A forma que o reprocesso ocorre pode variar de acordo com o tipo de indústria, sendo utilizados em sua maioria processos mecânicos de reciclagem e processamento. Esse tipo de reciclagem implica que o resíduo plástico não deve sofrer contaminações ou perdas que possam comprometer esse retorno (Davidson et al., 2021; Francis, 1984).

Importante também salientar que reciclagem primária exige um reprocesso, não sendo apenas reutilização. Ou seja, a garrafa PET não apenas retorna e é preenchida novamente. Ela retorna ao início da linha de produção e é fundida com o plástico virgem.

2.2.2 *Reciclagem secundária ou mecânica*

De acordo com a definição da ISO 15270:2008 (International Organization for Standardization, 2016), reciclagem mecânica é “processamento de resíduos plásticos em matéria-prima secundária ou produtos, sem mudanças significativas na estrutura química do material”. É uma técnica simples para tratar o resíduo plástico e possui custo de operação baixo. Para obtenção de um produto reciclado de qualidade, as etapas descritas em seguida devem ser implementadas.

Inicialmente, deve ser realizada coleta e limpeza dos resíduos plásticos, segregando-os de outros tipos de resíduos e removendo contaminantes. Plásticos contaminados com outros resíduos ou que não possam ser segregados (ex.: laminados) dificultam a reciclagem mecânica.

Em seguida, deve ser realizada a triagem dos diferentes tipos de plásticos. Como reciclagem mecânica é um processo físico do ponto de vista de mistura, o ideal é que se utilizem materiais com propriedades semelhantes para obter-se características homogêneas. Quando a mistura é heterogênea, pode haver, por exemplo, redução das propriedades mecânicas, e o artigo produzido com essa matéria-prima terá aplicações restritas. Esse processo de perda de propriedades, ocasionando em aplicações menos nobres é denominado *downcycling* (Francis, 1984).

Por fim, os resíduos plásticos segregados e passíveis de serem reciclados são cominuídos, extrusados e peletizados para posterior manufatura do produto. Durante o processamento, a presença de água e oxigênio favorece reações de quebra de cadeia, reduzindo assim a massa molar e alterando as propriedades do material. Sendo assim, é importante a realização de secagem após a etapa de limpeza. Processamento a vácuo também é uma estratégia utilizada para minimizar essas perdas de propriedades (Francis, 1984).

Cabe salientar que em todo reprocesso, o plástico está sujeito a perdas de propriedades, por isso é finito o número de vezes que um plástico pode ser reprocessado mecanicamente.

2.2.3 *Reciclagem terciária ou química*

A reciclagem terciária consiste na utilização de meios químicos ou térmicos - ou combinados - para reduzir o plástico a monômeros, oligômeros, combustíveis (líquidos ou

gasosos), os quais podem ser utilizados para produção de novos plásticos, solventes ou gás de síntese (Davidson et al., 2021). O termo “química” é utilizado nessa denominação devido à existência de uma modificação estrutural na cadeia do polímero (Francis, 1984), diferente da reciclagem mecânica, por exemplo.

A maior vantagem desses métodos terciários é a possibilidade de tratar polímeros heterogêneos e contaminados, não sendo necessário um pré-tratamento muito complexo. Por exemplo, em geral, ao contrário da reciclagem mecânica, não é necessária uma limpeza minuciosa do material. Ademais, polímeros termorrígidos não são passíveis de reciclagem primária ou secundária, mas podem ser tratados pela reciclagem química.

Dentro da reciclagem química, existem diversos métodos que podem ser empregados. Nem todos os plásticos são suscetíveis a todos processos, por isso há uma grande variedade deles (Francis, 1984). Polímeros de adição, como PP e PE, podem ser processados por pirólise, craqueamento catalítico e hidrogenação. Todavia, não podem ser reciclados via hidrolítica, como polímeros de condensação (PET). Devido a isso, é necessária uma triagem para separar os tipos de plásticos em polímeros de condensação e de adição.

A seguir serão apresentados, resumidamente, algumas formas de reciclagem terciária indicando para quais tipos de polímeros essas podem ser empregadas.

- Tecnologias termolíticas (polímeros de adição, preferencialmente): compreende uma diversidade de tratamentos térmicos realizados à temperatura controlada, mas sem uso de catalisadores. São classificadas também como técnicas de craqueamento por consistirem em quebra de moléculas complexas pela ação do calor. Dentro da tecnologia, destacam-se os seguintes métodos:
 - Pirólise: craqueamento térmico realizado em atmosfera inerte com baixa disponibilidade de oxigênio. Os produtos obtidos abrangem hidrocarbonetos sólidos, líquidos e gases. Esses produtos possuem alto valor agregado, que é uma grande vantagem frente a aterros e reciclagem mecânica. Ganhos ambientais também podem ser obtidos com redução de emissão de gases de efeito estufa, considerando um processo controlado, com captura dos gases gerados para utilizações posteriores. Entretanto, caso sejam requeridos produtos específicos, tratamentos adicionais podem ser necessários para refinamento, o que se tornam uma dificuldade para o processo, sendo necessários mais estudos para compreender a distribuição dos produtos.
 - Gaseificação: uso de atmosfera de oxigênio e vapor em quantidades subestequiométricas para produção de gás de síntese, hidrogênio e monóxido de carbono. Ocorre que, para redução de custos, é utilizado ar para a reação de combustão, causando perda calórica na combustão, devido à presença de nitrogênio como inerte. Isso leva à formação de carvão residual, que necessita de destinação posterior. Além disso, a perda de valor calorífico pode resultar em queima incompleta, sendo necessário tratamento posterior dos gases gerados, os quais podem contêm poluentes (Francis, 1984).

- Hidrogenação: utilização de atmosfera rica em hidrogênio para produção de hidrocarbonetos sólidos, líquidos e gasosos.
- Craqueamento catalítico: consiste no uso de utilização de catalisadores (zeólitas, sílicas mesoporosas, por exemplo) para auxiliar no craqueamento térmico. Uso de catalisadores visa melhorar seletividade dos produtos, mas também reduzir as temperaturas necessárias para as reações de degradação. Olefinas contendo de 1 a 4 carbonos, junto com uma mistura de compostos aromáticos são obtidas quando realizado craqueamento não catalítico de PE ou PP em temperaturas $T < 700^{\circ}\text{C}$. Quando realizado em temperaturas inferiores, na faixa de 400 a 500°C são obtidos óleos, graxas e alguns gases (Francis, 1984). Logo, é interessante uso de catalisadores pelo seu potencial de reduzir dificuldades operacionais, como atingir temperaturas extremamente elevadas, além de possivelmente redução da produção de produtos com menor valor agregado, como graxas.
- Depolimerização (polímeros de condensação): compreende uma diversidade de técnicas utilizadas para realizar a reação reversa da polimerização. Consistem em diferentes formas de lises, utilizando diferentes matérias, desde água, glicose, entre outros (Davidson et al., 2021; Young e Lovell, 2011). Destaca-se:
 - Hidrólise: consiste em uso de água ou vapor de água para degradar o plástico e convertê-lo em monômeros. Podem ser utilizados outros reagentes para diferentes lises, por exemplo uso de glicose para reação de glicólise.

Diversas análises de ciclo de vida foram realizadas envolvendo reciclagem química, mas não há um consenso sobre as técnicas serem ambientalmente favoráveis em comparação a outros métodos de tratamento e disposição (Jeswani et al., 2021). Meys et al. (2020) demonstram matematicamente que a reciclagem química possui maior contribuição para o aquecimento global frente à reciclagem mecânica. Além disso, frequentemente é dito que reciclagem química deve ser tratada como uma alternativa aos plásticos que não podem ser reciclados mecanicamente (British Plastics Federation, 2020 apud Davidson et al., 2021) e por isso comparações não são úteis, pois possuem papéis distintos no tratamento de resíduos plásticos (Davidson et al., 2021).

2.2.4 Reciclagem quaternária ou incineração com recuperação energética

Incineração consiste na queima de uma matéria orgânica, que será o combustível na presença de um comburente, resultando na liberação de energia, a qual é dependente do poder calorífico do combustível utilizado. A recuperação energética pode ocorrer de forma direta – para aquecimento – ou indireta – para produção de energia elétrica (Davidson et al., 2021). Incineração é classificada como uma forma de reciclagem apenas se há o aproveitamento energético, seja ele térmico ou elétrico. Caso não haja esse aproveitamento, não haveria um produto resultante do processo e, portanto, não seria classificada como reciclagem (Francis, 1984).

Não obstante o atrativo potencial energético, a incineração pode levar a um aumento de emissões gasosas. Desse modo, não deve ser utilizada como fonte principal de geração de energia, sendo recomendada sua utilização apenas como suporte (Davidson et al., 2021).

Ademais, emissões gasosas proveniente de queima de plástico podem conter poluentes nocivos para vida e meio ambiente, como dioxinas, furanos e compostos metálicos (Francis, 1984; Verma et al., 2016). Isso posto, é necessário um controle minucioso das emissões gasosas, regularizado por lei. A exemplo temos a União Europeia (UE), onde a incineração é uma prática frequente em diversos países. Para que o impacto ambiental seja minimizado, a UE possui diretrizes para o controle de poluentes na atmosfera, elaborados na *European comission 2010* (Davidson et al., 2021).

Diante disso, para uma posterior análise do potencial da incineração no Brasil, é necessário conhecer a matriz energética brasileira.

Matriz energética brasileira

A matriz energética brasileira em 2019 possuía 46,2% da energia proveniente de fontes renováveis. Em 2018 esse valor era de 45%, enquanto mundialmente o percentual de energia proveniente de fontes renováveis não chegava a 15% (Empresa de Pesquisa Energética, 2020). Dentro dessa matriz, encontram-se diversos usos e formas de energia. Para o setor residencial e comercial, se destacam a energia elétrica, a qual tem seu consumo crescente nos últimos 20 anos em ambos os setores (Figuras 4 e 5).

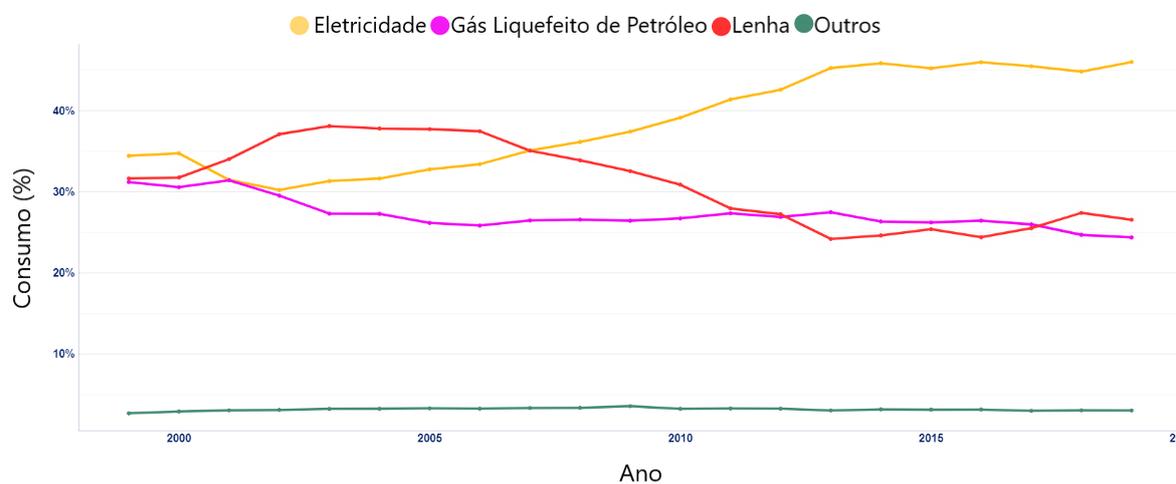


Figura 4. Percentual de consumo das diferentes fontes energéticas para o setor residencial.
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020)

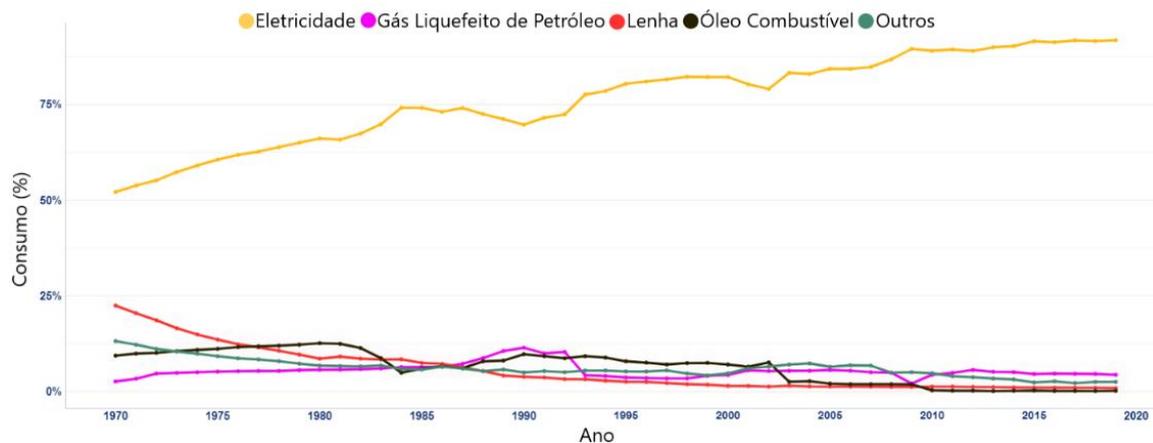


Figura 5. Percentual de consumo das diferentes fontes energéticas para o setor comercial. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020).

No Brasil, a energia elétrica é majoritariamente proveniente de fontes renováveis (92,2%), com destaque para energia hidráulica (64,9% - Figura 6). Dentre os fatores para isso está a grande disponibilidade de recursos hídricos, uma vez que o país possui diversas bacias hidrográficas à disposição. Durante períodos com pouca disponibilidade dos recursos naturais, utiliza-se outras formas de obtenção de energia (ANEEL, 2015), como termoeletricas.

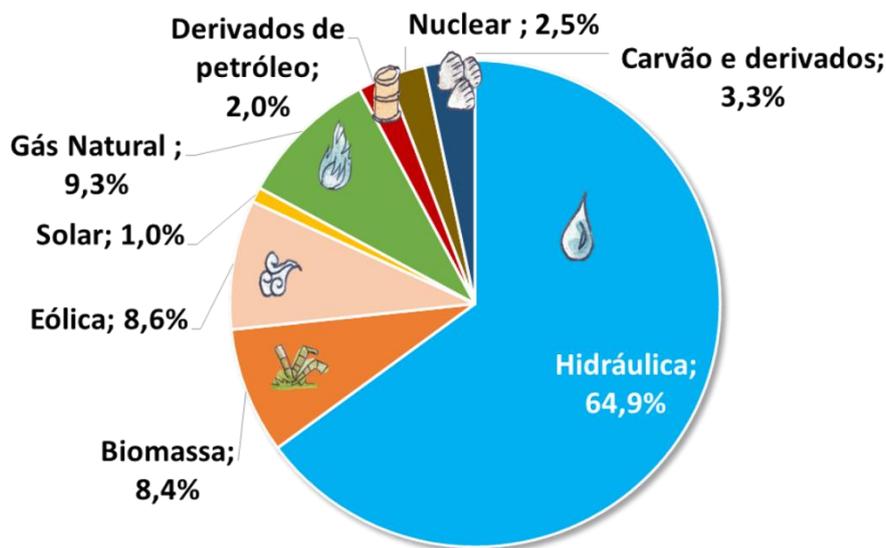


Figura 6. Matriz de energia elétrica do Brasil (2019). Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020)

2.2.5 Aterros

Aterros controlados são uma forma de estocar plástico pós-uso, evitando liberação de grande conteúdo de carbono rapidamente para atmosfera, o que aconteceria se fosse feita incineração. Apesar disso, ao priorizar reciclagem e reuso frente à disposição em aterros, a produção de plástico virgem reduz. Além disso, o plástico disposto em aterro perde seu valor no ciclo do plástico (World Economic Forum, 2016).

Não obstante, a degradação do plástico não biodegradável é muito lenta (Francis, 1984), o que inutilizaria o espaço físico ocupado pelos aterros por vários anos. Encontrar espaços disponíveis para esse fim já é um problema em diversos países (Santos et al., 2004).

Paralelamente, existe outro problema que são os aterros não gerenciados, depósitos de lixo (na linguagem popular, lixões). A disposição dos resíduos plásticos nestes locais, além de acarretar a perda do potencial deles, implica em poluição visual e contaminação de solo e águas. Ademais, os resíduos podem ser levados por chuvas, promovendo problemas de drenagem que podem potencializar enchentes e alagamentos, também como contaminação dos oceanos (Davidson et al., 2021; Geyer et al., 2017).

2.3 Descarte e coleta em Porto Alegre

Na cidade de Porto Alegre existem três coletas para resíduos: a coleta automatizada, domiciliar e seletiva. As duas primeiras são referentes à coleta de resíduos orgânicos e rejeitos. A coleta seletiva é destinada a recolher o resíduo reciclável. Ao contrário da coleta automatizada, para qual existem contêineres específicos para descarte do resíduo orgânico e rejeito, a coleta seletiva atualmente não possui um local adequado para descarte dos resíduos. Caminhões passam de duas a três vezes por semana (dependendo do bairro) para coletar os resíduos, os quais devem ser deixados na rua.

Os resíduos recicláveis são destinados às unidades de triagem (UTs). Ao todo existem 16 unidades de triagem na cidade, responsáveis por realizar a segregação do recicláveis e encaminhá-los para reciclagem e/ou reaproveitamento (Prefeitura de Porto Alegre, 2019).

2.4 Legislação acerca de reciclagem e tratamento de resíduos

O presente trabalho abrange uma análise sobre os resíduos plásticos provenientes unicamente de resíduos sólidos urbanos. A Lei nº 12.305 define a classificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) da seguinte forma:

Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I - quanto à origem:

a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;

b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”; (Lei nº 12.305/10)

Nesta mesma lei são definidas diretrizes para forma de gestão e gerenciamento dos resíduos, dispostas de forma representativa na Figura 7.

Art. 9º Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. (Lei nº 12.305/10)



Figura 7. Esquema representativo das diretrizes para gestão e gerenciamento do resíduo sólido no Brasil. A seta aponta a ordem de prioridade (do mais prioritário ao menos). Fonte: autora.

No Brasil, a lei prevê que o tratamento de resíduos seja regulamentado primeiramente pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), depois pelo plano estadual e finalmente pelo plano municipal. Nesse sentido, o plano municipal deve respeitar as diretrizes impostas pelo plano estadual, o qual, por sua vez, deve respeitar o PNRS.

No âmbito nacional, não há impeditivos legais para o emprego de técnicas de reciclagem quaternária (incineração), desde que sejam observadas as emissões gasosas, com controle e monitoramento, conforme define a Lei nº 12.305/10.

§ 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental. (Lei nº 12.305/10)

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul (PERS-RS), define diversas responsabilidades e formas de atuação, tanto para estado, municípios e empresas. Além dele, existem leis e decretos adicionais que garantem a todos o direito de educação ambiental e ordenam algumas práticas e responsabilidades. Dentre as imposições legais, propostas no plano estadual e por diretrizes e normativas, destacam-se:

- O estado deve estimular criação de indústrias de reciclagem para resíduos sólidos (PERS-RS);
- Não é permitida queima de resíduos sólidos a céu aberto, exceto em emergências sanitárias, as quais foram reconhecidas pelo órgão estadual competente pela situação (Lei 14.528, Art 46);
- São previstas advertências, multas e interdições em caso de descumprimento das leis (Lei 14.528, Art 51).

Apesar de não haver restrição imposta por lei em relação a incineradores, de acordo com o coordenador da Unidade de Assessoramento Ambiental no Ministério Público do Rio Grande do Sul, Flávio Faccin (2021), alguns anos atrás era extremamente complicado conseguir licença ambiental fornecida pelo órgão estadual responsável (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – FEPAM), devido à falta de normativas e diretrizes mais específicas para controle dessas técnicas, além da existência de um apelo social, devido à falta de entendimento sobre o impacto da incineração.

No entanto, uma série de atualizações e até mesmo criações de normativas e diretrizes estaduais foram realizadas nos últimos três anos, que especificam regulamentações sobre sistema de tratamento de resíduos. A resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) 372/2018 (2018) traz uma lista de atividades licenciáveis, dentre elas, tratamento térmico de resíduo sólido, e delega autoridade aos municípios para licenciamento de algumas delas. Isso acarreta o desafogamento de processos na FEPAM, permitindo que as solicitações que a ela chegam sejam analisadas meticulosamente. Não obstante, tratamentos térmicos de qualquer porte devem ser licenciados pelo órgão estadual responsável.

A diretriz técnica nº 01/2018 (2018) define limite de emissões gasosas para diferentes processos de geração de calor ou energia. Ao fazer isso, particulariza as diferentes tecnologias, o que cria uma maior segurança quanto à eficácia dos limites, pois processos diferentes possuem emissões diferentes, e a não diferenciação pode criar percalços na implementação deles.

Outra diretriz proposta recentemente pela FEPAM, elabora “orientações para o licenciamento [...] de tecnologias desenvolvidas para o tratamento e processamento de resíduos sólidos ainda não difundidas no Brasil” (2019). Ao fazer isso, fomenta a criação e desenvolvimento dessas tecnologias, além de possibilitar implementação de tecnologias ainda não existentes. Nessa categoria, enquadra-se a reciclagem terciária.

Essas recentes modificações incentivam e permitem que novas alternativas sejam criadas. A exemplo disso, em 2018 a empresa ECO CLEAN SOLUCOES AMBIENTAIS LTDA recebeu licença de instalação para uma indústria de pirólise de plásticos em escala piloto. Na licença consta ainda que os materiais a serem utilizados como matéria-prima são plásticos, borrachas, pneus inutilizáveis e materiais sintéticos como tecidos, carpetes e revestimentos.

Ao contrário do foco deste trabalho, os resíduos dessa indústria são provenientes de resíduos industriais. Contudo, a instalação de uma empresa desse tipo, cria oportunidades para outras. Ademais, técnicas de reciclagem terciária são recentes, sendo natural que demorem para serem efetivamente colocadas em prática.

A fim de demonstrar quão recente são as tecnologias terciárias e o crescente interesse, realizou-se pesquisa no Web of Science utilizando palavras chaves afins. O gráfico da Figura 8.a mostra que mundialmente a produção de conteúdo científico sobre o tema vem aumentando progressivamente. Apesar disso, vemos o Brasil como 11º colocado nas pesquisas da temática (Figura 8.b).

Apesar disso, o número de publicações também vem aumentando no Brasil, o que é um indicativo que o tópico vem sendo desenvolvido. De modo geral, vemos um crescimento contínuo e progressivo na pesquisa sobre reciclagem química e tecnologias de reciclagem terciária no país (Figura 9).

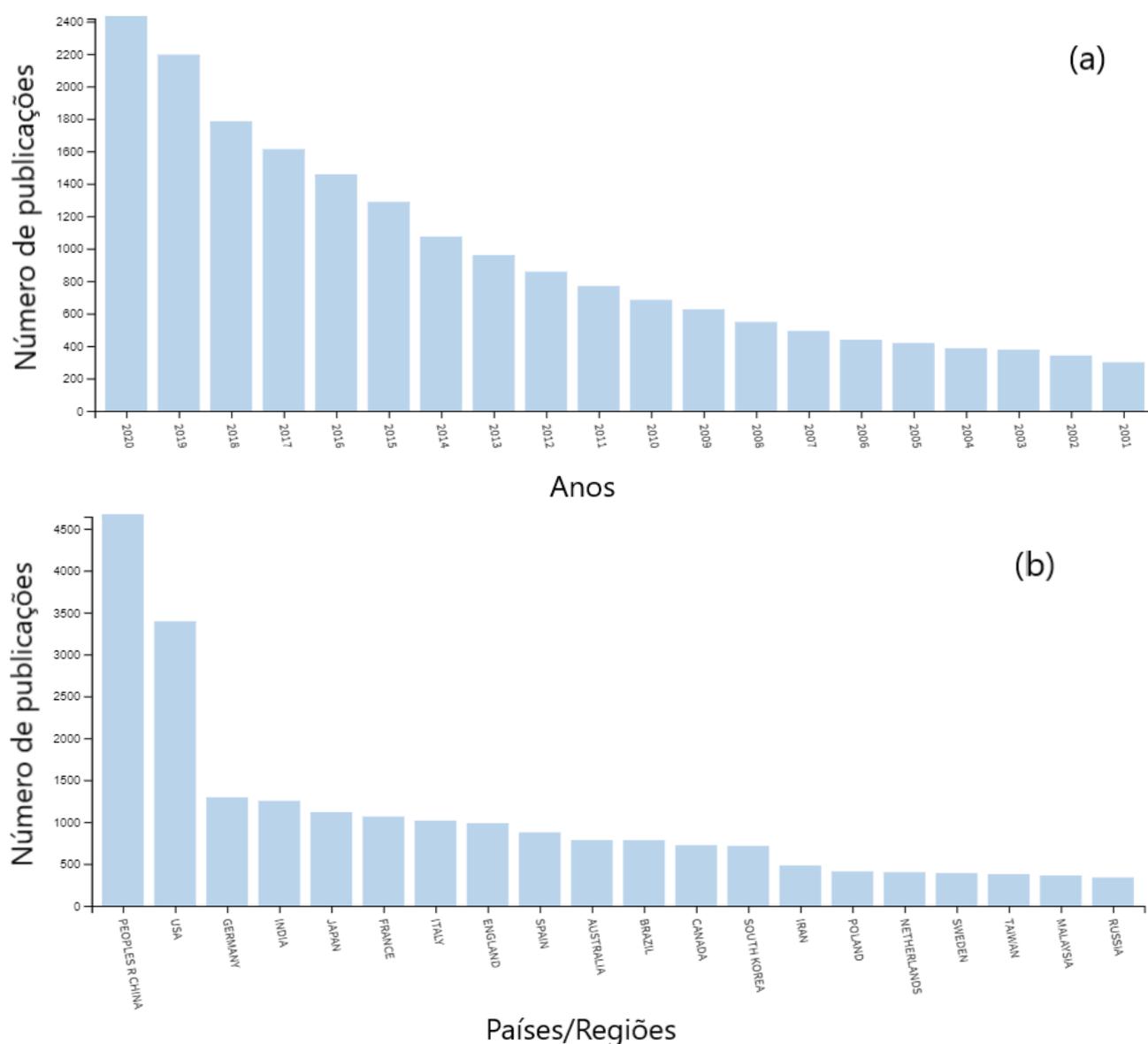


Figura 8. (a) Publicações por ano, referentes a "tertiary recycling" ou "Chemical recycling", e (b) divisão pelas regiões. Fonte: ferramenta de análise de pesquisa do Web of Science.

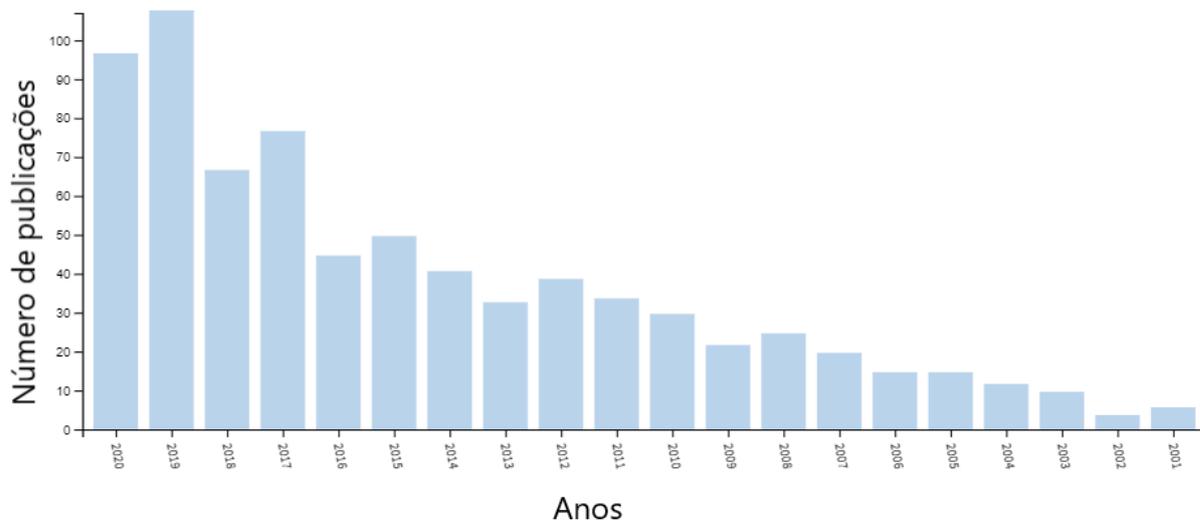


Figura 9. Publicações por ano no Brasil, referentes a "chemical recycling" ou "tertiary recycling". Fonte: ferramenta de análise de pesquisa do Web of Science.

3 Materiais e Métodos

3.1 Obtenção de dados para caracterização da situação presente

Com o intuito de caracterizar o panorama atual da reciclagem de plásticos em Porto Alegre, foi contatado o Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), responsável pela coleta seletiva, para obter dados de quantidade de resíduos coletados através da coleta seletiva (CS) e quantidade de plásticos destinados à reciclagem (vide apêndice A informações solicitadas). O DMLU forneceu informações de 2015 a 2020. Dados relativos à quantidade de plásticos recebidos na coleta seletiva não foram informados, sendo assim foram estimados.

Para estimar a quantidade de plástico presente nos resíduos da coleta seletiva, utilizou-se dados da Associação CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem, a qual faz estimativas bianuais a respeito da reciclagem no Brasil. Para os anos sem levantamento, realizou-se uma representação gráfica junto com os dados de consumo e descarte de plástico. Foi observada uma tendência entre consumo e teor de plástico presente no RSU. Testou-se dois modelos para avaliar o ajuste destes dados e escolheu-se um para estimar os valores dos anos faltantes. O modelo 1 utiliza uma função linear $f(x)$ onde a variável independente é o consumo de plásticos. O modelo 2 usa uma função dependente de duas variáveis, o consumo e o descarte de plásticos. Ambos os ajustes foram obtidos com ferramentas de análise do Excel 2016. Observou-se que o ajuste ao modelo 2 apresentou menor erro e por isso foi o escolhido. Salienta-se aqui que os dados disponíveis eram escassos, o que significa que os valores obtidos através dos ajustes podem divergir da realidade. Também é importante aqui frisar que, por utilizar dados relativos ao âmbito nacional, pode haver uma divergência da situação municipal real.

É de conhecimento que há participação de catadores para coleta de plásticos e destinação desses à reciclagem. Devido à falta de publicações sobre informações quantitativas acerca da participação dessa classe trabalhadora, foi contatado Alexandre Cardoso, catador de Porto Alegre, atuante na Cooperativa dos Catadores de Materiais Recicláveis da Cavalhada e membro da Equipe de Articulação do Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR), para obter dados referente ao trabalho dos catadores. Desse contato, entendeu-se que parte dos trabalhadores trabalham em unidades de triagem do município, alguns não possuem filiação nenhuma (catadores de rua) e outros se organizam em pequenos grupos trabalhando em coleta. Entretanto, não há dados relativos a quantidades coletadas por esses catadores que performam de forma individual ou em pequenos grupos. Assim, não foram obtidos dados relativos à participação dessa classe trabalhadora.

Outra informação necessária para analisar a situação do município frente à reciclagem é o consumo de plástico e a quantidade descartada anualmente. As principais fontes dessas informações são a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) e Plano de Incentivo da Cadeia do Plástico (PICPLAST), que são associações que monitoram índices relativos à produção e ao consumo de plástico, entre outros. Em virtude disso, são disponibilizados apenas dados nacionais. O consumo de plásticos na cidade de Porto Alegre foi então estimado a partir da hipótese que o consumo per capita nacional é similar ao municipal. Para chegar no consumo per capita, utilizou-se as estimativas de população

nacional e municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para os anos de 2014 a 2019.

Porém o consumo de plástico não é igual a quantidade de plástico descartada. Isso pois, os bens produzidos podem possuir ciclo de vida curto, médio ou longo (até 1 ano, entre 1 e 5 anos, e acima de 5 anos, respectivamente – ABIPLAST, 2020). Os percentuais de reciclagem frente à geração de resíduos plásticos relativos aos anos de 2018, 2016 e 2015 foram obtidos da ABIPLAST, e de 2019 da PICPLAST. Como a PICPLAST é uma parceria da ABIPLAST e empresas da área, possíveis diferenças em virtude de fontes diferentes são irrisórias ou mesmo inexistentes. A partir desses percentuais, foi possível calcular uma série de indicadores, descritos a seguir.

A partir da Equação 1, obteve-se a quantidade de plástico descartado. Com esse valor, foi possível calcular o índice de geração (Equação 2), que consiste no percentual de plástico que é descartado frente ao que é consumido. Os valores obtidos através das Equações 1 e 2 foram referentes aos dados nacionais.

$$\text{Plástico descartado (t)} = \frac{\text{quant. de plástico reciclado (t)}}{\% \text{ reciclado frente ao descarte}} \quad (1)$$

$$\text{Índice de geração (\%)} = \frac{\text{Plástico descartado}}{\text{Consumo de plástico (t)}} \quad (2)$$

Em posse desses dados, calculou-se os índices para o município: índice de reciclagem frente ao descarte (R_{descarte}), conforme a equação 3; o índice de coleta (Equação 4); e o índice de reciclagem frente à coleta (R_{coleta} – Equação 5).

$$R_{\text{descarte}} (t) = \frac{\text{Plástico reciclado (t)}}{\text{Plástico descartado}} \quad (3)$$

$$\text{Índice de coleta (\%)} = 1 - \frac{\text{Plástico descartado} - \text{Plástico no RSU da CS}}{\text{Plástico descartado}} \quad (4)$$

$$R_{\text{coleta}} (t) = \frac{R_{\text{descarte}}}{\text{Índice de coleta}} \quad (5)$$

3.2 Busca de material bibliográfico acerca de tecnologias e metodologias de gerenciamento

Para analisar possíveis pontos de melhorias, diversos artigos comparativos sobre sistemas municipais adequados, técnicas de reciclagem entre outros foram analisados. Foram utilizados três principais sites de busca de bibliografia: Science Direct

(<https://www.sciencedirect.com/>), Web of Science (webofknowledge.com) e Scielo (<https://www.scielo.br/>). Para busca, foram utilizados os seguintes grupos de palavra chaves:

- chemical recycling;
- single-use plastics;
- plastic, recycling, brazil

Durante as buscas, encontrou-se também um outro foco de estudo que não estava no escopo definido inicialmente: impacto da pandemia de COVID-19. Devido a sua relevância para o momento, entrou-se mais a fundo no tópico. Utilizou-se “plastic; covid; recycle” como palavras-chave.

A seleção dos artigos foi feita com base nos critérios de relevância e atualidade. Para isso utilizou-se as próprias ferramentas dos sites de busca para ordenar a relevância e selecionar anos de 2021 a 2005, priorizando sempre os mais recentes.

Uma triagem mais apurada foi feita com base no conteúdo da bibliografia selecionada. As bibliografias selecionadas trazem base conceitual do funcionamento das tecnologias, comparativo entre as metodologias existentes, análises de ciclo de vida, ações para progressão da reciclagem e comparativo entre gerenciamento de resíduos plásticos em diferentes locais. Não foram utilizados artigos sobre técnicas puramente laboratoriais, ou ainda distantes de serem implementados em escala piloto ou industrial.

3.3 Pesquisa acerca de legislação, normativas e diretrizes sobre destinação e tratamento de resíduos sólidos urbanos

Foi feita também uma pesquisa acerca da legislação para entender as possibilidades de tratamento de resíduos plásticos que poderiam ser aplicadas na cidade de estudo, conduzida da seguinte forma: 1º) as leis e diretrizes nacionais; 2º) leis e diretrizes estaduais; 3º) leis e diretrizes municipais. Esta ordem de pesquisa foi adotada, pois as legislações nacionais regem as demais estaduais, que por sua vez regem as municipais. Nessa lógica, legislações municipais não podem ser mais liberais que legislações estaduais ou nacionais.

Dentro da pesquisa acerca de legislação, foi necessário busca por diretrizes, normas e planos, aos quais as leis se remetem. Todas essas informações obtidas via sites oficiais governamentais.

Não obstante a facilidade para encontrar essas informações, algumas questões ficaram dúbias, por exemplo: a inexistência da proibição de um método, mas a ausência dele no mercado. Por isso, adicionalmente a busca sobre legislações, foi realizada uma entrevista com o engenheiro químico Flávio Faccin, coordenador da Unidade de Assessoramento Ambiental no Ministério Público do Rio Grande do Sul para sanar dúvidas remanescentes. No apêndice B é possível conferir o roteiro utilizado para a entrevista. Durante a entrevista o engenheiro citou algumas diretrizes normativas e resoluções de relevância que não haviam sido investigadas antes e adicionou-se ao escopo da pesquisa. Os resultados da pesquisa acerca da legislação encontram-se expostos no subcapítulo 2.4.

4 Resultados

4.1 Caracterização da reciclagem em Porto Alegre

Conforme explanado na metodologia, utilizou-se dados nacionais de diversas fontes e pressupôs-se que estes são representativos para situação regional. Na Tabela 1 é possível visualizar os dados nacionais de consumo per capita, calculados com base nos dados de população estimada do IBGE e de consumo de plásticos da ABIPLAST.

Tabela 1. Consumo per capita de plásticos pelo brasileiro ao longo dos anos. Fonte: compilado pela autora.

Ano	População Brasil ¹	Consumo (Mt) ²	consumo per capita (t/pessoa)	consumo per capita (kg/pessoa)
2019	210.147.125	7,6	0,036	36,17
2018	208.494.900	7,7	0,037	36,93
2017	206.804.741	7,6	0,037	36,75
2016	205.156.587	7,3	0,036	35,58
2015	203.475.683	8,0	0,039	39,32

¹ Fonte: IBGE

² Fonte: ABIPLAST

Os dados relativos à quantidade de plástico presente no RSU são provenientes de análises bienais da associação CEMPRE e estão expostos na Tabela 2. Para estimar a quantidade dos anos ímpares contido no intervalo, foram testados dois modelos. Para criação dos modelos, foram plotados os dados de consumo, descarte e teor de plástico (Figura 10). Analisando o gráfico, percebe-se que o teor de plástico no RSU tem relação com o consumo e com o descarte. Não obstante, essas observações podem ser falhas, devido à escassez de dados para as análises.

Para o Modelo 1, ilustrado na Figura 11, foi suposta uma relação linear com o consumo. Já o Modelo 2 considera duas variáveis independentes (consumo e descarte) e foi obtido através de uma regressão linear entre as duas variáveis. Na Figura 12 encontram-se os resultados dos dois modelos, assim como os dados reais. A partir dessa comparação de modelos, escolheu-se o Modelo 2 para estimar os dados.

Tabela 2. Quantidade de plástico presente no RSU. Fonte: compilado pela autora.

Ano	Plástico presente no RSU (%)	Resíduos orgânicos + rejeitos ¹ (%)	Total EX-(rejeitos e orgânicos) (%)	Plástico na CS (%)
2018	17%	31%	69%	25%
2016	11%	39%	61%	18%
2014	24%	21%	79%	30%

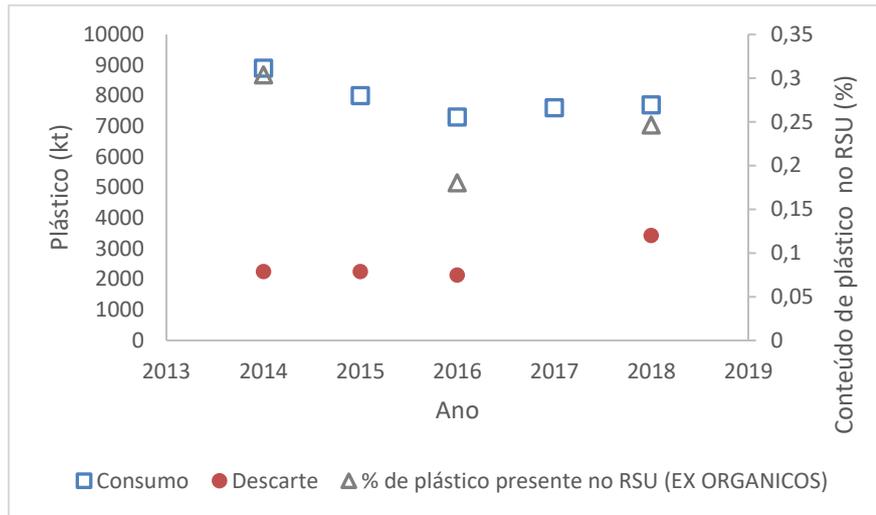


Figura 10. Teor de plástico presente no RSU, consumo e descarte de plástico ao longo dos anos. Fonte: autora.

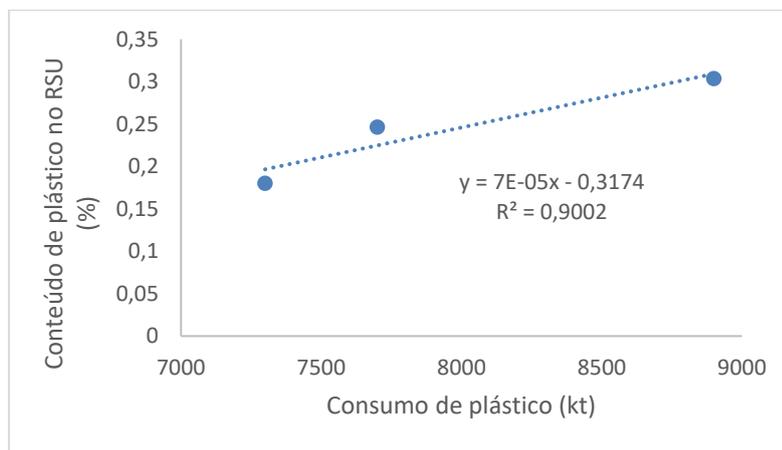


Figura 11. Relação entre consumo de plástico e conteúdo de plástico no RSU. Fonte: autora.

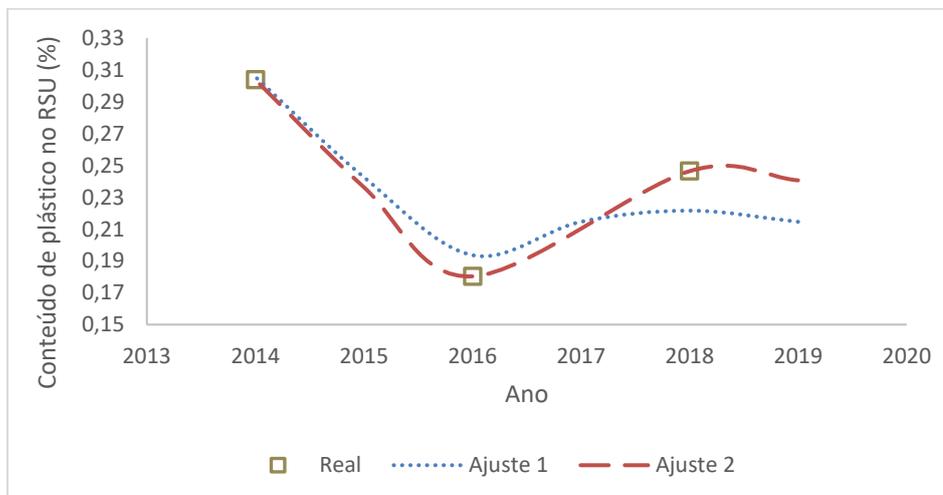


Figura 12. Dados obtidos através dos Ajustes 1 e 2, juntamente com dados reais. Fonte: autora.

Importante ressaltar que devido à falta de dados, ao se utilizar o segundo modelo, não é possível obter o percentual de plástico no RSU de 2017. Não obstante, foi escolhido o Modelo 2, devido à deficiência nos dados de reciclagem nacionais referente a 2017, que serão comentados em seguida. Os índices de geração foram calculados a partir das equações 1 e 2, aplicadas aos dados da Tabela 3 e se encontram expostos na mesma tabela.

Tabela 3. Dados nacionais sobre produção de plástico pós-consumo e reciclado. Fonte: autora

Ano	Plástico reciclado produzido ¹ (kt)	Plástico descartado gerado (kt - Eq.1)	Plástico reciclado produzido ¹ (%)	Perdas no processo de reciclagem ¹ (kt)	Consumo plástico ¹ (kt)	Índice de geração (% - Eq. 2)
2019	838	3.492	24%	135,00	7600	45,9%
2018	757,6	3.428	22,1%	159,00	7700	44,5%
2017	750,6	-	*	*	7600	-
2016	550	2.132	25,8%	*	7300	29,2%
2015	500	2.252	22,2%	*	8000	28,2%
2014	600	2.247	26,7%	*	8900	25,2%

¹ Fonte: ABIPLAST

*Sem dados

Em posse dos dados nacionais, iniciou-se a caracterização municipal. Com dados do IBGE, estimou-se o consumo de plástico, assim como a quantidade descartada na cidade (Tabela 4).

Tabela 4. Consumo de plástico estimado para Porto Alegre ao longo dos anos. Fonte: compilado pela autora.

Ano	Consumo per capita ¹ (t/hab)	População ² (hab)	Consumo (t)	Descarte (t)
2019	0,036	1.476.867	53411,10	24538,65
2018	0,037	1.481.019	54696,04	24350,78
2017	0,037	1.484.941	54571,05	*
2016	0,036	1.479.101	52630,22	15369,34
2015	0,039	1.483.771	58337,03	16423,71
2014	0,044	1.472.482	64967,53	16403,87

*Sem dados

¹ Fonte: Estimativa nacional

² Fonte: IBGE

A partir dos dados da Tabela 4, observa-se que não houve um aumento expressivo da população de 2014 a 2019 (apenas 0,30%), ao mesmo passo que o consumo para o mesmo

período sofreu uma queda de 17,8%. Contudo, no período de 2015 a 2019, observamos uma queda menor, de apenas 8,4%. Por isso, seria esperado uma manutenção ou redução no descarte, situação diferente da real, onde verifica-se um aumento de quase 50% entre 2014 e 2019. Isso pode ser explicado ao comparar o mercado de produção de plásticos de 2019 e 2017 (ABIPLAST, 2017, 2020), onde observa-se um aumento no consumo de bens com ciclo de vida curto. Uma vez assumido que os consumos nacional e municipal apresentam a mesma tendência, pode-se supor que o perfil de consumo é similar e assim, justificar o crescimento no descarte municipal por esse aumento de consumo de produto com ciclo de vida curto. Uma possível explicação para isso é uma mudança de hábitos da população, que supostamente passou a utilizar mais produtos com ciclo de vida curto (até 1 ano) frente a outros.

A partir dos dados fornecidos pelo DMLU (Tabela 5), foi estimado a quantidade de plástico presente na CS, o índice de reciclagem frente ao descarte, índice de reciclagem frente a coleta e o índice de coleta (Tabela 6). Através do índice de coleta, estima-se que boa parte do plástico ainda não chega à coleta seletiva. Em 2019, o índice de coleta era de 18,7%, o que significa que 81,3% do plástico descartado em Porto Alegre não foi coletado pela CS. É importante sinalizar que a quantidade coletada pelos catadores independentes não está computada nesse valor, podendo fazer o índice de coleta aumentar, levando a uma situação mais amena.

Tabela 5. Dados referentes à coleta seletiva realizada. Fonte: DMLU (2021).

Ano	Massa total de resíduos recicláveis e material plástico coletada (t/ano)	Massa de resíduos sólidos destinada à reciclagem (t/ano)	Plásticos destinados à reciclagem (t/ano)
2019	19.051,50	12.118,81	1.275,52
2018	17.419,70	11.266,78	1.410,64
2017	19.993,00	13.088,43	1.681,99
2016	21.463,00	13.741,33	1.658,20
2015	27.387,00	18.744,88	2.386,66

Não obstante essa falha no presente estudo, é impossível que o montante restante seja coletado em sua totalidade por essa classe operária. Ainda existe uma parcela dos plásticos, resíduos recicláveis, descartados juntamente com o resíduo orgânico, ou no próprio ambiente, o que corrobora com diversos problemas existentes, desde poluição de águas e solo, efeitos prejudiciais a vida humana e animal (Chen et al., 2021).

Tabela 6. Análise da reciclagem e coleta dos plásticos residuais em Porto Alegre. Fonte: autora.

Ano	Plástico presente no RSU da CS (t)	$R_{descarte}$ (% - Eq. 3)	Índice de coleta (% - Eq. 4)	R_{coleta} (% - Eq. 5)
2019	4.584,29	5,2%	18,7%	27,8%
2018	4.291,81	5,8%	17,6%	32,9%
2017	-	-	-	-
2016	3.870,38	10,8%	25,2%	42,8%
2015	6.471,23	14,5%	39,4%	36,9%

Além disso, observa-se uma queda ao longo dos anos no percentual reciclado frente ao coletado, o que é extremamente preocupante. Mesmo que o consumo de plástico não esteja aumentando (Tabela 4), era esperado que a reciclagem aumentasse ao longo dos anos, visto a importância do assunto.

Sintetizando, Porto Alegre tem dois problemas principais: baixa reciclagem dos plásticos coletados (mais de 50% dos plásticos coletados são destinados a aterros) e baixo índice de coleta. A fim de propor tratativas que condizem a situação legal do estado e país, utilizou-se como guia as diretrizes para gerenciamento dos resíduos sólidos expostos no Artº9 da Lei nº 12.305/10, citado anteriormente.

4.2 Possíveis tratativas e meios de solucionar ou amenizar a situação da cidade

Ao considerarmos as diretrizes para forma de gestão e gerenciamento dos resíduos propostas no PNRS, observamos que a primeira ação seria a não geração, seguindo da redução da utilização do material plástico. Entretanto, Santos et al. (2004) apontam que a substituição do plástico constitui uma alternativa secundária. Isso, pois o plástico possui baixo custo, maior praticidade e leveza em comparação a possíveis substituintes. Ademais, o advento da pandemia de COVID-19 reafirmou o plástico como um material essencial nas nossas vidas (Parashar e Hait, 2021; Vanapalli et al., 2021).

É relevante aqui comentar que a quantidade de resíduos sólidos recicláveis (RSR) coletado pelo DMLU não sofreu aumento expressivo em 2020 comparado com 2019 (Figura 13). Entretanto isso não significa que o percentual de plástico presente na CS possa ter aumentado.

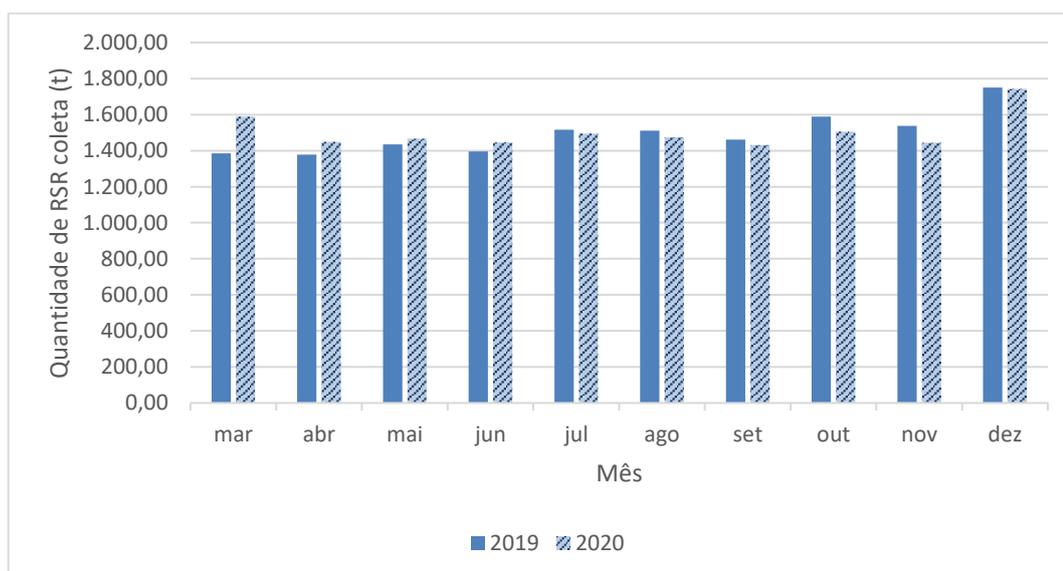


Figura 13. Comparação entre quantidade coletada pelo DMLU de RSR em 2019 e 2020.
Fonte: DMLU (2021).

A partir do ponto que não é possível reduzirmos significativamente o consumo de plástico atual, segue-se para a próxima tratativa no PNRS: reutilização. Ao contrário do vidro, plásticos possuem natureza não inerte, o que dificulta o uso de embalagens retornáveis devido uso indevido das mesmas pelos consumidores, sendo necessário processos de limpeza mais sofisticados e onerosos (Santos et al., 2004). Entretanto, pode ser uma prática a ser realizada localmente. Ao fazer isso, há ganhos tanto para o estabelecimento, quanto para os consumidores. A exemplo disso, existe o Mercado Brasco, com três unidades em Porto Alegre e conta com um sistema de embalagens de PET retornáveis de suco de laranja (Guerra, 2020), que mostra que para produção local é possível realizar práticas incentivando um consumo mais consciente.

Ainda, pelas características não inertes citadas, nem todo material pode ser reutilizado. Além disso, esse processo se torna mais caro devido ao transporte de uma logística reversa necessária para que as embalagens retornem aos produtores não locais. Por isso, boa parte dos plásticos ainda é descartada.

No Brasil, ainda não há instrumentos legais para obrigar as empresas realizarem esse tipo de ação de logística reversa (Azevedo et al., 2021). Ações de logística reversa abrangem desde design de embalagens e rotulagem de produtos, para auxiliar a população a realizar a separação correta dos resíduos, à incentivos monetários para reciclagem. Santos et al. (2004) observam que a tendência é a curto e médio prazo utilização de leis para incentivar a logística reversa, que ao longo prazo deve se tornar rentável.

Para que o sistema de reciclagem funcione, é imprescindível a presença de um sistema de gestão de resíduos urbanos eficaz (Azevedo et al., 2021; Santos et al., 2004; Vanapalli et al., 2021). Um dos entraves para um gerenciamento de qualidade é o custo do próprio sistema. No ano de 2020, o sistema de CS de Porto Alegre despendeu R\$ 1.072.883,30 mensalmente, totalizando em R\$ 12,87 milhões gastos para manutenção do serviço (DMLU, 2021). Esse montante se refere aos custos de um sistema que ainda não possui um receptáculo como o sistema de resíduos orgânicos e rejeitos, o qual possui contêineres específicos. Ao não ter um local específico para deposição dos RSR, há um aumento da probabilidade de contaminação, além da possibilidade do rompimento dos acondicionadores do resíduo, o que levaria à contaminação do ambiente e perda da matéria destinada à reciclagem.

Santos et al. (2004) sugerem que, para o governo ter subsídio e cobrir as despesas com o sistema de coleta, existam taxas sobre embalagens para as empresas. Alguns países já realizam essa metodologia, como a Alemanha, onde a taxa varia de acordo com peso e tipo do material. Essa iniciativa incentiva as empresas ao desenvolvimento de embalagens mais sustentáveis e inovadoras (Hana, 2013 apud Azevedo et al., 2021).

Além disso, esses incentivos auxiliariam a empoderar e valorizar a ação de catadores (Azevedo et al., 2021). Atualmente, o DMLU atende todos os bairros da cidade, mas catadores podem atuar em áreas de difícil acesso para os caminhões, ou em outras situações pontuais que a prefeitura não consegue atender, não sendo necessário disputar os locais. Ademais, diversos catadores trabalham nas UT, sendo um trabalho indispensável para a reciclagem.

Todavia, esses incentivos e ações privadas se tornam fúteis sem a participação da população. Além disso, essa seria uma iniciativa estadual ou nacional. É imprescindível que

haja participação da população para realizar a separação correta, de forma a minimizar contaminações do resíduo e aumentar os índices de reciclagem. Para aumentar o engajamento da população e consciência ambiental, campanhas de educação ambiental são uma solução (Azevedo et al., 2021). Vanapalli et al. (2021) sugerem que seja incorporada, no currículo escolar, educação ambiental com enfoque na poluição causada por plásticos e suas consequências.

Segundo Bortoleto e Hanaki (2007), educação ambiental tem “o objetivo de criar uma consciência ambiental forte entre os cidadãos, o setor privado e o setor público”. Não obstante, reforçam que é um esforço de longo prazo. Nesse sentido, é importante que haja constância durante as trocas de governo no que diz respeito às diretrizes ambientais.

Bortoleto e Hanaki (2007) realizaram uma pesquisa com participação pública em Porto Alegre e identificaram queda de campanhas governamentais locais a respeito de educação ambiental. A fonte da consciência ambiental aos participantes preocupados com questões ambientais e praticantes de segregação de resíduos foi atribuída a campanhas de órgãos não governamentais e escolaridade. Aqui é importante lembrar que trabalho escolar, como já dito, pode ser uma ação governamental para promover educação ambiental.

Todas essas ações de criação de uma consciência ambiental, comprometimento populacional, leis de taxação e incentivos privados são elementos para possibilitar um melhor sistema de gerenciamento, aumentando os índices de coleta. Para aumentar os índices de reciclagem, é importante uma diversidade de metodologias, além de uma base fortificada de CS.

Das diversas formas de reciclagem, a secundária é a mais difundida. Avanço nas técnicas de reciclagem mecânica juntamente com uma coleta seletiva eficiente possibilitam aplicações mais nobres do plástico reciclado mecanicamente, como por exemplo incorporação em embalagens destinadas a setor de alimentos. Entretanto, ainda há restrições legais devido a possibilidade de contaminação nos alimentos. O PET multicamada para aplicação em bebidas carbonatas utilizando material reciclado é uma exceção (Santos et al., 2004).

Entretanto, mesmo que sejam realizadas as separações corretas, limpeza dos resíduos plásticos, segregação dos tipos de plásticos, nem todos são suscetíveis a essa metodologia. Também, devido ao processo de *downcycling*, pode não se tornar viável economicamente utilizar esse método. Nesse ponto entraria a reciclagem terciária.

O foco do presente trabalho não é analisar as técnicas empregadas em si, mas sim entender a viabilidade delas para um determinado cenário. Nesse sentido, alguns aspectos relevantes acerca de diversas metodologias de reciclagem química serão expostos.

Jeswani et al. (2021) alertam que no processo de pirólise as perdas de material são extremamente altas, chegando em 50%. Em 2018 e 2019, as perdas no processo de reciclagem mecânica no Brasil representaram 17,3% e 13,9%, respectivamente. Esse comparativo não tem objetivo de comparar as duas técnicas, apenas auxiliar a quantificar e explanar as dimensões da perda. Quanto maior a perda, mais material virgem será necessário para suprir a demanda.

Outro fator importante são as emissões gasosas liberadas no processo. Em comparação com incineração de RSU, é apontado um impacto positivo, ou seja, a reciclagem terciária é menos impactante ambientalmente (Jeswani et al., 2021; Meys et al., 2020). Isso demonstra é preferível ambientalmente reciclagem química frente a incineração.

Outro ponto que favorece a reciclagem terciária é a abrangência dela legalmente no Rio Grande do Sul a partir das recentes diretrizes técnicas da FEPAM, emitidas entre 2018 e 2020 (CONSEMA, 2018; FEPAM, 2018). Naturalmente, algumas dificuldades extras podem se apresentar por tratamentos de RSU ao invés de industriais, como localização da empresa e transporte da matéria-prima a ela. Empresas que liberam emissões gasosas possuem normativas mais restritivas ao serem instaladas em centros urbanos. Não obstante, o produto dessa reciclagem é um material de maior valor agregado (Davidson et al., 2021; Meys et al., 2020).

Dentre as técnicas de reciclagem química, a pirólise é a mais encontrada e com resultados mais promissores. Davidson et al. (2021) aponta que o desenvolvimento de processos de depolimerização cresceu focado em PET e em tecnologias específicas, entretanto ainda haveria espaço para pesquisas abrangendo outros plásticos. Todavia, de acordo com as pesquisas da ABIPLAST (2020), o PET é o polímero de condensação mais consumido no Brasil (5,4% de todo consumo de plástico). Ademais, segundo estudo do PICPLAST, 42% do plástico reciclado em 2019 é PET (Figura 14) e, segundo a Associação Brasileira da Indústria de PET (ABIPET), esse valor correspondeu a 55% do PET descartado no mesmo ano (ABIPET, 2020). Desta forma, possivelmente a reciclagem química apresente maior vantagem para outros plásticos, como PP e PE.

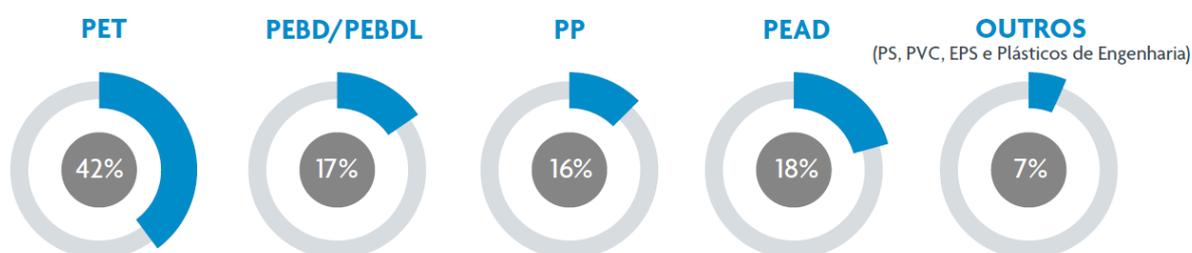


Figura 14. Diversidade de plásticos pós-consumo reciclados em 2019. Fonte: PICPLAST, 2020.

É relevante lembrar que há ainda divergências quanto as LCAs comparativas entre reciclagem mecânica e reciclagem química. Meys et al. (2020) realizaram LCAs para PS, PP, PE e PET e, comparando com a reciclagem mecânica concluíram que, se o foco é a redução de emissões gasosas, é preferível utilizar a reciclagem mecânica frente a reciclagem química. Por ser também uma técnica mais simples (Santos et al., 2004), é improvável a substituição da reciclagem mecânica pela terciária. Conforme Davidson et al. (2021) apontaram, as técnicas devem ser tratadas como complementares e não concorrentes.

Dessa perspectiva, tanto a reciclagem terciária quanto a recuperação energética (reciclagem quaternária), ao serem técnicas complementares da reciclagem secundária, não irão diminuir a quantidade de trabalho dos sucateiros e catadores. Os resíduos plásticos ideais a serem destinados a essas duas metodologias são os resíduos não aptos a reciclagem

mecânica, ou seja, ainda existe a necessidade de uma triagem e conscientização populacional forte para separação correta.

A reciclagem quaternária, em comparação com a reciclagem química, exige um nível de separação do resíduo menor. Entretanto, segue sendo uma técnica com emissões gasosas com alto grau de periculosidade, as quais devem ser controladas (Davidson et al., 2021; Francis, 1984). Por isso, é preferível que sejam utilizadas outras técnicas preferencialmente para gestão de resíduos.

Uma possibilidade seria utilização da incineração em momentos ocasionais, por exemplo, em períodos com pouca disponibilidade dos recursos naturais para as usinas de energia elétrica. Durante esses momentos, já se utilizam de outras formas fontes de energia (ANEEL, 2015). Em 2019, 19,7% da matriz elétrica brasileira proveio de queima de material, seja ele biomassa, gás natural ou derivados de petróleo. Mais especificamente, no Rio Grande do Sul, utilizam-se termelétricas para períodos de escassez. Entretanto mais estudos devem ser realizados para entender a viabilidade técnica e econômica de permanecer com uma usina parada durante um momento e se ela suportaria a necessidade da rede elétrica para os momentos de escassez, além do impacto das emissões gasosas na matriz energética.

Ao contrário de outros países, onde falta de espaço para criação de aterros é um problema (Azevedo et al., 2021; Meys et al., 2020), o Brasil possui muito espaço físico disponível por ser um país de dimensões continentais, o que desestimula a utilização de outras metodologias de reciclagem, justificando o atraso na implementação de novas tecnologias no país. Atualmente, a maior parte do plástico ainda é destinado a aterros, onde perdem seu potencial energético (Davidson et al., 2021; Francis, 1984). Mesmo que haja reversão da situação de reciclagem, inevitavelmente plásticos irão parar em aterros. A prova concreta disso é a utilização de sacolas plásticas para acondicionamento de resíduos orgânicos. Uma possível solução seria utilização de sacolas de polímeros biodegradáveis ou biocompostáveis. Entretanto, estudos de LCAs são discordantes acerca do impacto dessas sacolas frente as de plástico comum (Santos et al., 2012). Essas soluções, portanto, ainda exigem mais estudos e pesquisas. Sendo assim, é seguro assumir que durante um período considerável ainda haverá necessidade de destinar plásticos para aterros sanitários.

5 Considerações finais

Foi realizada a caracterização do perfil de reciclagem de plásticos da cidade de Porto Alegre. A cidade foi caracterizada com um baixo índice de coleta e de reciclagem e ainda mais preocupante é uma tendência de queda nesses indicadores ao longo dos anos. Durante o trabalho, a falta de informações particulares da cidade levou a formulações de hipóteses para concretizar essa caracterização. Salienta-se a importância de mapear a atividade dos catadores e integrar eles ao sistema municipal de gerenciamento de resíduos formalmente.

Com base em outros estudos, destaca-se a importância de melhorar a consciência e educação ambiental na população. Campanhas governamentais locais devem ser realizadas, em paralelo com melhorias no próprio sistema de coleta, como criação de receptáculos para CS. Essas ações, ao serem realizadas em conjunto, demonstram para população empenho da prefeitura e conferem maior credibilidade às campanhas. É imprescindível ter em mente educação ambiental, lembrando que é um processo contínuo e necessário investimento continuamente.

Ações como taxação de produtos são mais complexas se tratadas apenas em escala municipal, pois poderiam desencorajar instalação de novas indústrias e comércios. Dessa perspectiva, seria necessária ação estadual ou federal conjunta para implementação dessas políticas. Estudos mais profundos sobre o impacto quantitativo são indicados para fomentar a aplicação dessa iniciativa.

Em relação aos métodos de reciclagem, a partir de um sistema de CS mais eficaz, a tendência é o aumento da quantidade destinada à reciclagem mecânica. Adicionalmente, nem sempre poderão ser reciclados mecanicamente, por isso outras técnicas são necessárias a fim de não destinar todo montante restante para aterros e desperdiçar o potencial energético do plástico.

Uma análise preliminar dos métodos leva à reciclagem química como a melhor alternativa em comparação com a incineração. Dentre as possíveis alternativas, utilizar técnicas mais consolidadas, como a pirólise possivelmente apresentaria maior aproveitamento, visto os índices de reciclagem de PE, PS e PP são inferiores ao PET. Contudo, recomenda-se realização de análises de ciclo de vida para avaliação dos impactos locais.

Ainda, recomenda-se que em trabalhos futuros seja ampliada a busca por fontes de dados secundárias de coleta de resíduos e reciclagem de plásticos, bem como realizado levantamento de dados primários, com entrevistas e visitas à campo, para caracterizar com maior precisão a situação de Porto Alegre e, assim, o trabalho possa servir de base para autoridades públicas e se tornar instrumento para realização de ações concretas.

Além disso, aconselha-se que seja investigada com maior profundidade a inclusão de novas tecnologias, de forma a terem um impacto social positivo, não só a sociedade como um todo, mas principalmente a classe de trabalhadores que atuam diretamente na área.

REFERÊNCIAS

- ABEJÓN, R.; BALA, A.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; et al. When plastic packaging should be preferred: Life cycle analysis of packages for fruit and vegetable distribution in the Spanish peninsular market. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, n. December 2019, p. 104666, 2020.
- ABIPLAST. **11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. Disponível em: <abiplast.org.br>.
- ABIPLAST. Perfil 2017. **Associação Brasileira da Indústria do Plástico**, p. 88, 2017.
- ABIPLAST. Perfil 2019. **Associação Brasileira da Indústria do Plástico**, 2020.
- ANEEL. Bandeiras Tarifárias. **24/11/2015**, 2015.
- ARDUSSO, M.; FORERO-LÓPEZ, A. D.; BUZZI, N. S.; et al. COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America. **Science of the Total Environment**, v. 763, p. 144365, 1 abr. 2021.
- AZEVEDO, B. D.; SCAVARDA, L. F.; CAIADO, R. G. G.; et al. Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience. **Waste Management**, v. 120, p. 772–783, 1 fev. 2021.
- BILLMEYER, F. W. **Textbook of Polymer Science**. 3º ed. New York: John Wiley, 1984.
- BORTOLETO, A. P.; HANAKI, K. Report: Citizen participation as a part of integrated solid waste management: Porto Alegre case. **Waste Management and Research**, v. 25, n. 3, p. 276–282, 2007.
- CHEN, Y.; AWASTHI, A. K.; WEI, F.; et al. Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. **Science of the Total Environment**, v. 752, p. 141772, 2021.
- CONSEMA. **Resolução CONSEMA 372/2018RS/Brasil**, 2018. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/resolucoes>>
- DAVIDSON, M. G.; FURLONG, R. A.; MCMANUS, M. C. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126163, 2021.
- DMLU. **Respostas referentes ao formulário no Apêndice A**Porto Alegre, 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ENERGETICA>>. Acesso em: 9 mar. 2021.
- FACCIN, F. **Coordenador da Unidade de Assessoramento Ambiental no Ministério Público do**

- Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 2021.
- FEPAM. **Diretriz técnica 01/2018.** RS/Brasil, 2018. Disponível em:
<<http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/area4/17.asp>>
- FEPAM. **Diretriz técnica nº. 02/2019.** RS/Brasil, 2019. Disponível em:
<<http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/area4/17.asp>>
- FRANCIS, R. **Recycling of Polymers.** Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 1984.
- GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.
- GUERRA, G. “Somos jovens, mas gostaríamos de resgatar os velhos costumes interioranos”, avisa rede que abrirá terceiro mercado em esquina icônica | GZH. 2020.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11469:2016 - Plastics — Generic identification and marking of plastics products**, 2016.
- JESWANI, H.; KRÜGER, C.; RUSS, M.; et al. Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. **Science of the Total Environment**, v. 769, p. 144483, 2021.
- LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. E. C. **Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica.** Rio de Janeiro: E-Papers, 2001.
- MEYS, R.; FRICK, F.; WESTHUES, S.; et al. Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 162, n. May, p. 105010, 2020.
- PARASHAR, N.; HAIT, S. **Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter?****Science of the Total Environment** Elsevier B.V., , 10 mar. 2021.
- PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. **DMLU.** Disponível em:
<<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmlu>>. Acesso em: 18 fev. 2021.
- SANTOS, A. S. F.; FERNANDO, F. H.; DA COSTA, B. L. N.; et al. Sacolas plásticas: Destinações sustentáveis e alternativas de substituição. **Polímeros**, v. 22, n. 3, p. 228–237, 2012.
- SANTOS, A. S. F.; AGNELLI, J. A. M.; MANRICH, S. Tendências e desafios da reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros**, v. 14, n. 5, p. 307–312, 2004.
- VANAPALLI, K. R.; SHARMA, H. B.; RANJAN, V. P.; et al. Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. **Science of the Total Environment**, v. 750, p. 141514, 1 jan. 2021.

VERMA, R.; VINODA, K. S.; PAPIREDDY, M.; et al. Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review.

Procedia Environmental Sciences, v. 35, p. 701–708, 1 jan. 2016.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics &**

catalysing action. Disponível em:

<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics-catalysing-action>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. A. **Introduction to Polymers**. CRC Press, 2011.

APÊNDICE A

Formulário de dados enviado ao DMLU, respondido pelo engenheiro civil e doutor em saneamento ambiental, Geraldo Antônio Reichert, da equipe de aterros do DMLU.

- Quantidade de resíduo coletada na coleta seletiva (resíduo reciclável);
- Bairros atendidos total e parcialmente;
- Custo de manutenção da coleta seletiva;
- Quantidade de resíduos recicláveis destinada a reciclagem;
- Quantidade de plásticos destinados à reciclagem.

Adicionalmente, foi fornecida informação sobre um projeto piloto de realização de coleta seletiva em contêiner.

APÊNDICE B

Roteiro utilizado como base para entrevista com o engenheiro Flávio Faccin,

1. Identificação do entrevistado

- a. Qual seu nome?
- b. Qual sua profissão?

2. Compreensão da legislação quanto a incineração

- a. Existe alguma lei que proíba a existência de incineradores de resíduo urbano e/ou plásticos?
- b. Qual(is) o(s) principal(is) empecilho(s) para conseguir licença* para um incinerador?
- c. Atendimento aos parâmetros propostos de emissões gasosas?
- d. Existe algum aspecto não técnico que dificulta a licença de incineradores?

*quando se refere a licença, entenda-se licença para construção (aval) + licença de operação

3. Reciclagem terciária

- a. Outra forma de reciclagem é a reciclagem terciária, que consiste em transformar o plástico em combustível ou monômeros através de pirólise, craqueamento e outras técnicas. Se uma empresa hoje deseja abrir uma indústria de reciclagem terciária,
- b. Como ela seria enquadrada?
- c. Teoricamente, seria possível ela conseguir licença ambiental ou seria necessário alteração legal?