

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

IAGO FERNANDES FIGUEIREDO

MAPEAMENTO COMPARATIVO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE POLIURETANO
RECICLADO NO MEIO ACADÊMICO E INDUSTRIAL

BELO HORIZONTE

2022

IAGO FERNANDES FIGUEIREDO

**MAPEAMENTO COMPARATIVO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE POLIURETANO
RECICLADO NO MEIO ACADÊMICO E INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

BELO HORIZONTE

2022

IAGO FERNANDES FIGUEIREDO

**MAPEAMENTO COMPARATIVO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE POLIURETANO
RECICLADO NO MEIO ACADÊMICO E INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Paulo Ferreira Santos – Orientador

Prof. Mayra Aparecida Nascimento

Prof. Weslei Patrick Teodósio Sousa

AGRADECIMENTOS

Meus primeiros agradecimentos são aos meus professores, ao CEFET-MG e aos meus colegas de turma. Em especial ao meu professor orientador João Paulo.

Gostaria de agradecer a todos que passaram comigo pelo Fórmula Cefast, onde eu aprendi o verdadeiro significado de equipe.

Agradeço a todos meus amigos, sem vocês a vida seria menos engraçada e divertida.

Por fim, gostaria de agradecer a minha família, que me proporcionou apoio financeiro e mental durante todos esses anos de graduação. Obrigado Jamir, Márcia e Vitor.

RESUMO

O poliuretano configura-se como um dos materiais poliméricos mais versáteis em termos de aplicações de engenharia, apresentando, portanto, uma importância estratégica nesse ramo industrial. Os tipos de processos possíveis no gerenciamento de resíduo de poliuretano foram discutidos em detalhes no presente trabalho, com foco na reciclagem mecânica, reciclagem química e na recuperação energética. O trabalho foi desenvolvido seguindo a metodologia de estudo de caso, a qual foi dividida nas seguintes etapas: planejamento, coleta e análise de dados e compartilhamento de resultados. Visando criar uma comparação das abordagens acadêmicas e industriais do tema foram coletados dados de estudos acadêmicos e de empresas. O entendimento do meio acadêmico baseou-se em 15 publicações, selecionadas por sua relevância e contribuição tecnológica. E o entendimento industrial foi baseado em entrevistas com 13 empresas do sudeste brasileiro. Ao fim do trabalho pode-se ter um esboço do panorama geral do meio acadêmico e industrial em relação a reciclagem de poliuretano, levando em conta o processo de reciclagem, tipo de resíduo utilizado e produtos obtidos. Os dados observados na pesquisa apontam que 100% das empresas utilizam da reciclagem mecânica, e concluiu-se que a utilização deste processo na indústria deve-se a maior simplicidade, menores custos quando comparado a reciclagem química, e a obtenção de produtos com grande adesão comercial. No meio acadêmico, há uma utilização de 73% de reciclagem mecânica e apenas 27% de reciclagem química. Concluiu-se que há uma procura pelo aprimoramento do método mecânico e para a caracterização de novos produtos de poliuretano. Entretanto o déficit na versatilidade de uso dos produtos obtidos pela reciclagem mecânica é o responsável pelas pesquisas em reciclagem química, que visam principalmente aumentar a gama de produtos provenientes da reciclagem de poliuretano. A crescente relevância dos métodos de reciclagem química no meio acadêmico indica que o cenário industrial provavelmente deve sofrer mudanças nos próximos anos à medida que novos estudos obtenham aprimoramentos nos métodos e conseqüente diminuição dos custos de processo.

Palavras-chave: Reciclagem. Poliuretano. Gestão de resíduos.

ABSTRACT

Polyurethane is one of the most versatile polymeric materials in terms of engineering applications, presenting, therefore, a strategic importance in this industrial branch. The types of processes possible in the management of polyurethane waste have been discussed in detail in the present work, with a focus on mechanical recycling, chemical recycling and energy recovery. The work was developed following the case study methodology, which was divided into the following steps: planning, data collection and analysis and sharing of results. In order to create a comparison of academic and industrial approaches to the topic, data from academic and business studies were collected. The understanding of the academic universe was based on 15 publications, from the most varied countries in the world, selected for their relevance and technological contribution. And the industrial understanding was based on interviews with 13 companies in southeastern Brazil. At the end of the work, it was possible to have an outline of the general panorama of the academic and industrial universe in relation to polyurethane recycling, taking into account the recycling process, type of waste used and products obtained. The data observed in the research indicate that 100% of the companies use mechanical recycling, and it was concluded that the use of this process in the industry is due to greater simplicity, lower costs compared to chemical recycling, and obtaining products with great commercial membership. In the academic universe, there is a use of 73% of mechanical recycling and 27% of chemical recycling. It was concluded that there is a demand for the improvement of the mechanical method and for the characterization of new polyurethane products. However, the deficit in the versatility of use of products obtained by mechanical recycling is the reason for research in chemical recycling, which mainly aims to increase the range of products from polyurethane recycling. The growing relevance of chemical recycling methods in the academic environment indicates that the industrial scenario is likely to undergo changes in foreseeable future as new studies obtain improvements in methods and consequent decrease in process costs.

Key words: Recycling. Polyurethane. Waste management.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Representação dos tipos de cadeias poliméricas.....	15
Figura 2 – Mapa do lixo plástico no mundo.....	17
Figura 3 - Produção global, uso e destino de resinas, fibras e aditivos poliméricos (1950 a 2015 em milhões de toneladas).....	18
Figura 4 - Projeção e destinação acumulada de resíduos plásticos no mundo	18
Figura 5 – Estatísticas da geração de resíduos de polímeros na África (AFR), sul asiático (SAR), meio leste e norte africano (MENA), leste e centro asiático (ECA), LAC, EAP e OCDE	19
Figura 6 – Participação de mercado de diferentes tipos de produtos de poliuretano	20
Figura 7 – Exemplo de reação de síntese de poliuretano	21
Figura 8 – Escala de Lansink	23
Figura 9 - Aglomerado de espuma de poliuretano	24
Figura 10 – Etapas da realização do estudo de caso	28
Figura 11 – Percentual de publicações referentes aos diferentes processos de reciclagens encontrados no meio acadêmico	34
Figura 12 – Tipos de resíduos utilizados no meio acadêmico	35
Figura 13 – Tipos de produtos obtidos no meio acadêmico	37
Figura 14 – Tipos de resíduo utilizados no meio industrial.....	39
Figura 15 – Tipos produtos obtidos no meio industrial	40

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Comparação de métodos de reciclagem química de poliuretano.	26
Tabela 2 – Publicações selecionadas para o desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados.	33
Tabela 3 – Empresas selecionadas para o desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados.	38

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AF – Ácido fórmico

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

PU – Poliuretano

OECD - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

CASE - Coatings, Adhesives, Sealants, Elastomers

PVC – Policloreto de vinila

WWF – Word Wide Fund

3R – Reduzir, reutilizar e reciclar

EOL – End of Life

DNA - Ácido desoxirribonucleico

TPU - Poliuretanos termoplásticos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivos Gerais	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Polímeros.....	14
3.2 Panorama da reciclagem de polímeros.....	16
3.3 Poliuretanos	19
3.4 Gerenciamento de resíduos de poliuretano	22
3.4.1 Reciclagem mecânica	23
3.4.2 Reciclagem química e de matéria prima	25
3.4.3 Recuperação energética.....	27
3.5 Estudo de caso	27
4 METODOLOGIA.....	29
4.1 Planejamento	29
4.2 Design.....	29
4.3 Coleta de dados.....	30
4.3.1 Meio acadêmico	30
4.3.2 Meio Industrial	30
4.4 Análise	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5.1 Coleta de dados.....	32
5.1.1 Meio acadêmico	32
5.1.2 Meio indústria	32
5.2 Análise	32
5.2.1 Meio acadêmico	32

5.2.2 Meio industrial	37
5.2.3 Análise comparativa	41
6 CONCLUSÃO	43
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros tiveram grande importância em soluções cotidianas para o ser humano. Com a demanda de bens de consumo aumentando, os polímeros se mostraram os materiais mais versáteis para estas aplicações. Sua fácil produção, utilidade e baixo custo atrelada a nova gama de utilizações despertam o interesse por este material (HAMAD; KASEEM; DERI, 2013).

Estes produtos passaram a ser produzidos em larga escala, promovendo uma revolução nos produtos de utilização simples, principalmente nos setores de embalagens. Porém, os polímeros, em sua maioria, foram principalmente utilizados em produtos com ciclo de vida curto e rápido descarte. Este aumento no consumo de polímeros aliado a um tempo de degradação prolongado acarreta um grande acúmulo de resíduos. Este acúmulo tem reflexo no percentual de plásticos nos resíduos sólidos de municípios, um crescimento de 1% para mais de 10% em volume entre o período de 1960 a 2005 (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

O Brasil está entre os países que mais tem representatividade na produção de resíduos plásticos no mundo, situado na quarta colocação, atrás apenas de Estados Unidos, China e Índia. O montante da produção de resíduos foi superior a 11 milhões de toneladas até 2015, equivalente a um quilograma de lixo plástico por habitante a cada semana. Mesmo com toda essa expressividade na produção de resíduos poliméricos no Brasil tem menos de 2% é efetivamente reciclado, abaixo da média mundial, que recicla cerca de 9% de todo o rejeito polimérico produzido e consumido. Esta quantidade de resíduos impacta diretamente a vida na terra, como a qualidade da água, solo e ar (WWF, 2018).

Observado este cenário, métodos para a aplicação de reciclagem de polímeros devem ser mais difundidas, facilitando a sua aplicação, principalmente economicamente. Tendo em vista esse objetivo, há quatro tipos de processos de reciclagem, sendo eles: primário, secundário, terciário e quaternário. Sendo que os termofixos tem muitas ligações cruzadas, isso significa que após a sua primeira polimerização é complicada a reutilização do polímero em sua própria fabricação. Por isso, há mais viabilidade na utilização em processo de reciclagem secundário, terciário e quaternário (SINGH *et al.*, 2017).

Tendo em vista os processos de reciclagem possíveis e a necessidade socioambiental de ampliar a reciclagem de materiais poliméricos em âmbito mundial, torna necessária a compreensão e exposição dos métodos de reciclagem dos polímeros. Entender como incorporar no meio econômico e quais os produtos podem ser obtidos a partir de seu reprocessamento. A compreensão dos temas possibilita a aplicação destes métodos que poderão agregar a toda uma

cadeia produtiva de reciclagem, estimulando a indústria de reciclagem e tendo um impacto positivo no cenário econômico e socioambiental.

A fim de estudar o tema e traçar um planejamento para realização do trabalho, foi realizado um estudo de caso embasado nas metodologias apresentadas nas obras de Yin (2005) e Chizotti (2003). A metodologia consiste em um processo com cinco etapas para a execução do trabalho: planejamento, design, coleta, análise e compartilhamento.

Considerando o cenário de resíduos de polímeros e a fim de determinar os objetivos e resultados, a delimitação do trabalho foi focada exclusivamente na reciclagem de poliuretano, mapeando e correlacionando o meio acadêmico de pesquisas e o meio industrial das aplicações empregadas no mercado.

A partir da metodologia pré-definida de estudo de caso, foi desenhado um questionário aplicável tanto ao meio acadêmico quanto ao industrial, a fim de explorar os dois meios e entender como a reciclagem de poliuretano é estudada e aplicada em cada um dos cenários.

Por fim, após a aquisição, tratamento e análise dos dados, os resultados foram apresentados corroborando com os objetivos definidos para este trabalho. Apresentando os métodos aplicados na reciclagem de poliuretano e os produtos obtidos, além de contribuir com o cenário de reciclagem brasileira e incentivar a utilização de novas possibilidades de aplicações e estudos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Estudar e analisar o panorama de reciclagem de poliuretanos no ambiente acadêmico e industrial por meio de um mapeamento.

2.2 Objetivos Específicos

- Análise de trabalhos acadêmicos, explorando o ambiente de poliuretano no Brasil e no mundo.
- Executar uma pesquisa de campo por meio de contatos e entrevistas com empresas que realizar reciclagem de poliuretano no Brasil.
- Realizar uma comparação entre os resultados encontrados pelas pesquisas acadêmicas e o meio industrial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Polímeros

Polímeros são definidos por uma estrutura química constituída de unidades que se repetem milhares de vezes, estas unidades são denominadas meros. A síntese de polímeros é feita a partir de monômeros, que quando unidos geram um macromoléculas a partir de reações de polimerização. Esses materiais podem ser classificados em 3 tipos básicos: naturais, semissintéticos e sintéticos. Os polímeros naturais são encontrados na natureza e estão presentes desde os primórdios da terra, quando as primeiras moléculas orgânicas surgiram. Exemplos encontrados são os carboidratos, proteínas e DNA, moléculas primordiais para a vida. No contexto da engenharia, a utilização destes materiais é feita a milênios na confecção de fibras para roupas, resinas como selantes e graxas (EBDON, 1992).

Com o passar do tempo e o desenvolvimento do ser humano, houve o desenvolvimento da ciência dos materiais, assim polímeros semissintéticos puderam se tornar viáveis. Sua síntese é a partir de matérias-primas naturais, que aprimoradas com elementos sintéticos, obtinham propriedades melhores comparadas aos polímeros naturais. Um exemplo desta classe é a borracha natural obtida da vulcanização da seiva de vegetais, principalmente da seringueira (CANEVAROLO, 2010).

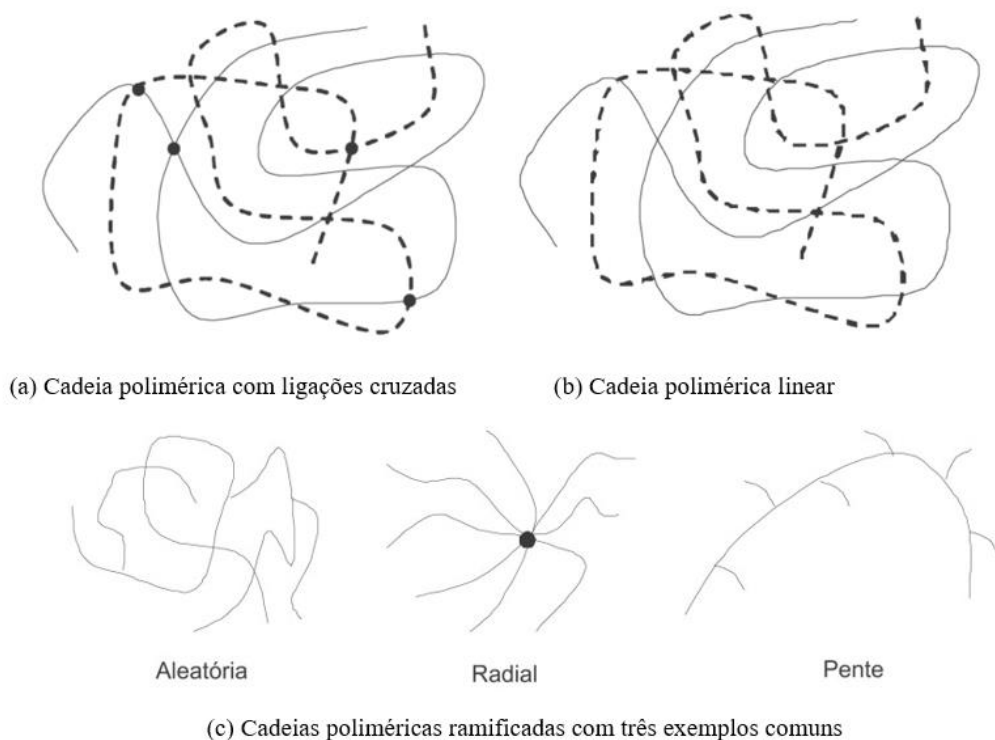
O desenvolvimento da classe de polímeros sintéticos teve o ponto de partida a descoberta da baquelite. No século XX houve uma ampliação na utilização desses materiais, principalmente por conta da descoberta de novos polímeros e o desenvolvimento da produção de matérias-primas derivadas do petróleo, que facilita a síntese de novo polímeros. Há infinitos exemplos desta classe, mas se destacam os seguintes: Polietileno, Polipropileno, Poliuretano entre outros diversos tipos. Com o desenvolvimento de novos tipos de polímeros surgiu a necessidade de separá-los em classes específicas, que os classificam por suas diferentes propriedades físicas e químicas e características das suas estruturas moleculares. São elas: termoplásticos, termofixos e elastômeros (EBDON, 1992).

Polímeros termoplásticos podem ser definidos como macromoléculas que quando aquecido pode ser moldado e quando resfriado enrijece. Quando feita a reciclagem, termoplásticos apresenta algumas facilidades, pois com um reaquecimento da cadeia polimérica o material pode ser remoldado em um novo formato. Mesmo sabendo que há perdas nas propriedades mecânicas do material, como redução da massa molar, degradação da cadeia carbônica. Em contrapartida, termofixos e elastômeros não tem essa facilidade. Essas classes

são definidas por cadeias poliméricas ligadas entre si, estas ligações são por forças primárias covalentes fortes. Por este motivo, o deslizamento da cadeia quando aquecida não ocorre como nos termoplásticos. Mediante a quantidade de ligações cruzadas por unidade de volume, pode-se classificar em polímeros com baixa densidade de ligações cruzadas (elastômeros) ou polímeros com alta densidade de ligações cruzadas (termofixos). Pelo fato de elastômeros e termofixos terem ligações cruzadas, torna-se difícil o reprocessamento por fusão (CALLISTER, 2007; CANEVAROLO, 2010).

Os tipos de cadeias dos polímeros podem ser apresentados em várias formas, sendo as principais mostradas na Figura 1. Polímeros de cadeias lineares são constituídos por apenas uma cadeia principal formada por monômeros bifuncionais. Termoplásticos apresentam esse tipo de cadeia. Polímeros de cadeias ramificadas apresentam uma cadeia principal de onde partem prolongamentos que podem ser grandes ou curtos. Estes prolongamentos podem ter diversas arquiteturas, como aleatória, radial e pente. Termoplásticos também apresentam esse tipo de cadeia. Por último, polímeros que apresentam ligações cruzadas em sua cadeia entre si por forças primárias fortes. Elastômeros e termofixos apresentam essa estrutura (CANEVAROLO, 2010).

Figura 1 – Representação dos tipos de cadeias poliméricas



Fonte: CANEVAROLO, 2010, p. 43 e 44.

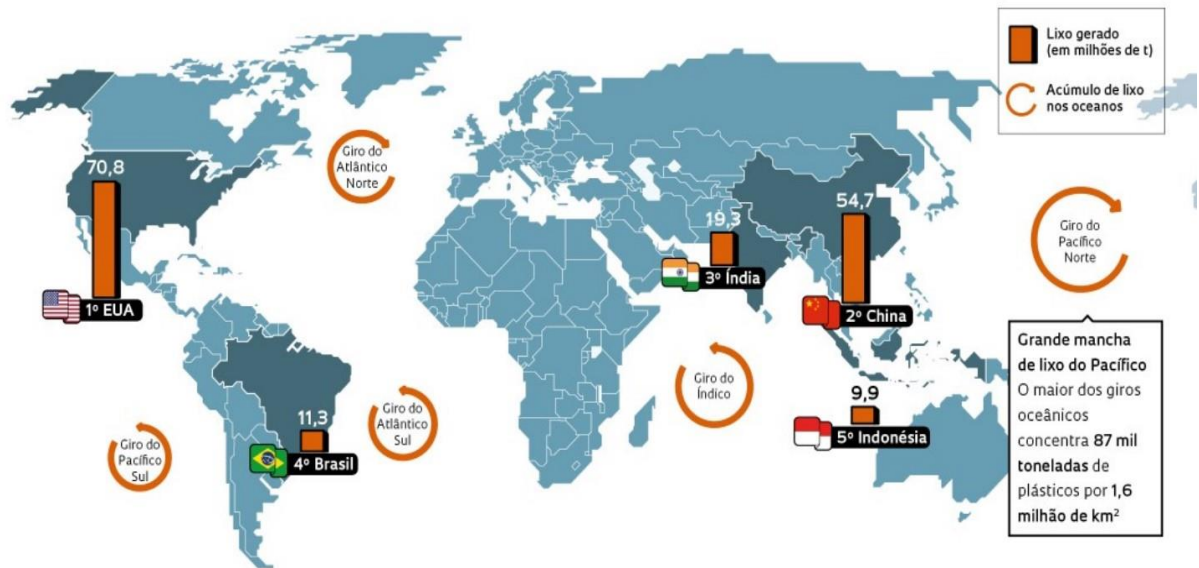
3.2 Panorama da reciclagem de polímeros

Com o desenvolvimento da humanidade e o aumento da população aliada a necessidade dos novos padrões de consumo, como soluções mais simples e práticas para o cotidiano das pessoas, os polímeros se tornaram importantes, uma vez que possibilitou a produção de objetos de uso cotidiano. As vantagens da utilização de polímeros são inúmeras, mas se destacam a facilidade de produzir produtos simples a preços baixos e a possibilidade de descarte prático e rápido. Assim esses materiais tornaram-se um substituto de outros em diversas aplicações, resultando em um excesso de plásticos residual. Neste momento torna-se necessário o interesse por estudo na reciclagem e reutilização desses insumos (HAMAD; KASEEM; DERI, 2013).

Dados apresentados da World Wide Fund for Nature Brasil (WWF-Brasil, 2019), a produção anual de plásticos no Brasil é de aproximadamente 11,3 milhões de toneladas, tornando o país no quarto maior gerador de lixo plástico no mundo, em primeiro lugar vem os Estados Unidos, seguido de China e Índia. Os quatro países juntos são responsáveis por cerca de 160 milhões de toneladas produzidas, como é mostrado na Figura 2. Mesmo com a alta produção de resíduo no Brasil, apenas 145 mil toneladas foram recicladas, isso um pouco acima de 1% do material efetivamente reciclado.

Neste panorama, em todo o planeta, é estimado que são jogados nos oceanos anualmente cerca de 10 milhões de toneladas de materiais poliméricos. A poluição causada por esses resíduos sem reaproveitamento causa vários problemas ambientais, que podem afetar diretamente a vida dos seres humanos e vida animal. A qualidade do ar é afetada por meio da contaminação inerente do processo produtivo e da queima de resíduos, além da liberação de micro e nanoplásticos que causam a contaminação do solo e de sistemas de fornecimento de água (WWF-Brasil, 2019).

Figura 2 – Mapa do lixo plástico no mundo

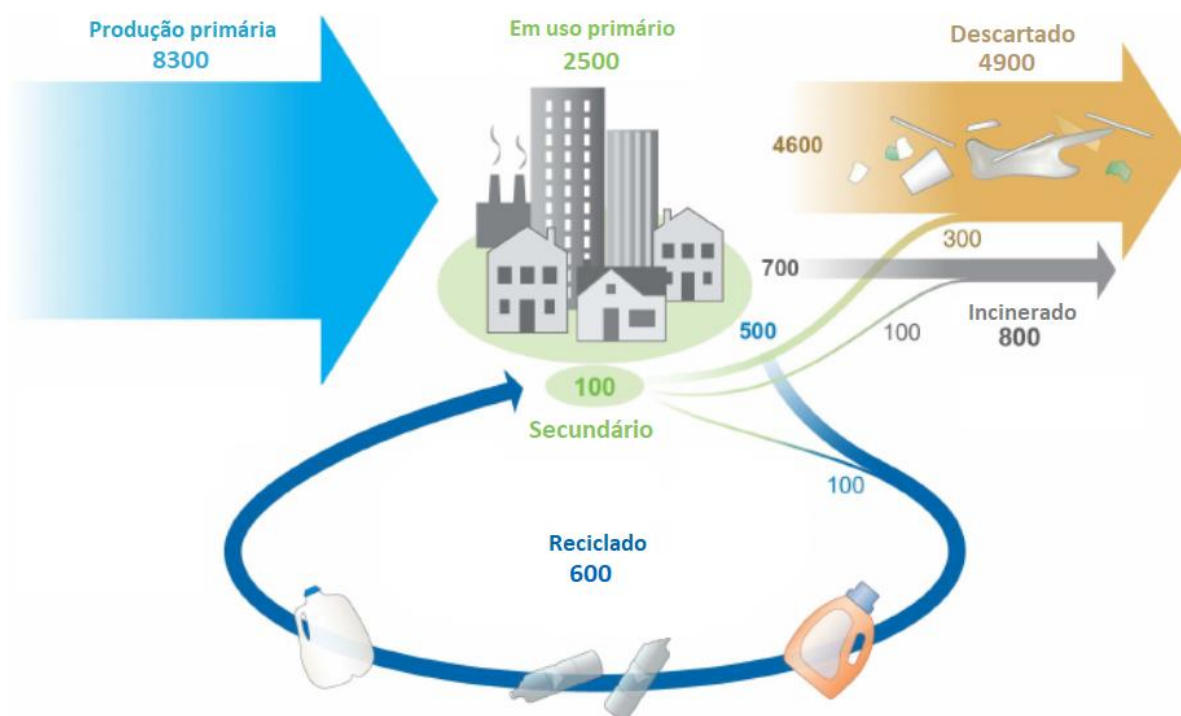


Fonte: WWF-Brasil, 2019

Durante todo o período da produção de plásticos, com início na década de 1950 até o ano de 2015, foram produzidos mais de 8 bilhões de toneladas de plástico, e mais de 100 milhões de toneladas foram descartadas nos oceanos do planeta. A produção de produtos feitos de polímeros aumentou em mais de 290 milhões de toneladas anuais, este acréscimo representa um aumento de 20 vezes nas produções anuais em um período de 50 anos. Vale considerar que 1/4 de toda a fabricação de produtos plásticos são para atender o consumo de embalagens plásticas, isso é preocupante levando em conta que o reaproveitamento é extremamente baixo comparado a outros materiais como metais e vidros (ERIKSEN *et al.*, 2014; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

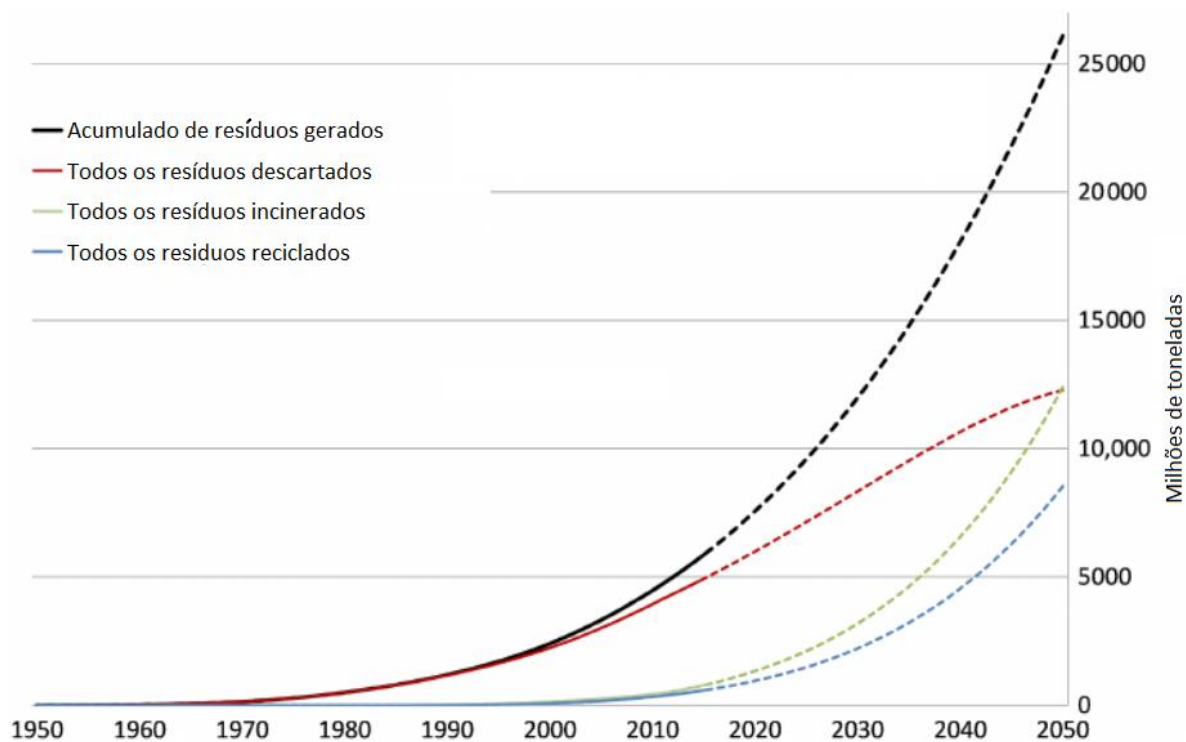
Levando em conta este cenário e mostrando os caminhos de destinação dos resíduos poliméricos, há um desequilíbrio bem explícito entre descarte, incineração e reciclagem. É evidenciado que aproximadamente 55% de todo o plástico produzido é descartado sem qualquer tipo de tratamento, reaproveitamento ou pirólise, tudo isso representa um montante de 4,6 bilhões de toneladas de resíduos descartados de maneira inapropriada. Estes valores chamam a atenção comparados aos valores de 600 milhões de toneladas que passam efetivamente pelo processo de reciclagem e retornam à utilização como é mostrado na Figura 3. Neste cenário desafiador com percentuais de reciclagem tão baixos, é estimado que seja reciclado 9 bilhões de toneladas de um montante total de 26 bilhões em uma projeção para 2050, desta forma ainda será destinado de maneira inadequada 12 bilhões de toneladas de rejeitos poliméricos no meio ambiente. A Figura 4 mostra a projeção destes impactos (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Figura 3 - Produção global, uso e destino de resinas, fibras e aditivos poliméricos (1950 a 2015 em milhões de toneladas)



Fonte: Adaptado de GEYER; JAMBECK; LAW, 2017

Figura 4 - Projeção e destinação acumulada de resíduos plásticos no mundo

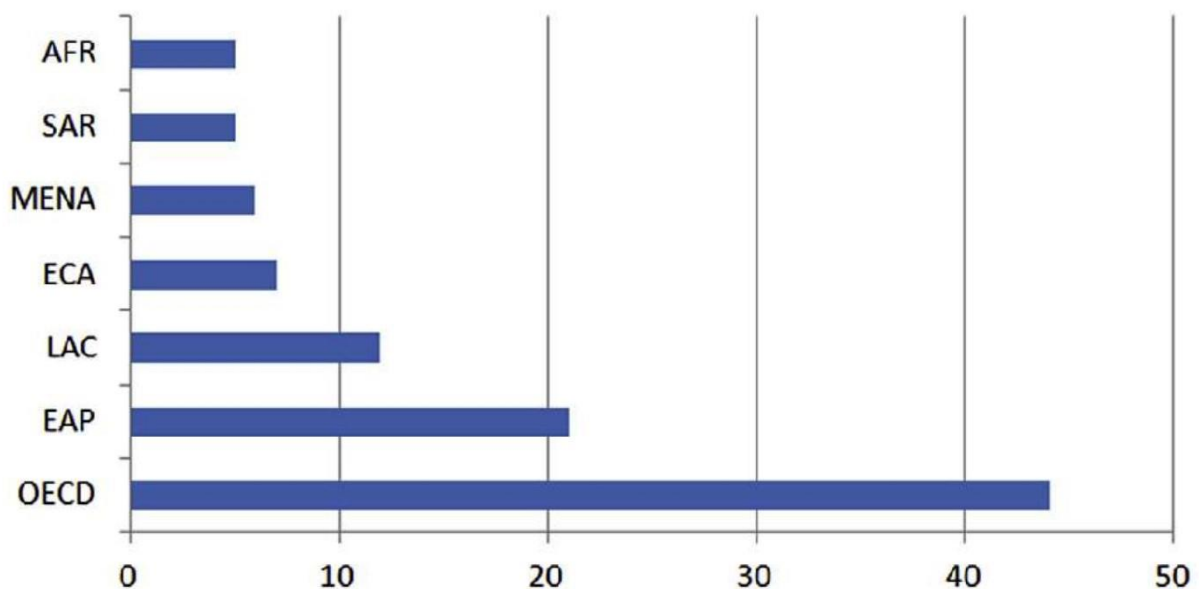


Fonte: Adaptado de GEYER; JAMBECK; LAW, 2017

Um panorama apresentado na Figura 5 traz a geração de resíduos poliméricos por região no planeta. A região do leste asiático e países do pacífico (EAP) são os que mais geram resíduos plásticos no mundo. Logo depois vem a região da América Latina e Caribe (LAC) onde o Brasil se encontra, região com a segunda maior geração de resíduos. A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) engloba 34 países situados em todas as regiões com o objetivo

de estimular o progresso econômico e trocas comerciais, pois isso justifica o grupo com maior geração de resíduos (SINGH *et al.*, 2017).

Figura 5 – Estatísticas da geração de resíduos de polímeros na África (AFR), sul asiático (SAR), meio leste e norte africano (MENA), leste e centro asiático (ECA), LAC, EAP e OCDE



Fonte: SINGH *et al.*, 2017

3.3 Poliuretanos

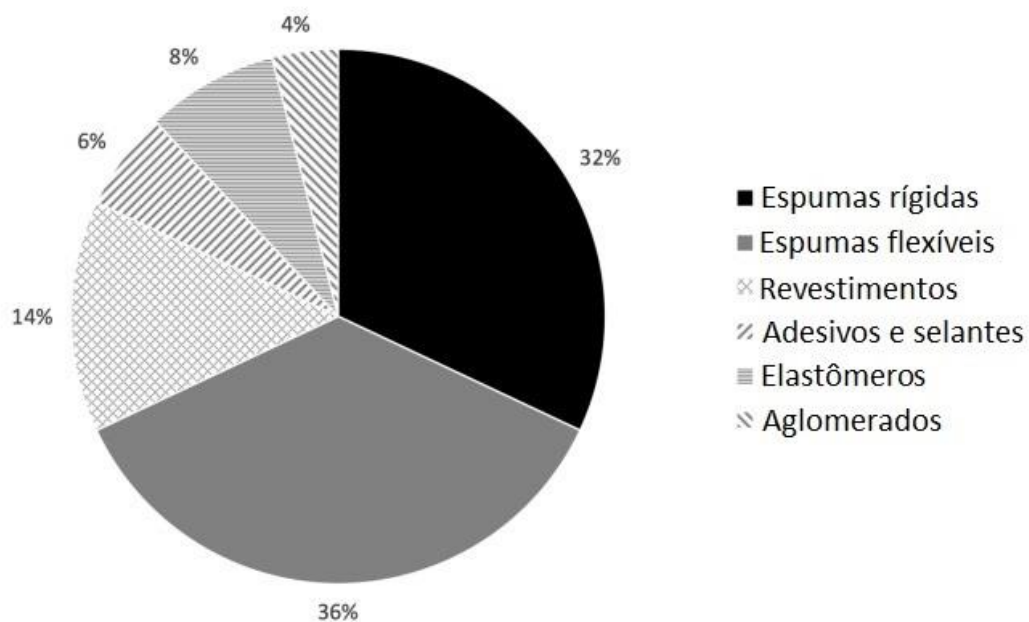
Em 1849, Wutz divulgou como era feito em laboratório uma substância denominada Uretano, esta substância era o produto de reação química entre um grupo isocianato e outra substância com o grupo hidroxila. Mas apenas na década de 50 Otto Bayer desenvolveu a fórmula exata para a produção de poliuretanos (VILAR, 1999).

A polimerização dos uretanos ocorre quando se reage uma substância, com dois ou mais isocianatos, com um álcool poli funcional. Ao ocorrer a reação entre o diisocianato com o poliálcool formará uma ligação uretana, característica do poliuretano (VILAR, 1999).

Os poliuretanos representam quase 8% dos plásticos produzidos no mundo, está na posição de 6º polímero mais utilizado no mundo. Podem ser termoplásticos e termofixos, isso depende da forma que sua cadeia polimérica é sintetizada. Os PUs são classificados, normalmente, em dois grupos: espumas e outro grupo denominado CASEs (*Coatings, Adhesives, Sealants, Elastomers*). Este grupo contempla revestimentos, adesivos, selantes e elastômeros. Além disso, há dois tipos de espumas: as flexíveis, normalmente aplicada em colchões, cadeira e acentos para automóveis; e espumas rígidas, normalmente aplicadas como isolantes térmicos e acústicos. (MAGNIN *et al.*, 2019).

Na figura 6 é possível observar a distribuição da participação do de mercado de diferentes tipos de produtos de poliuretano. É notável que a maior participação fica com as espumas, tanto rígida (32%) quanto flexível (36%), seguidos pelos CASEs. Este levantamento de dados foi feito nas regiões europeia, oriente médio e África, e o total de poliuretano produzido nesta região foi de 6,47 milhões de toneladas (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

Figura 6 – Participação de mercado de diferentes tipos de produtos de poliuretano



Fonte: adaptado de KEMONA; PIOTROWSKA, 2020

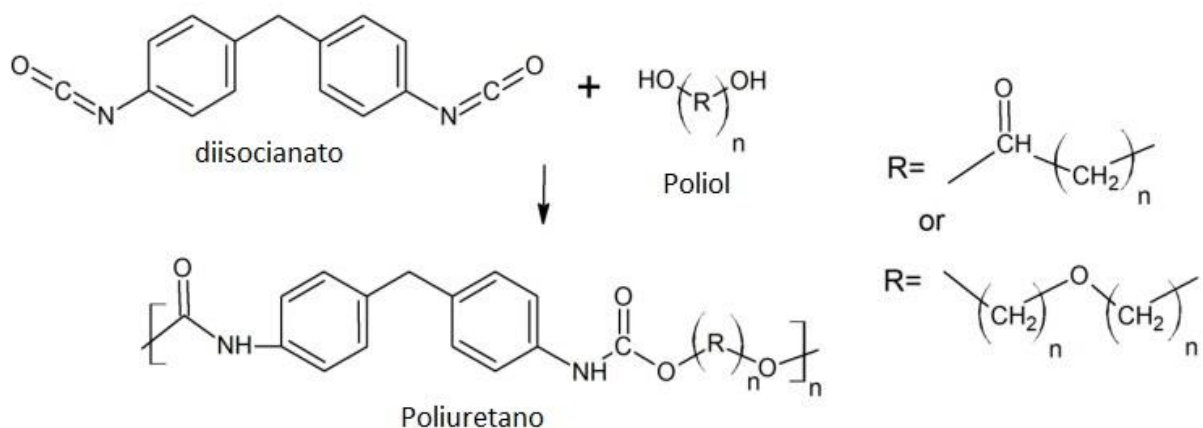
Os PUs não são constituídos de monômeros idênticos e repetíveis, isso traz versatilidade ao material, como aplicações que necessitam de resistência a abrasão ou quando é aplicado como uma espuma. Sua suscetibilidade a modificações permite que elas substituam diversos materiais anteriormente utilizados, tanto de origem sintética quando origem natural. Às vezes,

o PU obtido tem características mecânicas significativamente melhores quando comparada a Espuma de PVC, alta resistência a solventes como a água, óleos, solventes orgânicos, propriedades adesivas ou elétricas aprimoradas (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

As matérias-primas mais comumente utilizadas para a síntese de poliuretanos são os poli isocianatos, diisocianato de metileno ou diisocianato de tolueno e polióis, como é mostrado na Figura 7. As propriedades dos poliuretanos dependem das propriedades dos polióis que variam dependendo do número de grupos hidroxila, da massa molar e da parentagem de grupos derivados do óxido de etileno (matéria-prima para os polióis). Essa diversificação dos substratos gera muitos tipos de materiais com ampla diversidade de propriedades (AUSTIN; HICKS, 2017)

Essa versatilidade se deve pelos diferentes seguimentos serem conectados por várias ligações químicas, sua unidade mais importante é a ligação uretano, que é formada pela reação de um grupo isocianato com um grupo hidroxila dos polióis. Há também a diferenciação de poliuretanos termoplásticos (TPU) e poliuretanos termorrígidos. Onde o primeiro apresenta uma cadeia polimérica não reticulada e o segundo apresenta uma estrutura altamente reticulada (MACHADO, 2018; KEMONA; PIOTROWSKA, 2020)

Figura 7 – Exemplo de reação de síntese de poliuretano



Fonte: Adaptado de KEMONA; PIOTROWSKA, 2020

Um das características mais importantes do poliuretano é a presença de segmentos rígidos (isocianatos) e flexíveis (poliol) de maneira alternada. Isso permite a utilização deste material como elementos elásticos de colchões, revestimento duradouros e materiais de construção leves e duráveis (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

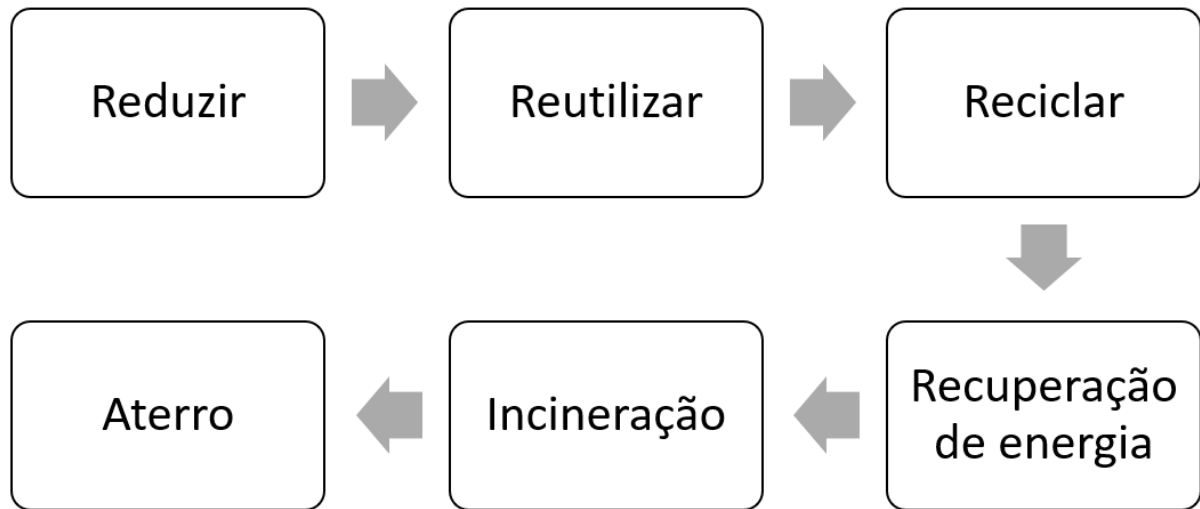
3.4 Gerenciamento de resíduos de poliuretano

Os materiais poliméricos apresentam características físicas, térmicas, elétricas e químicas que propiciam a substituição de produtos antes feitos por materiais metálicos e cerâmicos. Desta forma, com a produção acelerada de polímeros, diversos estudos foram realizados para encontrar um meio entre viabilidade econômica, ganhos ambientais e sociais (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

Apesar do cenário propenso a utilização de materiais reciclados, muitas empresas temem a rejeição dos materiais pós-processados se inseridos no mercado. Mas esse cenário pode ser revertido na intenção de aumentar a utilização desses produtos. No Brasil, por exemplo, cerca de 15% de todo o plástico em forma de filme ou rígido produzidos são reciclados e retornam ao processo produtivo, sendo que 60% são provenientes de processos industriais e 40% são polímeros pós-consumo. E para que o processo de reciclagem seja viável para as empresas, o procedimento deve ser igual ou menor que o preço para a produção do material virgem, somando gastos energéticos para descartá-lo. Sendo assim, para a maior parte das indústrias a questão ambiental não é considerada como fator relevante. Por isso torna importante os estudos de novas técnicas (ÁVILA; DUARTE, 2003).

As várias aplicações e sucesso comercial do poliuretano promove uma crescente quantidade de resíduos deste material sendo produzido a cada ano. Esses resíduos são compreendidos em produtos de fim de vida, pós-consumo e refugos de fabricação industrial. Os refugos são o resultado de imperfeições dos métodos de produção e processamento e pode compor até 10% dos PUs produzidos. Por outro lado, resíduos de pós consumo e produtos em fim de vida são um problema maior, pois geralmente estão contaminados ou deformados, assim são menos utilizados (Simón *et al.*, 2018).

Como base para a diretiva do parlamento Europeu para gerenciamento de resíduos, a "Escala de Lansink" determina uma hierarquia de métodos para tratamento de resíduos. Ela contribui para o foco dos esforços em processos de tratamentos de resíduos, e caso haja necessidade, pode-se omitir alguma das etapas. Na figura 8 é possível observar a escala de Lansink e os métodos, segundo a hierarquia (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

Figura 8 – Escala de Lansink

Fonte: Adaptado de KEMONA; PIOTROWSKA, 2020

No Brasil é aplicado o 3R (Reduzir, Reutilizar e Reciclar), uma versão simplificada da Escala de Lansink. O 3R é tratado na Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010) e trouxe uma série de inovações para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos ao país. Reduzir se refere a primeira etapa da cadeia, tomar medidas que reduzem a utilização de produtos descartáveis, os substituindo por retornáveis com vida útil mais longa. Essas atitudes são efetivas pois impactam diretamente na redução do gasto energético da produção da matéria prima. A reutilização cria utilidades para produtos sem necessidade de um reprocessamento, criar utilidades para produtos que seriam descartados e foram utilizados. Já a Reciclagem é o processamento de materiais que seriam descartados e se tornam novos produtos ou matéria-prima para diferentes produtos. O Brasil tem um grande potencial econômico que ainda não foi explorado, podendo ter um retorno de R\$ 4,6 bilhões se utilizasse de toda sua capacidade de reciclagem (CALDERONI, 1996).

3.4.1 Reciclagem mecânica

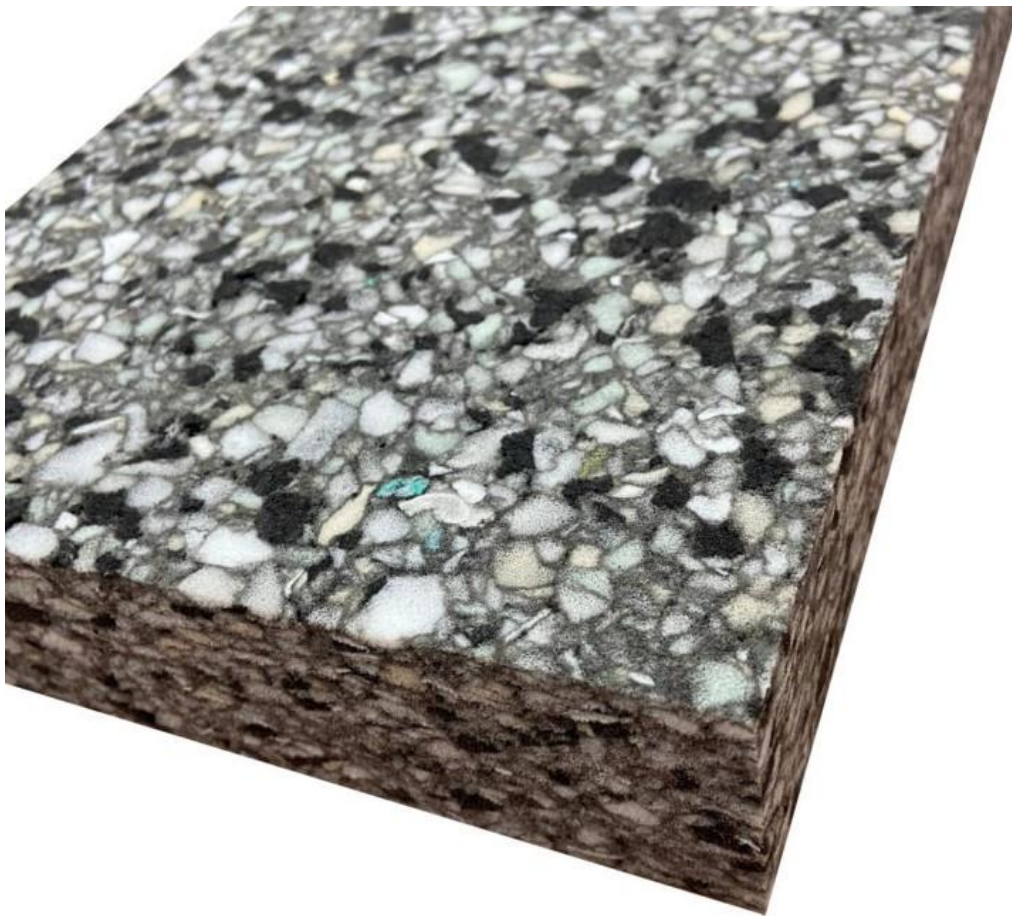
A maneira mais fácil e básica de se reciclar PU é pelo processamento mecânico. Este método muda o resíduo sólido para forma de flocos, grânulos ou pó. Estes produtos podem ser utilizados como enchimento de almofadas ou servir como substratos para um processo posterior (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

Para a obtenção de pós finos de poliuretano, com dimensional entre 100 a 150 micrometro é utilizado moinho de bolas. Esse tipo de produto é normalmente utilizado como carga em

matrizes termoplásticas. Já para a obtenção de fragmentos de espuma é utilizada facas giratórias que cortam o material até o tamanho desejado. Neste caso o material pode ser usado para fazer aglomerados que são distinguidos em dois processos, com utilização de adesivos e sem utilização de adesivos (YANG *et al.*, 2012).

O processamento mecânico com adesivos consiste em conectar fragmentos de espuma de poliuretano com adesivos, assim compõem um produto de poliuretano composto, como pode ser visto na figura 9. Como vantagem temos a facilidade de controle do processo e aglomerados. Por outro lado, há o processo sem adesivos. Este é feito a partir da compactação dos fragmentos de espuma a alta temperatura (180°C) e formam peças rígidas. As desvantagens destes processos são as propriedades mecânicas herdadas do material primário, que muitas vezes são difíceis as caracterizações quando vindo de resíduo pós-processado. Entretanto há um grande mercado para os produtos feitos por estes processos, o que os torna viáveis economicamente. (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

Figura 9 - Aglomerado de espuma de poliuretano



Fonte: SELOSPORT, 2020

O poliuretano reprocessado também é utilizado como carga, normalmente na presença de termoplásticos. A moldagem por compressão a quente é um dos processos que não requer ligantes. A matriz de poliestireno junto da carga, partículas de espuma rígida de poliuretano, é comprimido sob alta pressão e temperaturas, 180 °C e 350 bar. Essa tecnologia é utilizada para gerar peças acabadas, rígidas e prontas para utilização. É comum serem empregadas na indústria automobilística, e quando moldadas com reforços de fibra de vidro, pode ser utilizada como painéis de portas. O preenchimento da moldagem a quente com poliuretano, comparado a cargas minerais, em diversas resinas, apresentam maior flexibilidade e resistência ao impacto. Podem ser aplicados, também, em moldagem por injeção e reação (HULME; GOODHEAD, 2003)

3.4.2 Reciclagem química

A reciclagem química, também chamada de reciclagem terciária, é um tipo de reprocessamento de polímeros, que leva à quebra de cadeia poliméricas em moléculas menores por meio de processos químicos. Os poliuretanos, por meio de hidrólise, glicólise, aminólise, gaseificação entre outros, tem a possibilidade de reverter a polimerização que permite a recuperação de monômeros que podem ser utilizados para obtenção de novos produtos. Em comparação com a reciclagem mecânica, a reciclagem química, possui um custo maior, principalmente por necessitar de altas temperaturas, porém permite a utilização do produto em diversos processos não relacionados ao poliuretano, podendo-o tornar interessante em alguns mercados (KEMONA; PIOTROWSKA, 2020).

Na Tabela 1 é mostrado todos os métodos químicos de reciclagem de poliuretano, e apenas a glicólise e a gaseificação foram implementadas em larga escala. Além disso, a glicólise é o único método que recupera a matéria-prima para sintetização de novos poliuretanos. EOL (*End of life*) significa Fim de vida.

Tabela 1 – Comparação de métodos de reciclagem química de poliuretano.

Tratamento	Entrada	Saida	Aplicação em grande escala
Hidrólise	Resíduos de produção de produtos EOL	poliois, intermediários de amina	Não
Hidroglicólise	Produtos EOL, Subprodutos de produção	polióis	Não
Aminólise	Apenas espumas	aminas e alcoois bi ou polifuncionais	Não
Fosforólise	Subprodutos de produção	oliguretanos contendo fosforo	Não
Glicólise	Somente espumas, segregadas entre rígidas e flexíveis	polióis	Sim
Gaseificação	Produtos EOL, Subprodutos de produção	gás de síntese	Sim
Pirólise	Produtos EOL, Subprodutos de produção	petróleo, gás, cinzas	Não
Hidrogenação	Produtos EOL, Subprodutos de produção	gás, óleo	Não

Fonte: Adaptado de KEMONA; PIOTROWSKA, 2020

A gaseificação é uma reação exotérmica e pode ser feita por dois processos, com leito fixo ou fluxo ascendente. Este método tem como suas maiores vantagens o aceite de matérias primas sem ter feito uma seleção prévia, facilitando a utilização de materiais pós-consumo. Ela consiste no aumento de temperatura de forma controlada assim acarretando a quebra das moléculas do polímero. O produto desse processo são gases que podem ser utilizados para obtenção de energia, ou quando separados gases para síntese para novos materiais. O contraponto deste processo são os subprodutos, normalmente são gerados cianeto de hidrogênio e dióxidos de nitrogênio. Estes compostos são tóxicos e exigem um meio de controle para não causar danos a meio ambiente e pessoas ligadas ao processo (KINTO *et al.*, 2002).

Até o momento, a glicólise é o método de reciclagem química mais utilizado para poliuretanos rígidos e flexíveis. O processo consiste em uma reação de transesterificação na ligação uretana assim acarretando a degradação do polímero. Este processo tem como produtos polióis e aminas que podem ser utilizados novamente em uma síntese de poliuretano. As desvantagens se devem a necessidade de separação do resíduo para o processo, devem ser separadas as espumas rígidas das espumas flexíveis. Outra preocupação é com as impurezas que atrapalham a reação, por este motivo a utilização de resíduos industriais é a melhor alternativa para este processo (LOPES; BEKER, 2012; SIMÓN, 2015).

3.4.3 Recuperação energética

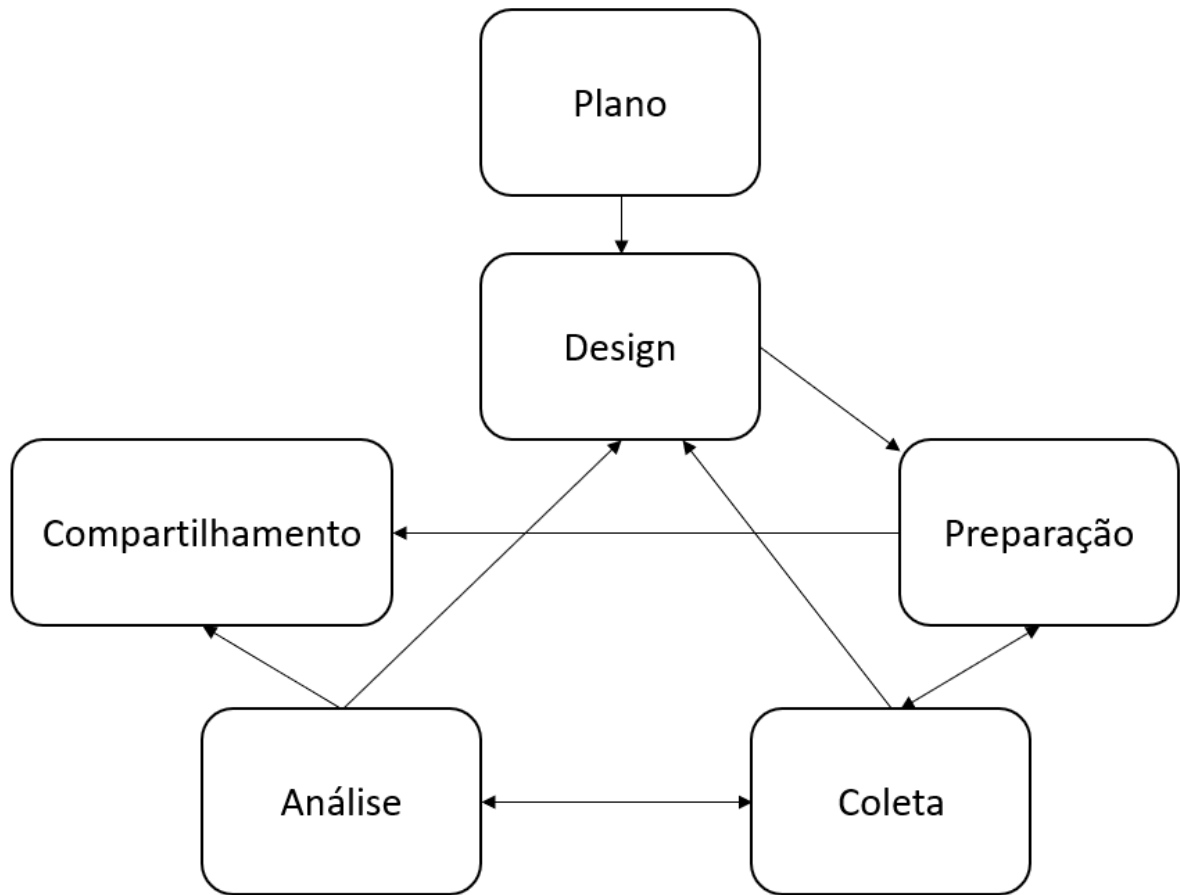
A recuperação energética é aplicada em último caso, pois tem um ganho energético menor comparado aos demais, além de não recuperar matéria-prima. A vantagem desse processo é a possibilidade de aplicação em poliuretanos contaminados, espumas com freon, compostos ligados a madeira, couro ou tecido. Além da redução de 99% do volume de resíduos depositados em aterros, quando o material é incinerado. Mas este método vem perdendo espaço, especialmente porque cada vez mais espumas de poliuretano apresentam retardantes de chama, aplicados para aumentar a segurança. Esses aditivos dificultam ou impossibilitam a recuperação energética desses materiais. Outro ponto é que PU, quando em altas temperaturas, pode liberar substâncias tóxicas e cancerígenas. Os poliuretanos apresentam uma toxicidade muito maior durante a degradação térmica em condições aeróbicas. Uma alternativa é a pirólise, que pode manter níveis controlados de toxicidade até o limite de 550 °C (YANG et al, 2012).

3.5 Estudo de caso

Estudo de caso é uma metodologia de pesquisa que tem a intenção de entender e interpretar paradigmas observados no campo de estudo, a fim de investigar um fenômeno a partir de coleta de dados retirado de um meio específico, assim podendo compará-los em diversos meios, verificando se o resultado garante um embasamento ou não para uma determinada conclusão para um tal cenário (CHIZZOTTI, 2003).

A metodologia de estudo de caso pode ser demonstrada a partir de um fluxograma simples, como mostra a Figura 10. A partir de um plano pode-se modelar um design e a preparação do trabalho, a coleta de dados e o compartilhamento, e assim a análise. Caso necessário pode ser remodelada cada etapa afim de aprimorar o compartilhamento (YIN, 2005).

Figura 10 – Etapas da realização do estudo de caso



Fonte: Adaptado de YIN, 2005

4 METODOLOGIA

A partir do embasamento teórico e os objetivos propostos, foram definidas as etapas seguidas neste trabalho, mostradas abaixo:

- Planejamento: formulado pelo mapeamento de literaturas e definição dos objetivos;
- Design, determina o planejamento dos casos e definição dos meios de coleta;
- Coleta e registro de dados;
- Análise, tratando os dados com base nos objetivos e elaboração de narrativas;
- Compartilhamento dos resultados encontrados e conclusões.

4.1 Planejamento

A fim de aprofundar no tema proposto pelo trabalho, foi feito um mapeamento do cenário de reciclagem de polímeros, com foco em poliuretanos, no Brasil e no mundo. Com intuito de compreender as características e propriedades dos materiais e a disposição deles na cadeia produtiva, foi feita uma revisão bibliográfica, presente neste trabalho, a partir de artigos, revistas, livros, monografias e reportagens. Quando feita, foi levantado questionamentos a respeito do tema e cenário da reciclagem de poliuretanos no Brasil. Além da interação com meio acadêmico com o mercado.

A partir disso, é apresentado os questionamentos levantados acerca do tema:

- Qual o tipo de processo de reciclagem utilizado?
- Qual a procedência do material e quais processos de separação e coleta utilizados?
- Quais são os produtos obtidos?

A partir dessas questões levantadas, foram traçados os objetivos do estudo, além de compreender melhor os cenários estudados.

4.2 Design

Determinada as questões apresentadas no planejamento e os vieses encontrados pela revisão bibliográfica. Foram determinados dois meios a serem pesquisados: o acadêmico, referenciado em artigos, materiais e livros; e o industrial, referenciado em contatos feitos

diretamente com empresas do setor. As pesquisas desenvolvidas foram feitas com o intuito de atender os objetivos e responder os questionamentos levantados no planejamento.

Para os meios de coleta para o meio acadêmico, foram utilizadas duas fontes de pesquisa: Periódicos Capes; Google Scholar;

Para os meios de coleta para o meio industrial, foram feitos contatos com empresas do setor de reciclagem de polímeros com foco em reciclagem de poliuretano. Para encontrar essas empresas foi utilizada a plataforma de pesquisa Google e realizadas pesquisas a partir de títulos específicos ligado ao ramo de reciclagem de poliuretano.

A partir dos dados coletados, foram realizadas análises comparativas dentro de cada meio e, posteriormente, entre os meios. Para auxiliar nas análises foram feitos gráficos e tabelas. A partir das observações durante a análise foram dispostos os resultados que possibilitaram a elaboração da conclusão.

4.3 Coleta de dados

4.3.1 Meio acadêmico

Para realizar a coleta de dados do meio acadêmico, levando em conta os temas abordados nesse trabalho foi traçada uma estratégia. Foram utilizados dois tipos de ferramentas de busca, Periódicos Capes, Google Scholar. Por meio de palavras-chave e parâmetros de pesquisa, foi possível direcionar as buscas e torná-las mais assertivas sobre o tema proposto.

As palavras-chave foram escolhidas seguindo o tema, foram utilizadas no idioma português e inglês. Essas foram, “reciclagem de poliuretano”(polyurethane recycling), “poliuretano reciclado”(recycled polyurethane), “resíduos de poliuretano” (polyurethane waste), “reaproveitamento de poliuretano” (reuse of polyurethane). A fim de ilustrar o que está sendo mais estudado no meio acadêmico contemporâneo foi delimitado o tempo de pesquisa entre 2015 e 2022. A busca foi feita em âmbito nacional e internacional.

4.3.2 Meio Industrial

Para realizar a coleta de dados do meio industrial, foi utilizada a ferramenta de busca Google. Na intenção de encontrar empresas do ramo de reciclagem de polímeros com foco em reaproveitamento de poliuretano as palavras-chave utilizadas foram as seguintes: Empresas de reciclagem de poliuretano / PU, fabricantes de poliuretano / PU reciclado, fábrica de poliuretano

/ PU reciclado, reciclagem de poliuretano / PU indústria. A partir desta pesquisa foi feita uma seleção manual das empresas que se enquadravam com o tema, assim, realizado contato via telefone e/ou e-mail. No contato era explicado o tema e os objetivos do trabalho e realizado um breve questionário com as seguintes perguntas:

- Qual o tipo de processo de reciclagem utilizado?
- Qual a procedência do material e quais processos de separação e coleta utilizados?
- Quais são os produtos obtidos?

No final da coleta, foram obtidas respostas de 13 empresas coerentes com o tema apresentado.

4.4 Análise

Após a coleta, os dados foram tratados e analisados a fim de chegar em resultados referentes aos meios estudados. A análise consistiu na observação dos resultados dos meios separados e posteriormente uma análise comparativa entre eles, a fim de compreender as similaridades, diferenças e particularidades de cada cenário apresentado. Desta forma as conclusões puderam ser geradas de forma relativa aos meios e comparativa entre eles, a fim de compreender o tema abordado e alcançar os objetivos propostos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Coleta de dados

5.1.1 Meio acadêmico

Pesquisas realizadas nas ferramentas de busca, utilizando as palavras-chave e filtros, retornaram um número grande de resultados. A partir destes resultados, foram selecionados 30 trabalhos com maior relevância considerando os títulos, resumos das publicações e número de citações. Após essa primeira seleção, os trabalhos foram explorados mais profundamente a fim de compreender se o tema estava de acordo com o foco do presente trabalho. Sendo assim, foram selecionados 15 trabalhos que se enquadravam no tema proposto.

5.1.2 Meio industrial

Após o contato às empresas, foi apresentada a ideia do trabalho e feito o questionário. A partir do contato foi gerado os dados, que posteriormente, puderam ser analisados com auxílio de gráficos. Foram adquiridas respostas de 13 empresas.

5.2 Análise

5.2.1 Meio acadêmico

A partir da coleta, levando em conta os 15 trabalhos selecionados, foram iniciadas as análises. A Tabela 2 apresenta os dados de cada autor e ano de publicação referentes ao processo de reciclagem utilizado, tipo de resíduo utilizado, procedência do material utilizado e o produto obtido.

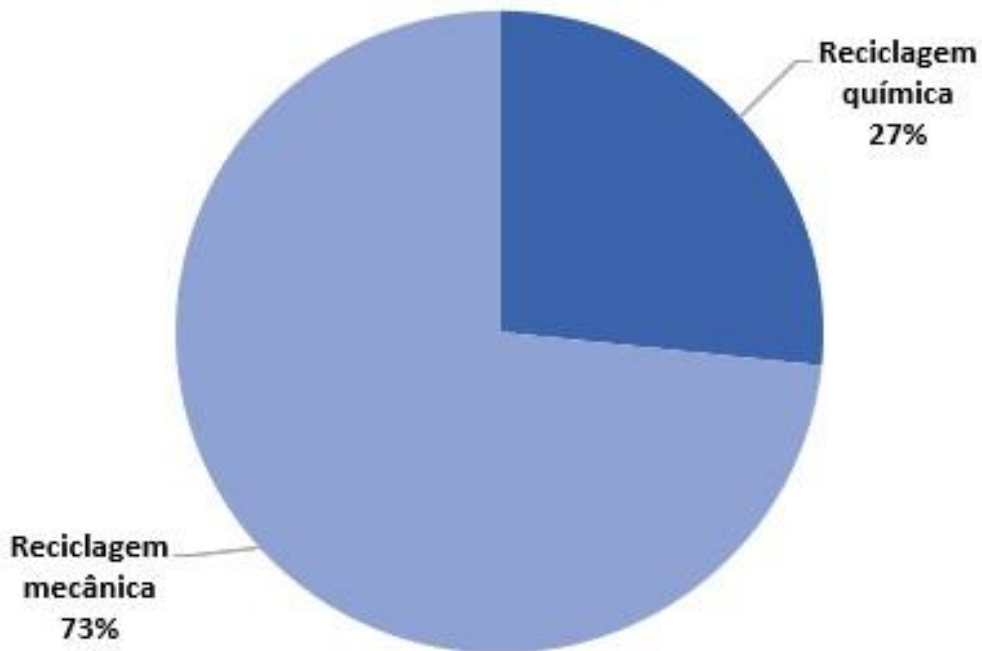
Tabela 2 – Publicações selecionadas para o desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados.

Autor	Processo de Reciclagem	Tipo de Resíduo	Prduto Final
Simón <i>et al.</i> (2015)	reciclagem química	pós-consumo	polióis
Machado (2018)	reciclagem mecânica	resíduos industriais	aglomerado de PU
Carmo <i>et al.</i> (2020)	reciclagem mecânica	resíduos industriais	carga
Bolanos <i>et al.</i> (2018)	reciclagem química	pós-consumo	polióis
Ramírez (2019)	reciclagem mecânica	pós-consumo	carga
Silva; Souza (2019)	reciclagem mecânica	gás de síntese	carga
Sampaio; Boas (2020)	reciclagem mecânica	pós-consumo	carga
Garcia (2017)	reciclagem mecânica	resíduos industriais	aglomerado de PU
Salas; Péres; Acebo (2019)	reciclagem mecânica	resíduos industriais	carga
Shin <i>et al.</i> (2019)	reciclagem química	pós-consumo	polióis
Gama (2020)	reciclagem mecânica	pós-consumo	carga
Gama; Godinho (2020)	reciclagem química	pós-consumo	polióis
Reghunadhan <i>et al.</i> (2018)	reciclagem mecânica	pós-consumo	carga
Hýsek <i>et al.</i> (2019)	reciclagem mecânica	pós-consumo	aglomerado de PU
Gómez Rojo <i>et al.</i> (2019)	reciclagem mecânica	pós-consumo	carga

Fonte: Próprio autor

A fim de entender a tendência do processo de reciclagem utilizado, possibilitando a compreensão de como o tema está sendo abordado no meio acadêmico, foi realizado uma análise.

Figura 11 – Percentual de publicações referentes aos diferentes processos de reciclagens encontrados no meio acadêmico



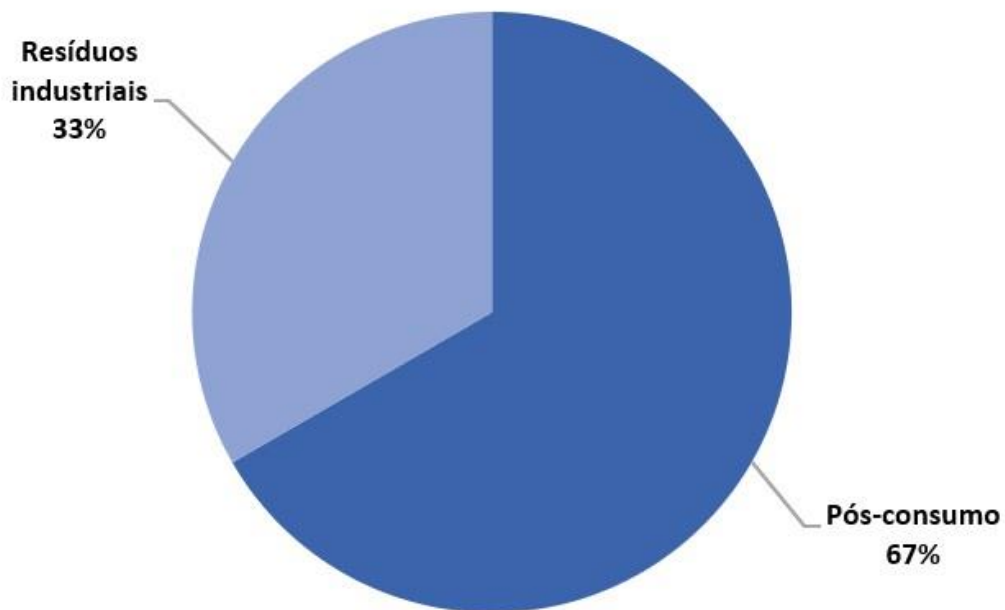
Fonte: Próprio autor

Na Figura 11 é apresentado o percentual de publicações de processos de reciclagem encontrados no meio acadêmico, ficou aparente a diferença entre os dois processos. Reciclagem mecânica com 73% e reciclagem química com 27% mostraram a preferência pelo método mecânico, isso pode ser justificado pela sua facilidade de processamento em comparação ao químico, traduzindo-se em uma vantagem. A complexidade do processo químico, requer um controle mais apurado das variáveis, como a seleção do resíduo e, quando levado para estudos mais aprofundados, instrumentos mais caros. Exemplos de trabalhos que utilizam a reciclagem mecânica temos o de Ramírez (2019) que utilizou resíduos de espuma rígida de poliuretano como carga para fabricação de argamassa com características isolante. Também é apresentado no trabalho de Gama et al. (2020) a aplicação de carga de poliuretano em uma matriz termoplástica para utilização em filamentos 3D. A desvantagem da reciclagem mecânica é a limitação das aplicações dos produtos encontrados, sempre haverá um vestígio das propriedades remanescentes de sua antiga forma, como corantes e aditivos que podem não ser desejados em sua nova forma. Exemplificando, nos trabalhos que utilizaram a reciclagem terciária, o processo depende de muitas variáveis e faz necessária a seleção prévia do material, assim restringindo o consumo de diversos resíduos. A rota química mais utilizada é a glicólise, apresentada por Simón *et al.* (2015), Bolanos *et al.* (2018) e Shin *et al.* (2019), sendo 75% dos trabalhos

apresentados entre os processados na reciclagem química. Não foi encontrado nenhum tipo de trabalho referente a reciclagem energética. Sendo assim, é visível que os processos de reciclagem química e energética não são muito estudados no meio acadêmico. Em comparação, a reciclagem mecânica teve mais trabalhos, 73% dos trabalhos estudados.

Em seguida, foi analisado o tipo de resíduo utilizado nos trabalhos, que na Figura 12 é apresentado em duas classes, pós-consumo e resíduo industrial.

Figura 12 – Tipos de resíduos utilizados no meio acadêmico



Fonte: Próprio autor

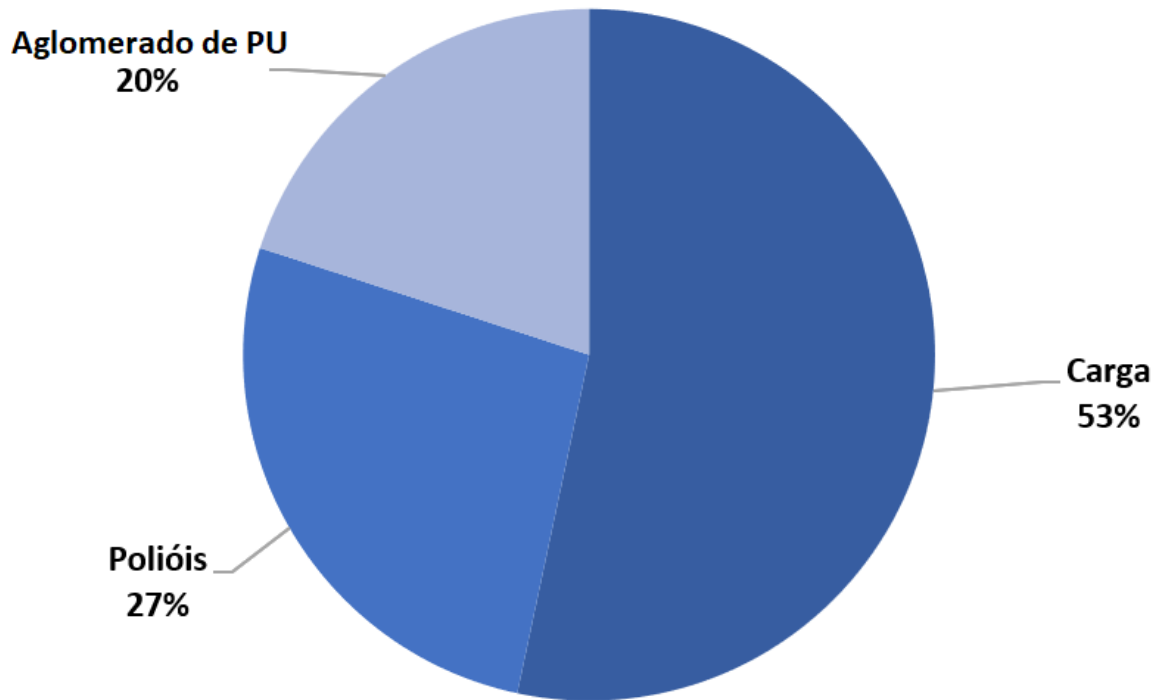
Foi apresentado uso de material pós-consumo em 67% dos trabalhos apresentados, contra 33% dos resíduos industriais. Isso mostra um direcionamento da pesquisa para onde há maiores problemas cotidianos. Como visto na revisão feita nesse trabalho, o resíduo pós-consumo não é utilizado tanto quanto o resíduo industrial, isso por conta do excesso de contaminantes presentes nos materiais além de sua heterogeneidade, exigindo uma pré-seleção do resíduo, o que o torna oneroso. Os estudos, também, podem ser direcionados a algum problema de descarte local, como é feito por Sampaio; Boas (2020), onde apresentaram uma solução para o descarte de espumas rígidas removida de gabinetes de freezer, estes resíduos são processados e utilizados como agregados em concretos sem função estrutural. Porém a vantagem da utilização de resíduos pós-consumo é a sua abundância, onde grande parte é descartada de maneira incorreta, tornando um problema para a sociedade. Observando os resíduos industriais, que representam 33% dos estudos avaliados, se destaca a sua facilidade de

seleção e ausência de contaminantes. Como contraponto, sua quantidade é mais restringida e normalmente é vendida por empresas que o produzem. Como é mostrado por Machado (2017) e Garcia (2017), onde foram fabricados aglomerados de espumas, provenientes de resíduo industrial, com características antichamas e baixo custo para aplicação em pisos e paredes com função isolante térmica.

A fim de compreender quais os resultados obtidos pelos trabalhos, foi feito um Gráfico para identificar os principais produtos gerados. A Figura 13 apresenta os produtos obtidos pelas pesquisas, sendo eles: 53% de cargas, 27% polióis e 20% aglomerados de PU. Os produtos mais encontrados são as cargas de PU, isso se deve a simplicidade da obtenção do produto e aplicação. Como foi apresentado por Gómez-Rojo *et al.*, (2019), dentre os diferentes tipos de resíduos de poliuretano que podem ser utilizados em materiais de construção, o que se destaca pela simplicidade, é a carga de PU. As cargas também são bem versáteis, apresentadas como agregados de concreto sem função estrutural por Sampaio; Boas (2020), ou como apresentado por Salas; Pérez-Acebo (2019) que avaliaram carga de espuma poliuretano aplicadas como agregado em asfaltos mástique. Nesse estudo conclui-se que a adição de até 5% de carga gera um aumento de rigidez no betume. As desvantagens desses produtos são as características remanescentes de sua última forma, como já falado, aditivos podem influenciar de maneira negativa em sua nova aplicação.

Analisando os polióis, que somam 27% dos produtos apresentados pelas pesquisas, Simón *et al.* (2015), Bolanos *et al.* (2018) e Shin *et al.* (2019) fazem caracterizações dos produtos fabricados a partir dos polióis reciclados, nessa análise observou-se que até 20% das utilizações do material reciclado na síntese de novos poliuretanos não geravam diferenças nas propriedades físicas comparadas aos produtos virgens. Gama; Godinho (2020) apresentaram uma outra rota para obtenção de polióis reciclados via acidólise, pois é um processo que já é feito por algumas empresas, entretanto não é dada a devida atenção. Traduzindo para vantagem, é notável que há inúmeras possibilidades na aplicação dos polióis, sempre produzido por processo de reciclagem química, não apresenta características remanescentes do resíduo que o gerou.

Figura 13 – Tipos de produtos obtidos no meio acadêmico



Fonte: (Próprio autor)

Após análise dos resultados obtidos pelos autores do meio acadêmico, ficou clara a intenção das pesquisas em utilizar os resíduos de poliuretano afim de reduzir a contaminação do meio ambiente e contribuir para a vida cotidiano do meio em que estão inseridos. O foco na utilização de resíduos pós-consumo evidencia essas intenções do desenvolvimento acadêmico.

5.2.2 Meio industrial

A partir da coleta de dados feita junta a 13 empresas, foram iniciadas as análises no meio industrial. A Tabela 3 apresenta os dados coletados de cada empresa referentes ao processo de reciclagem utilizado, tipo de resíduo utilizado, procedência do material utilizado e o produto obtido.

Tabela 3 – Empresas selecionadas para o desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados.

Autor	Processo de Reciclagem	Tipo de Resíduo	Produto final
Empresa 1	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 2	reciclagem mecânica	pós-consumo	Espanja
Empresa 3	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 4	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 5	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 6	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 7	reciclagem mecânica	resíduos industriais e pós-consumo	Aglomerado de PU
Empresa 8	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 9	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 10	reciclagem mecânica	pós-consumo	Aglomerado de PU
Empresa 11	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 12	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU
Empresa 13	reciclagem mecânica	resíduos industriais	Aglomerado de PU

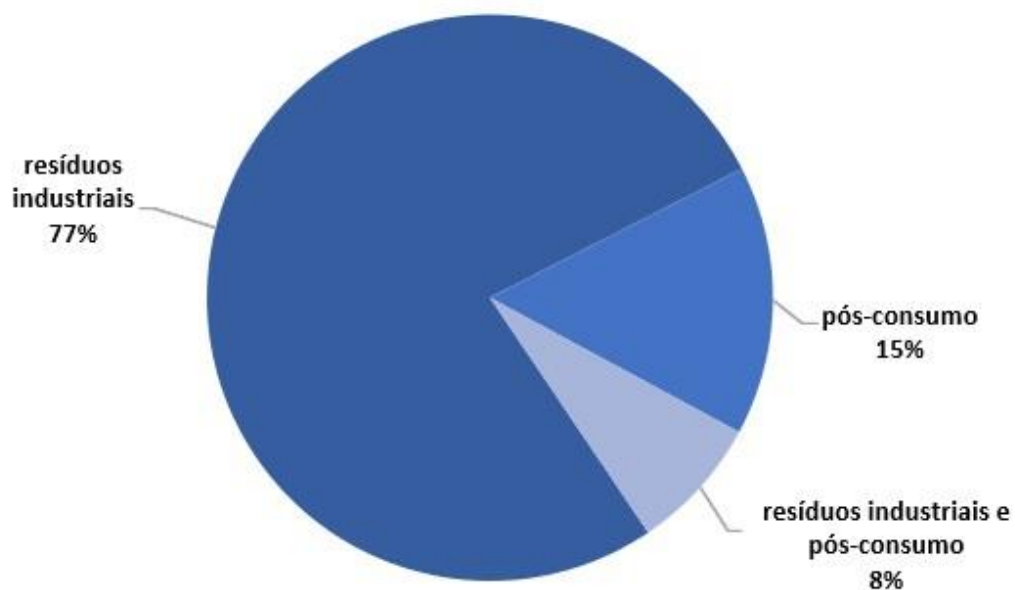
Fonte: Próprio autor

Analisando os tipos de processos de reciclagem, possibilitando a compreensão de como a reciclagem é utilizada no meio industrial, foi observado que 100% dos processos são mecânicos. Esse caráter mais homogêneo pode-se caracterizar pela facilidade do processo

comparado aos demais, os requisitos de mão de obra qualificada, maquinário caro e *know how* são muito menores na reciclagem mecânica. Em comparação, reciclagem química requer um maior controle do processo e seleção mais criteriosa dos resíduos, o que leva há um encarecimento do processo, além de investimentos iniciais maiores.

Traduzindo essas colocações para os tipos de resíduos utilizados, foi apresentada a Figura 14. Ao analisar, é possível constatar a tendência da utilização do tipo de resíduo. Com 77% do total, tendo em vista que todas as empresas encontradas são da região sudeste, a mais industrializada do país, onde resíduos industriais e pós-consumo são abundantes percebe-se uma explícita preferência para resíduos industriais, isso é justificada pela facilidade na seleção dos resíduos devido a sua menor contaminação e conhecimento d sua procedência. Quando a procedência do resíduo é conhecida todas as atividades subsequentes são simplificadas, assim garantindo um padrão mais homogêneo dos produtos fabricados o que corrobora com a justificativa da maior utilização de resíduos industriais. Em outro ponto, apenas 23% das empresas utilizam resíduos pós-consumo, sendo que uma delas é bem criteriosa em relação a esses tipos de resíduos, logo, torna mais complicada e restrita a sua utilização. Tendo em vista que a maioria das empresas entrevistadas utilizam resíduos industriais, que costumam ser homogêneos e de procedência conhecida, o processo de caracterização dos resíduos não é usual.

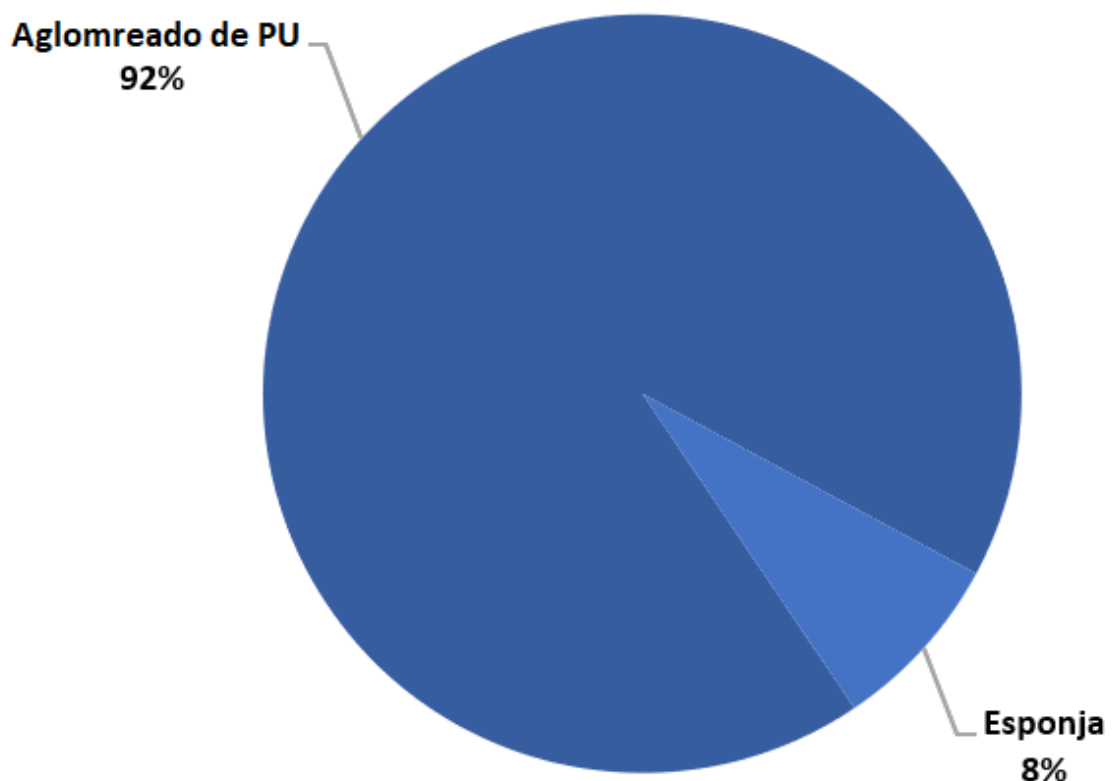
Figura 14 – Tipos de resíduo utilizados no meio industrial



Fonte: Próprio autor

Por fim, foi feita uma análise dos produtos obtidos a partir do processo de reciclagem das empresas, expressa na Figura 15. O aglomerado de PU é o produto resultante em 92% das empresas, isso se deve à grande aceitação deste produto no mercado. Há linhas de montagens que utilizam exclusivamente aglomerados de espumas de PU, justamente pelo seu custo-benefício. Alguns exemplos são notados na produção de colchões, onde retalhos da matéria-prima da cadeia principal são tratados e transformados em aglomerados de espuma que, novamente, são utilizados na linha de produção. O conhecimento e controle para os meios de produção deste produto também contribuem para a sua utilização em larga escala. Foi entrevistada, também, uma empresa que fabrica sponjas para uso em geral, cuja produção é feita a partir de reciclagem de espumas de colchões, sendo o interessante deste processo a simplicidade da produção, muito atraente para pequenos empreendedores, e uma destinação sustentável para colchões que antes iriam para o aterro sanitário. Para a manufatura das esponjas os resíduos podem ser de pós-consumo sem muitos critérios de seleção, o que facilita a sua produção.

Figura 15 – Tipos produtos obtidos no meio industrial



Fonte: Próprio autor

5.2.3 Análise comparativa

Após as análises feitas dos meios acadêmicos e industriais, foi realizado uma comparação entre os dois meios. Esta comparação servil para a compreensão das similaridades, diferenças e particularidades de cada cenário apresentado. Em relação ao tipo de processo de reciclagem utilizado, é possível observar uma semelhança, porém, com ressalvas. Nos dois meios a reciclagem mecânica é mais utilizada, por conta de sua praticidade e facilidade na realização das operações. No meio acadêmico há uma procura maior por reciclagem química, o que pode se tornar no futuro uma tendência. Isso se deve ao fato da academia ter comprometimento com desenvolvimento de novas tecnologias em primeiro plano.

Ao se analisar o tipo de resíduo utilizado, é notada uma diferença clara entre os dois meios. Quando observada as publicações acadêmicas, é encontrada uma tendência a utilização de resíduos pós-consumo, o que reflete nos objetivos das pesquisas, onde é buscada a redução dos impactos ambientais e ampliação da sustentabilidade nas várias camadas da sociedade. Comparando com o meio industrial, os objetivos são diferentes, a razão social de uma empresa é gerar lucro, logo, o que é mais utilizado são os resíduos mais rentáveis. Resíduos industriais normalmente não são contaminados e sua seleção é facilitada, tendo em vista o conhecimento da precedência dos materiais.

Por fim, os produtos obtidos são, em geral, diferentes entre os dois meios. No meio acadêmico temos uma predominância das cargas de PU, que podem ser justificadas pela sua versatilidade e possibilidade de serem gerados a partir de resíduos pós-consumo. Na indústria a predominância é de aglomerado de PU que pelo valor agregado e características são importantes produtos para esse seguimento. Mais uma vez é observado que, quando há uma valorização de um produto reciclado ele será amplamente utilizado, logo, fabricado. Os aglomerados de espuma de PU tem um mercado grande e economicamente sustentável, por isso se destaca.

Apesar de ter sido possível fazer análises promissoras, algumas melhorias poderiam ser adicionadas. Os dados industriais se referem a um espaço amostral pequeno, tendo em vista que todas as empresas se encontram na região sudeste do Brasil, região mais industrializada do país onde resíduos industriais são abundantes, pode nos levar a estatísticas enviesadas. Além disso, a baixa adesão a coleta seletiva no Brasil pode ser considerada um ponto desincentivado da utilização de materiais de pós consumo, cenário que pode ser diferente em países europeus, por exemplo. Como citado anteriormente, as publicações acadêmicas utilizadas são provenientes de vários países e continentes o que nos leva a obtenção de uma visão global da utilização da

reciclagem de resíduos de PU. Sendo assim, caso alguém utilize as comparações como referência, deve-se atentar aos pontos supracitados.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo entender de forma comparativa o cenário da utilização do Poliuretano reciclado no meio acadêmico e industrial, para tal, uma pesquisa foi executada. O entendimento do meio acadêmico baseou-se em 15 publicações, dos mais variados países do mundo, selecionadas por sua relevância e contribuição tecnológica. E o entendimento industrial foi baseado em entrevistas com 13 empresas do sudeste brasileiro. A partir da análise dos dados obtidos os objetivos foram atingidos.

Os dados apresentados nas análises feitas neste trabalho mostraram que o método de reciclagem mais adotado em ambos os setores é o de reciclagem mecânica, sendo ele o método utilizado em 73% das publicações acadêmicas e 100% das empresas. Alguns pontos importantes corroboram para que esse método seja o mais aplicado na indústria, são eles: sua simplicidade, menores custos se comparado com o processo químico e a obtenção de materiais com grande aderência comercial. Já a justificativa para sua predominância no meio acadêmico se deve a vasta possibilidade de aprimoramento do método, assim como a caracterização de novos produtos utilizando resíduos de PU. Porém, os processos de reciclagem mecânica ainda apresentam uma grande defasagem quanto aos produtos obtidos, que sempre terão características provenientes do resíduo de origem, como aditivos, corante e afins, que podem ser prejudiciais para as novas aplicações. Esse déficit da reciclagem mecânica é o maior responsável pelo aumento das pesquisas dos métodos de reciclagem química, que visam principalmente aumentar a versatilidade dos produtos obtidos. Os métodos químicos ainda são muito caros e pouco aplicados comercialmente, porém pesquisas científicas tem como objetivo o desenvolvimento de novas tecnologias e não o custo da operação o que justifica a discrepância entre os dados.

A análise dos tipos de resíduos utilizados também evidencia que a diferença de objetivos é a principal causa para a discrepância entre os dois meios. Dessa forma 67% dos estudo feitos utilizam resíduos pós-consumo e 33% resíduos industriais, enquanto no meio industrial o cenário é o oposto, 77% das empresas utilizam resíduo industrial, 15% resíduos pós-consumo e 8% utilizam ambos. Atualmente a maior aderência de resíduos industriais no mercado é devida a homogeneidade dos resíduos, o que reduz o custo com tratamentos para eliminações de contaminante e diminui a necessidade de uma separação acurada entre os tipos de resíduos. Enquanto no mundo acadêmico o maior objetivo é os desenvolvimentos de métodos de reciclagem eficientes para materiais de pós consumo tendo em vista motivos ambientais.

Considerando os dados evidenciados, conclui-se que o cenário industrial provavelmente deve sofrer mudanças nos próximos anos à medida que os estudos feitos obtenham métodos mais aprimorados e com custos mais otimizados para a reciclagem química.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análises comparativas que abrange outras regiões do Brasil e países.
- Levantar quais as maiores dificuldades para o reprocessamento do PU no meio industrial.
- Analisar a viabilidade econômica dos estudos realizados no meio acadêmico.
- Realizar estudos comparativos com outros polímeros relevantes.

REFERÊNCIAS

- AUSTIN A., HICKS D. **A review of the global PU industry 2016 and outlook for 2017.** PU Mag. 2017; 14 :4-16.
- AUXILIO, R; CHOO, W.; KOHLI, I.; SRIVATSA, S. C.; BHATTACHARYA. An experimental study on thermo-catalytic pyrolysis of plastic waste using a continuous pyrolyser. **Waste Management**, v. 67, p. 143-154, 2017.
- BOLANOS M., DAYANA Y., HERRERA W., ARANGO J., HOLGUIN A. Polyurethane flexible foam recycling via glycolysis using Zn/Sn/Al hydrotalcites as heterogeneous catalyst. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 87, p. 77-85, 2018.
- CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução.** [s.l.:2007].
- CANEVAROLO, S. **Ciência dos Polímeros—Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros.** [s.l.: 2003].
- DO CARMO, Kerciely Martins; DA SILVA, Mercês Coelho; MORELLI, Carolina Lipparelli. Reaproveitamento de resíduo de espuma rígida de poliuretano em uma matriz termoplástica de poliuretano. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e127932695-e127932695, 2020.
- EBDON, J. R. **Introduction to polymers (second edition).** Lovell Chapman and Hall, London, 1991. John Wiley & Sons, Ltd, 1992. v. 27
- ERIKSEN, M. et al. **Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea.** PLOS ONE v. 9, n. 12, p. e111913, 10 dez. 2014.
- GAMA, N.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. 3D printed thermoplastic polyurethane filled with polyurethane foams residues. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 5, p. 1560-1570, 2020.
- GAMA, N; GODINHO, B; MARQUES. Recycling of polyurethane scraps via acidolysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 395, p. 125102, 2020.
- GARCIA, A. **Valorização de resíduos de espumas de poliuretano no desenvolvimento de produtos para a construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalurgia e de Materiais) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2017.
- GARRIDO M.A., FONT R. **Pyrolysis and combustion study of flexible polyurethane foam.** **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 2015;113:202–215.
- GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever made.** **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 1 jul. 2017.

GÓMEZ-ROJO, R.; ALAMEDA, L.; RODRÍGUEZ, Á.; CALDEÓN, V.; GUTIÉRREZGONZÁLEZ, S. Characterization of polyurethane foam waste for reuse in eco-efficient building materials. **Polymers**, v. 11, n. 2, p. 359, 2019.

GUO X., ZHANG W., WANG L., HAO J. Comparative study of nitrogen migration among the products from catalytic pyrolysis and gasification of waste rigid polyurethane foam. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 120, p. 144-153, 2016.

HAMAD, K.; KASEEM, M.; DERI, F. **Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works**. *Polymer Degradation and Stability*, v. 98, n. 12, p. 2801–2812, 2013.

HIZZOTTI, A. **A pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais: evolução e desafios**. *Revista Portuguesa de Educação*, v. 16, 1 jan. 2003.

HULME, A. J.; GOODHEAD, T. C. Cost effective reprocessing of polyurethane by hot compression moulding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 139, n. 1-3, p. 322-326, 2003.

HÝSEK, Š.; NERBERGER, P.; SIKORA, A.; SHONFEKDER, O.; DITOMMASO, G. Waste utilization: Insulation panel from recycled polyurethane particles and wheat husks. **Materials**, v. 12, n. 19, p. 3075, 2019.

KEMONA, A.; PIOTROWSKA, M. **Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects**. *Polymers (Basel)* 2020 Aug; 12(8): 1752.

KINTO, O.; GALVAO, L.; GRIMONI, J. Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo. **Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002, Campinas (SP). 2002

MACHADO, A. **Desenvolvimento e caracterização de placas aglomeradas de resíduos de poliuretano skin, com diferentes retardantes de chama**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

MAGNIN A., POLLET E., PHALIP V., AVÉROUS L. **Avaliação da degradação biológica de poliuretanos**. *Biotechnologia Av.* 2020; 39 :107457.

MAHONEY L.R., WEINER S.A., FERRIS F.C. Hydrolysis of polyurethane foam waste. **Environmental Science & Technology**, v. 8, n. 2, p. 135-139, 1974.

PlasticsEurope Association of Plastics Manufacturers **Plastics—The Facts 2019** An analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data.

RAMÍREZ, E. **Mortero con espuma de poliuretano reciclado aplicado como recubrimiento térmico exterior en muros**. Dissertação (Maestro en Construcción) - Instituto Tecnológico De Chetumal, Chetumal, 2019

REGHUNADHAN, A., STRANSKOWSKI, M., DATTA, J., KALARIKKAL, N., THOMAS, S. Recycled Polyurethane as a Second Phase in Thermoset Blends and Its Effect on Thermal Degradation Kinetics Studies. **Macromolecular Symposia**. 381:1800112 , 2018.

SALAS, M.Á. i PÉREZ-ACEBO, H. Introduction of recycled polyurethane foam in mastic asphalt. **Gradevinar**, v. 70, n. 05., p. 403-412, 2018.

SAMPAIO, J.; BOAS, D. O estudo da substituição parcial da areia por agregados de espumas rígidas de poliuretano expandido no concreto sem função estrutural. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 78320-78332, 2020.

SHIN S., KIM H., LIANG J., LEE S., LEE D. Sustainable rigid polyurethane foams based on recycled polyols from chemical recycling of waste polyurethane foams. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 35, p. 47916, 2019.

SILVA, D.; DE SOUZA, E. Reciclagem de espuma flexível de poliuretano reaproveitamento e reutilização em nova formulação. **MOCCIF19-4ª Edição da Mostra Científica e Cultural do IFSP Suzano**. 2019.

SIMÓN D., BORREGUERO A.M., DE LUCAS A., RODRÍGUEZ J.F. Glycolysis of viscoelastic flexible polyurethane foam wastes. **Polymer Degradation and Stability**, v. 116, p. 23-35, 2015.

SIMÓN D., BORREGUERO A.M., DE LUCAS A., RODRÍGUEZ J.F. **Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability**. Waste Manag. 2018;76:147–171.

SINGH, N. et al. **Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications**. Composites Part B: Engineering, v. 115, p. 409–422, 2017.

SPINACÉ, M. A. DA S.; DE PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros** Química Nova Nova scielo, 2005.

VILAR, W.D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Rio de Janeiro: Vilar, 1999. 340 p.

YANG W., DONG Q., LIU S., XIE H., LIU L., LI J. Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 167-175, 2012.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, p. 1–38, 1 jan. 2005.

ZIA, K. M.; BHATTI, H. N.; BHATTI, I. A. Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. **Reactive and functional polymers**, v. 67, n. 8, p. 675-692, 2007.