



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PLÁSTICOS

Vitor Alves de Figueiredo Pessôa

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro

Orientador: Rupen Adamian

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2018

RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PLÁSTICOS

Vitor Alves de Figueiredo Pessoa

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE MATERIAIS.

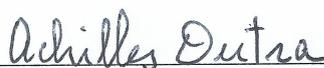
Examinado por:



Prof. Rupen Adamian, D. Sc.



Prof. Renata Antoun Simão, D. Sc.



Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

Alves de Figueiredo Pessôa, Vitor

Reciclagem e Reutilização de Materiais Poliméricos Plásticos / Vitor Alves de Figueiredo Pessôa. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2018.

XI, 39 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Rupen Adamian

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia de Materiais, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 36 – 39.

1. Reciclagem. 2. Polímeros. 3. Plásticos. I. Adamian, Rupen. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Materiais. III. Título.

*Dedicado ao meu grande amigo
João Pedro Nunes Cruz, que estará
sempre em minha memória.*

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer a minha família; meu pai Claudio, minha mãe Denise, e meus irmãos Vinicius e Vanessa. Sem eles eu não teria o suporte e o carinho para ingressar na UFRJ e me manter. Além disso, aos meus avós Manuel e Zulma, meus tios, Armando e Cristina e minha prima Viviane.

Em seguida, gostaria de agradecer aos amigos da Metalmat: Bruno Ribeiro, Luis Alberto, Danilo Naiff, Daniel Castro, Adriano Merlo, Felipe Conde, Darley Nogueira, Erick Guimarães, Felipe De Luca, Gabriel Cerqueira, Leandro Pereira, Mathias Moraes, Nathan Riany, Bruno Penna, Túlio Campos, João Pedro Barcellos, Felipe Rodrigues e em especial aos amigos Vitor Andrade, Lucas Ribeiro, Luiz Gustavo Lima, Caio Natarelli, Leonardo Rocha, Carlos Henrique, Renan Calmon e Rafael Garcia pelos momentos não só dentro da faculdade mas muitos fora dela.

Gostaria também de agradecer a Professora Renata por me ajudar em todos os momentos de dificuldades durante a graduação, ao Professor Achilles por gentilmente aceitar fazer parte da minha banca em um momento difícil, e especialmente ao Professor Rupen Adamian por toda orientação e dedicação nesta jornada final.

Ainda, gostaria de agradecer às pessoas que me receberam para a realização dos estudos de caso. Primeiramente o pessoal da COOPAMA: Luiz Fernandes, Ernandes Ricarte e Hanna Rodrigues. Em segundo, Eduardo Bernhardt, da Recicloteca e finalmente Luiz Otávio do Recicla CT.

Por fim, gostaria de agradecer minha namorada Isabela Teles por todo empurrão dado em minha vida acadêmica, profissional e pessoal.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Materiais.

RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PLÁSTICOS

Vitor Alves de Figueiredo Pessoa

Fevereiro / 2018

Orientador: Rupen Adamian

Curso: Engenharia de Materiais

O objetivo deste projeto é apresentar os diversos processos utilizados atualmente na reciclagem e reutilização dos materiais poliméricos plásticos, as inovações que estão cada vez mais próximas da realidade, e dois estudos de caso do Rio de Janeiro, apresentando a situação atual local. Hoje, no Brasil, apesar de diversos processos existentes e da viabilidade operacional e financeira, recicla-se apenas 3% de todo lixo gerado, e no caso dos plásticos, 21%, deixando-se de faturar aproximadamente R\$10 bilhões por ano e poluindo cada vez mais o meio-ambiente. Portanto, há uma grande lacuna a ser preenchida e com processos cada vez mais eficientes, o potencial de lucro pode ser enorme.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

RECYCLING AND REUSE OF PLASTIC MATERIALS

Vitor Alves de Figueiredo Pessoa

February / 2018

Advisor: Rupen Adamian

Course: Materials Engineering

The aim of this project is to present the various processes currently used in recycling and reuse of polymeric plastic materials, the innovations that are coming closer to reality, and two case studies of Rio de Janeiro, to present the current situation . Today, in Brazil, despite several existing processes and operational and financial feasibility, only 3% of all generated waste is recycled, and in the case of plastics, 21%, resulting in a lack of gain on the order of R\$ 10 billion annually, and also polluting the environment more and more. Therefore, there is a enormous gap to be filled and with processes being increasingly optimized, the potential for profit can be huge.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1. Introdução	1
1.1. História	1
1.2. Definições Básicas	3
1.3. Necessidade da reciclagem e reutilização	3
1.4. Consumo por setor industrial	6
2. Reciclagem e reutilização	7
2.1. Reciclagem mecânica	7
2.1.1. Recolhimento e separação	8
2.1.2. Trituração	10
2.1.3. Lavagem e secagem	10
2.1.4. Aglomeração	10
2.1.5. Peletização	11
2.1.6. Manufatura do produto final	11
2.2. Reciclagem química (terciária)	11
2.2.1. Hidrogenação	11
2.2.2. Gaseificação	12
2.2.3. Despolimerização química	12
2.2.4. Pirólise	13
2.2.5. Fratura catalítica	14
2.2.6. Fotodegradação	15
2.2.7. Degradação em reator de micro-ondas	15
2.3. Reciclagem energética	16
2.4. Reutilização	17
2.4.1. Reutilização de termoplásticos	17
2.4.2. Reutilização de termofixos	18
3. Reciclagem no Brasil	20
4. Possibilidades para o futuro	23
4.1. Lagartas degradantes de plástico	23

4.2. Uma nova classe de termofixos: reciclando o irreciclável	24
4.3. Ruas com piso de plástico	25
4.4. Polímeros de regeneração autônoma	26
5. Estudos de Caso	28
5.1. Contextualização	28
5.2. Estudo COOPAMA	30
5.3. Estudo Recicla CT	31
5.4. Pesquisa no CT/UFRJ	32
6. Conclusão	34
Referências Bibliográficas	36

Lista de Figuras

1. Histórico do uso de materiais poliméricos e elastômeros até os dias atuais [5].	2
2. Evolução da produção mundial de polímeros desde 1950 até 2015 [9].	4
3. Hierarquia recomendada para o descarte do material, procurando primeiro evitar o desperdício e por último o descarte.	5
4. Tipos de reciclagem de polímeros plásticos.	7
5. Códigos de diferentes polímeros termoplásticos para facilitar a separação antes da reciclagem.	9
6. Moradores da Bolívia construindo uma casa a partir de garrafas PET [21].	17
7. Infográfico representando a composição dos resíduos gerados no Brasil [27].	20
8. Regiões com maior densidade de empresas de reciclagem no Brasil [28].	21
9. Lagarta/mariposa da espécie <i>Galleria mellonella</i> [32].	23
10. Estrutura do PHT, sua fórmula é $(CH_2NR)_3$, onde R é um grupo radical [34].	24
11. Imagem conceitual do projeto <i>PlasticRoad</i> . É possível observar a facilidade da construção e manutenção com a estrutura modular, e as possíveis aplicações ao utilizar o interior da estrutura [35].	26
12. Ilustração do conceito de autorregeneração de polímeros [36].	27

Lista de Tabelas

1. Consumo de materiais poliméricos plásticos por setor, no mundo e no Brasil, em 2015 [12].	6
2. Plásticos e suas respectivas densidades [15].	9
3. Poder calorífico de alguns dos mais utilizados polímeros [19].	16
4. Comparação entre as classes de materiais analisados.	30
5. Comparação entre os materiais plásticos coletados e analisados.	31
6. Peso médio mensal dos materiais coletados pelo Recicla CT, de janeiro de 2010 até dezembro de 2016.	31
7. Peso mensal dos materiais plásticos coletados pelo Recicla CT.	32
8. Porcentagem das pessoas que separam os resíduos domésticos, de acordo com a renda familiar.	33
9. Porcentagem das pessoas que separam os resíduos domésticos, de acordo com o local onde viveram a maior parte da vida.	33

1. Introdução

1.1. História

Materiais poliméricos existem na natureza desde o início da vida, como o DNA, RNA, proteínas e polissacarídeos, que têm papel crucial nos reinos animal e vegetal. Desde antigamente o homem tem explorado polímeros de ocorrência natural para se vestir, decoração, abrigo, ferramentas, armas, materiais de escrita, etc. No entanto, a origem da indústria atual de polímeros é comumente aceita no início do século XIX, a partir de descobertas importantes em relação à modificação de alguns polímeros naturais.

Em 1820, Thomas Hancock descobriu que quando se aplica tensões de cisalhamento em borrachas naturais, elas se comportam de maneira mais fluida, tornando-se mais fácil de misturar com aditivos e moldar. Em 1839, Charles Goodyear descobriu que as propriedades elásticas de borrachas naturais poderiam ser melhoradas ao serem aquecidas com enxofre, originando a patente do processo de vulcanização, em 1844.

O nitrato de celulose, descoberto por Christian Schönbein em 1846, logo foi reconhecido por seu valor comercial como explosivo e, em menos de um ano, já estava sendo manufaturado. No entanto, o mais importante para a indústria de polímeros foi descobrir que o nitrato de celulose era um material elástico duro, solúvel e podia ser moldado em diferentes formas a partir de aplicação de calor e pressão. Logo vieram produtos como nitrato de celulose plastificado, celuloide. Em 1892, outros pesquisadores patentearam um processo chamado de processo viscoso, para dissolver e regenerar a celulose. O processo foi utilizado para produção de filmes de celofane.

Esses materiais poliméricos mencionados até aqui são semissintéticos, visto que são produzidos a partir de polímeros naturais. Leo Baekeland produziu o primeiro polímero completamente sintético a ser comercializado, o fenol-formaldeído, também conhecido como resina “baquelite”. Sua produção começou em 1910. A primeira borracha sintética a ser produzida, chamada borracha butílica, foi produzida na Alemanha durante a Primeira Guerra Mundial, como substituta da borracha natural, apesar de ser de baixa qualidade.

Embora a indústria de polímeros já estivesse mais firmemente estabelecida, seu crescimento foi restrito pela falta de conhecimento da natureza dos polímeros. Por volta de 1920, poucos cientistas acreditavam no ponto de vista de Hermann Staudinger, de que os polímeros eram compostos por grandes moléculas contidas em longas sequências de

ligações covalentes. Ele foi o primeiro a introduzir o termo “macromolécula”. Particularmente importante foi seu estudo da síntese, estrutura e propriedades do poliestireno; os resultados não deixaram nenhuma dúvida da validade do ponto de vista macromolecular.

Na década de 1930, a maioria dos cientistas já se convencera da estrutura macromolecular dos polímeros. Nos seguintes 20 anos, o crescimento de estudos nessa área foi enorme. Com o advento da ciência das macromoléculas, um número enorme de polímeros sintéticos surgiram e foram comercializadas pela primeira vez, como poliestireno, nylon, polietileno, silicone, etc.

A partir de 1950, diversos avanços estimularam o progresso científico e industrial, e cada vez mais há necessidade de desenvolver polímeros mais especializados e funcionais, em aplicações biomédicas, ópticas e eletrônicas, entre outras. E devido a essa necessidade, há cada vez mais um número maior de polímeros sendo processado. Em consequência, após o devido uso, há uma maior geração de resíduos e maior necessidade de destinar esses materiais para reciclagem ou para outras aplicações, a fim de diminuir o impacto causado ao meio-ambiente [1].

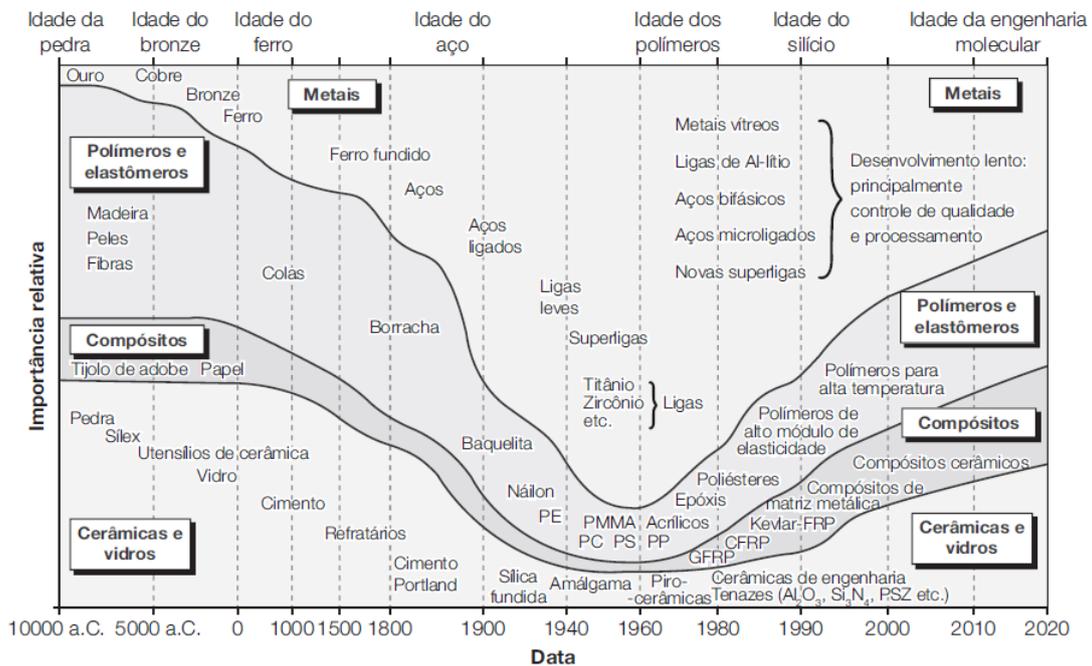


Figura 1: Histórico do uso de materiais poliméricos e elastômeros até os dias atuais [5].

A Figura 1 mostra a variação no uso dos polímeros desde muito antigamente até os dias atuais, sendo possível observar que em 10000 a.C. era utilizado em grandes proporções, muito pelo fato de serem materiais naturais, até que na idade do aço, seu uso começou a cair de forma drástica, visto que se descobriu como sintetizar materiais

plásticos. A recuperação se deu de forma gradativa a partir da década de 1970, com a substituição dos materiais metálicos por materiais mais adequados.

1.2. Definições Básicas

A palavra polímero tem origem do grego, com a junção do termo poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Dessa forma, um polímero é uma macromolécula formada por dezenas de milhares de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente.

Os polímeros podem ser divididos em três classes: **Plásticos**, **Elastômeros** e **Fibras**. A classificação depende de uma série de fatores, como o tipo de monômero (molécula com unidade de repetição unitária), número médio de meros por cadeia e o tipo de ligação covalente. Neste trabalho, focaremos apenas na primeira classe, a dos polímeros plásticos [2]. Dentro da classe de polímeros plásticos, podemos subdividi-los em **termofixos** e **termoplásticos**.

Termofixos são polímeros que após aquecimento vão amolecer e sofrer o processo de cura, que é a formação de ligações cruzadas entre cadeias poliméricas, e consequentemente não poderão ser remoldados, pois qualquer ulterior aquecimento irá degradar o polímero, visto que as ligações intermoleculares e intramoleculares são covalentes, tornando este processamento inicial uma transformação química irreversível [3]. Um exemplo de polímero termofixo é a resina epóxi.

Termoplásticos são polímeros com aptidão de amolecer e fluir quando sujeitos ao aumento de temperatura e pressão. Quando não mais sob influência desses fatores, o material se solidificará de acordo com a forma dada. Se houver reaplicação de temperatura e pressão, o material novamente irá amolecer e fluir, visto que o processo de cura deste tipo de polímero é completamente reversível, pois nenhuma ligação química entre cadeias ocorre. Quando o polímero é semicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. Essa característica permite que materiais termoplásticos possam ser remoldados e reciclados sem afetar negativamente as propriedades físicas do polímero [4]. Um exemplo de polímero termoplástico é o PET.

1.3. Necessidade da reciclagem e reutilização

Admite-se que até 2025, o lixo sólido gerado globalmente deve atingir a marca de 2,2 bilhões de toneladas ao ano, quase o dobro do valor de 1,3 bilhões de toneladas em

2010 [6]. Dentre diversas razões, há o aumento da população mundial, que deve chegar à marca de 8,2 bilhões em 2025 [7], valor que hoje é de 7,5 bilhões [8].

Há uma preocupação crescente com a destinação do lixo gerado pelos seres humanos. Atualmente, o Brasil recicla apenas 13% dos resíduos sólidos gerados (2016), enquanto a União Europeia (UE) apresenta taxa de 35%, o que representa 1% do PIB do bloco, em um mercado que emprega 2 milhões de pessoas e rende 145 bilhões de euros por ano.

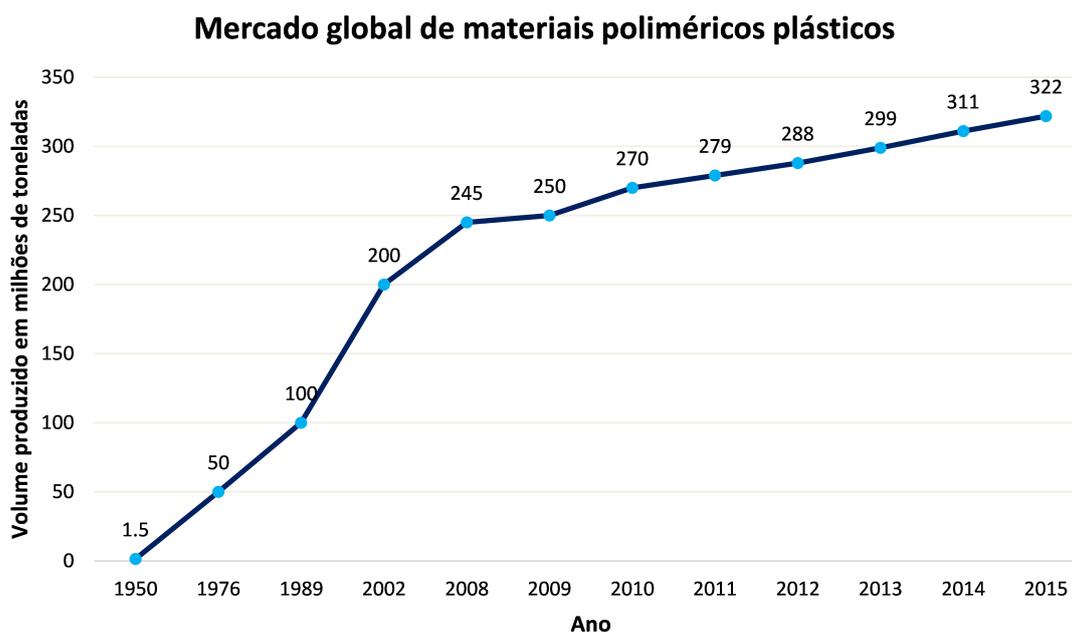


Figura 2: Evolução da produção mundial de polímeros desde 1950 até 2015 [9].

No caso apenas dos plásticos, a Figura 2 mostra a evolução no uso de materiais poliméricos plásticos desde 1950 até 2015, sendo possível observar um aumento de 200 vezes, enquanto para o mesmo período, a população mundial aumentou aproximadamente 3 vezes, de 2,5 bilhões para 7,3 bilhões, o que provoca uma grande necessidade de reciclagem e reutilização desses materiais [9].

Além disso, plásticos sintéticos podem levar anos até serem totalmente degradados pelo meio-ambiente, o que causa um grande problema. Com o aumento da geração de lixo, há também a preocupação do que se deve fazer com ele, visto que ocorrem implicações graves tanto ao meio-ambiente quanto para a saúde. Se houver descarte de resíduos de maneira não muito eficiente, como em aterros sanitários e incineradores, pode ocorrer lançamento de substâncias nocivas ao meio-ambiente, como gás carbônico e metano, e isso tem implicações gravíssimas na qualidade de vida do ser humano, seja com doenças respiratórias, doenças relacionadas a água contaminada,

infecção ao comer frutos do mar que tiveram exposição a algum tipo de contaminação e até câncer, caso haja descarte negligente de lixos radioativos. Essas razões já são suficientes para nos preocuparmos como descartar nosso lixo de forma eficiente, assim evitando danos ao meio-ambiente, à nossa saúde e até ao nosso capital, visto que o aumento de doenças provoca aumento do gasto com saúde [10]. Para evitar esses problemas, existem duas soluções muito interessantes, a reciclagem e a reutilização de materiais plásticos.

Ambos os termos são frequentemente utilizados como sinônimos, porém há uma diferença bastante sutil. A **Reutilização** é uma forma de reciclagem, ela utiliza o material existente sem alterações no formato e propriedades, ou seja, sem ocorrer nenhum subsequente processo, no máximo algum tipo de reparo; geralmente esse material vai ser utilizado em uma aplicação menos nobre em relação à aplicação original. A **Reciclagem** propriamente dita promove a destruição do material original para produção de outros materiais. Como exemplo, um computador que será destruído e suas partes de valor ainda úteis, como placas eletrônicas, podem ser reutilizadas, e plásticos e metais que possam ser fundidos, o serão para criação de outro material. Esses dois métodos são muito importantes para a diminuição de lixo gerado no mundo.



Figura 3: Hierarquia recomendada para o descarte do material, procurando primeiro evitar o desperdício e por último o descarte.

Sempre que possível, o processo descrito pela Figura 3 deve ser seguido. Primeiramente devemos sempre considerar a prevenção, isso é, evitar desperdício que possa ocorrer no processo adotado, ou até mesmo em nossos domicílios. A seguir consideramos a reutilização, pois não há gasto energético com o processo, ou quando há, é bem baixo por não necessitar de um reprocessamento do material, e sim algum tipo de reparo eventual. Em terceiro lugar, consideramos a reciclagem, pois apesar de ser um ótimo processo muito benéfico para a natureza, há um gasto energético envolvido no reprocessamento do material. Por fim, quando todos os passos anteriores não puderem ser realizados, consideramos o descarte do material. A utilização de um material novo

sempre envolverá gastos energéticos superiores, visto que há a energia para extração e beneficiamento das matérias-primas utilizadas[11]. No entanto, após a reciclagem, muitas vezes o produto também perde um pouco das suas propriedades, o que torna seu uso inviável para algumas aplicações críticas que exigem alta confiabilidade, como a indústria aeroespacial. Por isso devemos sempre fazer um estudo cuidadoso de qual é a melhor maneira de lidarmos com o desenvolvimento sustentável.

1.4. Consumo por setor industrial

Tabela 1: Consumo de materiais poliméricos plásticos por setor, no mundo e no Brasil, em 2015 [12].

Indústria	Consumo no mundo*	% total	Consumo no Brasil*	% total
Automotiva	55	17%	0,84	12%
Embalagens	113	35%	2,66	38%
Elétrica/eletrônica	19	6%	0,21	3%
Infraestrutura	81	25%	1,82	26%
Aeroespacial	0,06	< 1 %	0,04	< 1%
Outros	55	16%	1,43	20%

*em milhões de toneladas, 2015.

No exame da Tabela 1 é possível ver o consumo mundial de materiais plásticos no mundo, por setor industrial, e fazer uma comparação com o mesmo consumo no Brasil. O consumo mundial foi de 322 milhões de toneladas em 2015 [9], contra 7 milhões de toneladas no Brasil, no mesmo ano [12]. Portanto, o Brasil consome cerca de 2,2% do plástico mundial, sendo também possível observar que nos dois cenários, tanto o setor de embalagens quanto o de infraestrutura são os que mais demandam. Vale lembrar que esses dados se referem ao volume demandado, e não à receita de cada setor, podemos citar como exemplo o setor aeroespacial que mesmo com volume inferior a 1%, gera muita receita devido à sua demanda por polímeros de alto desempenho. A tabela também leva em consideração aplicações de uso final (end-use).

O mercado global de polímeros deve arrecadar U\$654 bilhões em 2020, impulsionado principalmente por países emergentes como China, Índia e Brasil nos setores de embalagens, infraestrutura e automóveis. No setor automotivo, as principais razões são a busca pela redução de peso do veículo, o que visa a diminuir o consumo de combustível e, conseqüentemente, a poluição emitida para a atmosfera; e o custo desses materiais para o fabricante, aumentando a margem de lucro do mesmo [13].

2. Reciclagem e reutilização

Como vimos até agora, o mercado de polímeros plásticos cresce constantemente e não há expectativa de redução nesse crescimento, o que usfaz aumentar nossa preocupação em como administrar os resíduos gerados por essa demanda crescente.

Os processos de reciclagem dos polímeros plásticos são: **Reciclagem Mecânica (Primária e Secundária)**, **Reciclagem Química (Terciária)**, **Reciclagem Energética (Quaternária)** e **Reutilização (Ordem Zero)**. A Figura 4 ilustra os diferentes processos.

Estes quatro processos podem ser utilizados nos polímeros termoplásticos, mas para os termofixos, só a reutilização é viável. Como mencionado anteriormente, os polímeros termofixos formam ligações químicas cruzadas entre cadeias, e isso significa que tanto as ligações intermoleculares quanto as intramoleculares são de mesma natureza, ambas covalentes, o que faz o material degradar antes que possa ser fundido. Os polímeros termoplásticos formam ligações físicas entre as cadeias, o que torna possível se fundirem diversas vezes.

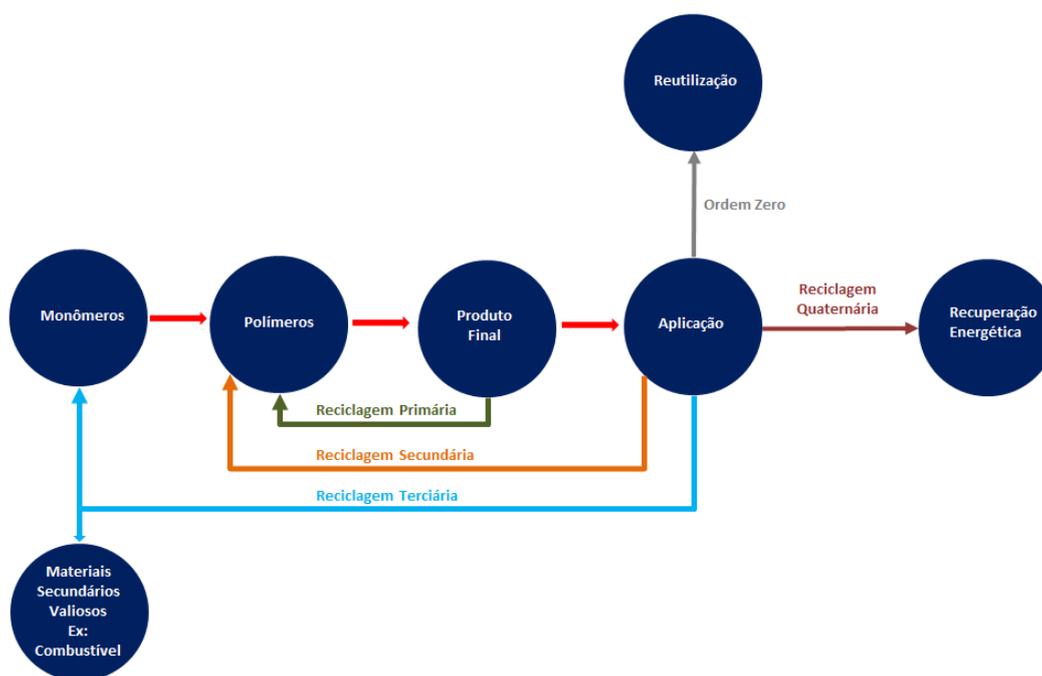


Figura 4: Tipos de reciclagem de polímeros plásticos.

2.1. Reciclagem mecânica

A reciclagem mecânica é o reprocessamento de materiais plásticos por meios físicos, como corte, trituração, lavagem, etc. O polímero é separado dos possíveis contaminantes, e pode ser reprocessado em *pellets*. O tamanho do resíduo é reduzido,

depois da separação, limpeza e secagem, para então ser diretamente processado em um produto final ou *pellets*, que pode ser utilizado para produzir outros bens. Entre os principais problemas estão a heterogeneidade dos resíduos e a deterioração das propriedades do material em cada ciclo de reciclagem. Isto ocorre porque o peso molecular da resina reciclada é reduzido, devido à quebra de ligações entre cadeias, com a presença de água e traços de impurezas ácidas. Métodos para manter o peso molecular médio do polímero são secagem intensa e reprocessamento a vácuo . Como dito anteriormente, somente polímeros termoplásticos podem ser reciclados por reciclagem mecânica.

As etapas envolvidas são:

1. Recolhimento e separação;
2. Trituração;
3. Lavagem e secagem;
4. Aglomeração;
5. Peletização;
6. Manufatura do produto final.

Durante a fase de fundição, o material reprocessado pode ser misturado com uma resina virgem, a fim de se obter propriedades superiores. Esta reciclagem é tradicional e a mais utilizada na maioria dos países em que os plásticos são reciclados. O custo de operação é relativamente baixo, mas exige um investimento inicial considerável [14]. A diferença entre a reciclagem primária e a secundária é que a primeira ocorre logo após o primeiro processamento, reciclando portanto os resíduos gerados pela manufatura inicial, enquanto a reciclagem secundária ocorre após o uso e descarte do material.

2.1.1. Recolhimento e separação

Nessa fase, a coleta é realizada por catadores, cooperativas ou pela municipalidade; em seguida a segregação é feita pelo tipo de polímero e coloração.

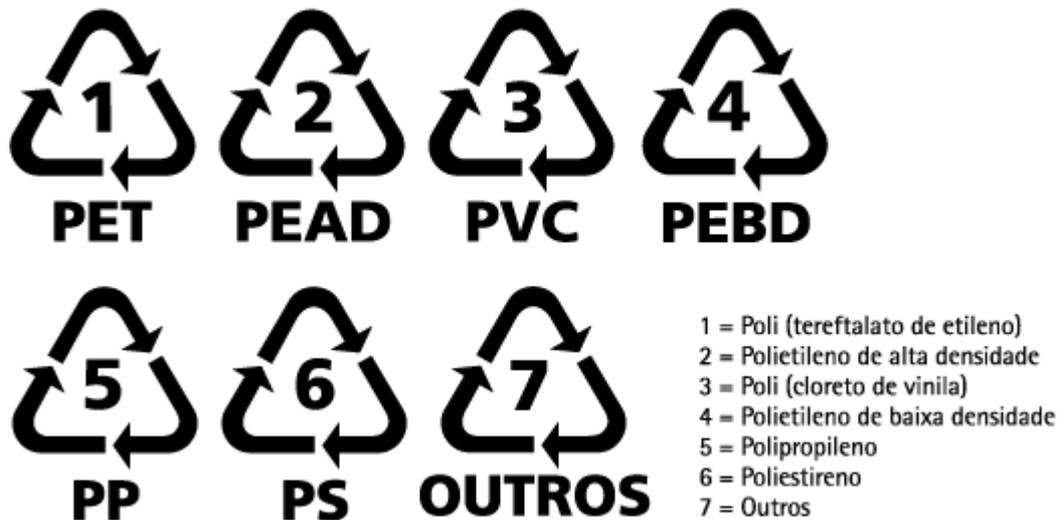


Figura 5: Códigos de diferentes polímeros termoplásticos para facilitar a separação antes da reciclagem.

A Figura 5 mostra os códigos para alguns dos principais polímeros termoplásticos. Esses símbolos facilitam a separação.

Essa separação é necessária porque a mistura de frações desses materiais reduz a qualidade do polímero final, devido às diferentes temperaturas de fundição, diferentes propriedades, etc.

A separação manual é muito trabalhosa e exige quase nenhum equipamento, mas depende inteiramente da acurácia do trabalho humano para produzir um material com alta pureza. Uma alternativa é o uso mecânico de separação. Esse tipo de separação se dá pela diferença de propriedades dos plásticos. Uma das formas é a diferença de densidade dos polímeros, como mostrado pela Tabela 2. Esse processo é chamado de “Float-and-Sink” e é utilizado para separar os polímeros de densidade maior que 1 g/cm^3 daqueles com densidade menor que 1 g/cm^3 . O meio usado para a separação é a água.

Tabela 2: Plásticos e suas respectivas densidades [15].

Plástico	Densidade (g/cm^3)
Polipropileno (PP)	0,90
Polietileno de Baixa Densidade (LDPE)	0,90
Polietileno de Alta Densidade (HDPE)	0,95
Poliestireno	1,05
Poliamida	1,15
Policloreto de Vinila (PVC)	1,40
Politereftalato de Etileno (PET)	1,40

Alguns polímeros apresentam a mesma densidade, ou valores muito próximos,

dessa forma, outros métodos também são utilizados, como difração de raios-X ou infravermelho (IR). Quando expostos à luz infravermelha, as moléculas dos polímeros emitem energia fotônica, que pode ser detectada e a distribuição do espectro produzido é característica de cada tipo de material.

Existem outros métodos de separação, por diferença de cor, cargas eletrostáticas e por diferença de propriedades superficiais. A escolha do método precisa levar em conta a provável composição dos resíduos e o custo, a fim de se conseguir produtos finais de pureza adequada.

2.1.2. Trituração

A redução de tamanho é necessária porque as partículas do material devem estar em tamanho adequado para seu posterior processamento. Essa etapa pode envolver dois estágios. O primeiro usando um triturador para se obter partículas grandes de aproximadamente 25-50 mm. Em seguida essas partículas são cominuídas em flocos de aproximadamente 5 mm x 5 mm, em lâminas giratórias. Essas lâminas precisam dissipar o calor gerado pela ação retalhadora, o que pode ser feito a partir de extratores de ar.

2.1.3. Lavagem e secagem

A lavagem é necessária para remover qualquer sujeira e resíduo aderido ao material plástico. Isto aumenta a pureza dos polímeros e também a eficiência na trituração. Os contaminantes devem aderir mais ao meio de limpeza do que ao plástico, permitindo sua remoção. A lavagem também remove rótulos e adesivos. Após a lavagem, é necessária a secagem do material. O uso de ar quente permite a secagem.

2.1.4. Aglomeração

Aglomeração é um processo que ocorre após o polímero ser separado de maneira bastante homogênea. O objetivo desta etapa é aumentar a densidade do material, o que é necessário para garantir boa alimentação de alguns tipos de plásticos.

A aglomeração é diferente do processamento em si, pois o objetivo desta é simplesmente ligar os flocos pela superfície; portanto, só a superfície é afetada. Esta ligação é feita por prensagem, de forma que o material é tratado termicamente na superfície por um curto período de tempo. A aglomeração térmica é o processo mais utilizado para resíduos plásticos.

2.1.5. Peletização

Essa etapa consiste meramente em transformar o aglomerado de plásticos em *pellets* a partir de uma extrusora. O diâmetro médio dos *pellets* é de 5mm.

2.1.6. Manufatura do produto final

Após a devida peletização do produto, este é submetido ao processamento final, o qual pode ser feito apenas com reciclados ou misturados com polímeros virgens, para se obter melhores resultados. Cada tipo de material e aplicação exigirá um processamento diferente. A garrafa PET, por exemplo, pode ser feita a partir de moldagem por injeção.

2.2. Reciclagem química (terciária)

A reciclagem química é definida como o processo que provoca a despolimerização total ou parcial do polímero. Os monômeros podem ser repolimerizados para recompor o polímero original. Em outras palavras, a reciclagem química é uma tecnologia avançada que transforma polímeros plásticos em moléculas menores, majoritariamente líquidos ou gases. O produto final, além de poder gerar novamente o polímero original, pode ser usado como combustível [15]. A reciclagem terciária envolve as seguintes técnicas:

1. Hidrogenação;
2. Gaseificação;
3. Despolimerização química;
4. Pirólise;
5. Fratura catalítica;
6. Fotodegradação;
7. Degradação em reator de micro-ondas.

2.2.1. Hidrogenação

A hidrogenação de resíduos plásticos é uma alternativa interessante para a quebra de cadeias poliméricas. Comparado com outros métodos, a hidrogenação leva à formação de produtos altamente saturados, evitando a presença de olefinas nas frações líquidas, o que favorece seu uso como combustíveis, sem a necessidade de outros tratamentos. Além disso, o hidrogênio promove a remoção de átomos de cloro, nitrogênio e enxofre, que podem estar presentes nos resíduos poliméricos. No entanto, a hidrogenação tem um custo

elevado, devido ao custo do hidrogênio e a necessidade de se operar em ambientes com alta pressão; esses custos são compensados pelo alto valor dos produtos, como os alcanos usados para combustíveis.

Na maioria dos casos é necessário o uso de catalisadores – como níquel, platina, molibdênio. A temperatura de operação é por volta de 400°C a uma pressão de até 150 atm [16].

2.2.2. Gaseificação

A gaseificação pode ser definida como a oxidação parcial de hidrocarbonetos na presença de quantidades de oxigênio menores do que a necessária para a combustão estequiométrica completa. Os principais produtos desse processo são o monóxido de carbono (CO) e gás hidrogênio (H_2). Esse é um processo já bem desenvolvido para a gaseificação de carvão e frações de óleo pesado, que foi modificado para uso em resíduos plásticos. Hoje em dia pode-se obter produtos químicos muito valiosos a partir dos derivados de biomassa e resíduos orgânicos sólidos. O processo se dá em temperaturas entre 800°C e 1600°C, com pressões entre 15-30 MPa. Ar, oxigênio, vapor de água, dióxido de carbono, e às vezes hidrogênio podem ser usados como agentes gaseificantes, tanto separados como em combinação um com o outro. Uma das maiores vantagens desse processo, é o fato de não ser necessária a separação dos resíduos plásticos. No entanto, a gaseificação só é economicamente viável em função do valor e das possíveis aplicações dos gases produzidos, ou como fontes de energia para combustão ou para a síntese de outros produtos, como metanol, amônia, hidrocarbonetos, ácido acético [17].

2.2.3. Despolimerização química

Este processo consiste na quebra do polímero através de reações com determinados agentes químicos; isto faz com que o polímero se transforme nos monômeros que o originaram. Esses monômeros são idênticos àqueles que produziram os polímeros virgens; portanto, os polímeros plásticos produzidos tanto por despolimerização quanto por monômeros “frescos” devem apresentar propriedades e qualidade similares.

Dessa forma, os resíduos plásticos são reintroduzidos no mercado como novos polímeros, tanto quanto em outros tipos de reciclagem, com a vantagem de não haver a perda de propriedades devida à reciclagem.

A reciclagem por meio da despolimerização química é o processo mais bem

estabelecido da reciclagem química. A maior desvantagem da despolimerização química é que ela é praticamente restrita aos polímeros produzidos por condensação, e não apresenta utilidade para a decomposição da maioria dos polímeros obtidos por adição, que são os maiores componentes dos resíduos plásticos. Essa restrição acontece pelo fato deste tipo de reciclagem degradar o material em questão.

Cabe lembrar que os polímeros produzidos por condensação são obtidos através de reações de duas moléculas, que podem ser monômeros, oligômeros ou intermediários de alto peso molecular, que procede com a liberação de uma molécula pequena, conforme as ligações da cadeia se formam. A despolimerização química acontece ao promover a reação reversa da formação polimérica, geralmente através das reações dessas moléculas pequenas com cadeias poliméricas. Diversas resinas usadas comercialmente são produzidas por condensação, como poliésteres, poliamidas, poliacetatos, policarbonatos. No entanto, esses polímeros representam apenas 15% de todo o lixo plástico, e por isso, a despolimerização química é um processo de emprego mais limitado.

2.2.4. Pirólise

Há dois tipos de pirólise, ambos em ambiente deficiente em oxigênio e atmosfera inerte: pirólise em baixa temperatura, e em alta temperatura. A primeira é uma técnica de despolimerização; já a segunda causa degradação térmica. Portanto, o interesse maior é na de baixa temperatura, visto não haver a intenção de degradar o material, e sim reciclar.

A pirólise em baixa temperatura (450-600°C), também conhecida como fratura térmica, produz principalmente matérias-primas para produção de poliolefinas, assim como ceras. A mistura de polímeros com aditivos e outras impurezas faz com que a escala comercial seja dificultada. A pirólise decompõe o polímeros em seus monômeros, oligômeros e outras substâncias orgânicas que podem ser separadas para serem usadas como alimentadoras ou para geração de energia, como combustíveis. A pirólise em baixa temperatura é mais indicada para resíduos com teor elevado de hidrocarbonetos, como resíduos sólidos urbanos, ou resíduos têxteis.

Como não há oxigênio no sistema, a pirólise não é um processo de combustão, e sim um conjunto de complexas reações, que dependem do tipo de plástico e da natureza do processo utilizado para a produção. Diferentes resultados podem acontecer:

- Decomposição de polímeros em monômeros;
- Fragmentação das cadeias principais em componentes orgânicos de diferentes

tamanhos;

- Decomposição simultânea e fragmentação em monômeros/oligômeros;
- Eliminação de componentes inorgânicos simples, deixando resíduos carbonizados;
- Eliminação de cadeias laterais, produzindo polímeros com estruturas complexas e ligações cruzadas.

Esse processo de reciclagem também é válido para polímeros termofixos, porém, ainda não é economicamente viável [18].

2.2.5. Fratura catalítica

Esse processo de reciclagem química é baseado no contato do polímero com um catalisador, que promove rompimento de sua cadeia. Na verdade, a degradação do plástico procede com uma combinação de catalisador com efeitos térmicos, também. Diferente de outros processos nos quais o polímero plástico pode reagir com algum composto químico, na fratura catalítica não há agentes químicos incorporados, e os produtos derivados não são os monômeros originais, usualmente. Em comparação com a pirólise, a fratura catalítica apresenta diversas vantagens:

- As moléculas do polímeros começam a se quebrar na presença de catalisadores em temperaturas inferiores àquelas da pirólise. A conversão de poliolefinas em produtos voláteis foi detectada por volta de 200°C, em comparação com a degradação térmica que ocorre ao redor de 400°C. Isso resulta em menor consumo de energia.

- Em temperaturas iguais, a fratura catalítica ocorre com maior velocidade do que a pirólise. Por volta de 400°C, os primeiros produtos voláteis são observados apenas alguns minutos depois do contato com o catalisador.

- Os produtos derivados da fratura catalítica apresentam qualidade superior aos produtos derivados da pirólise. Dessa forma, é comum a presença de alta proporção de polímeros com estruturas ramificadas, cíclicas e aromáticas, usualmente mais complexos, o que faz com que os óleos produzidos apresentem propriedades muito similares às de combustíveis comerciais.

Esses fatores demonstram o alto potencial desse processo na conversão de resíduos plásticos em produtos valiosos. No entanto, ele apresenta diversas desvantagens. Os catalisadores vão perdendo utilidade com o tempo pela deposição de resíduos com carbono e venenos presentes no lixo, como compostos contendo cloro e nitrogênio. Além disso, compostos inorgânicos contidos nos lixos plásticos tendem a

permanecer aderidos ao catalisador, prejudicando sua recuperação e reuso.

Por essas razões, a fratura catalítica é mais aplicada a resíduos de poliolefinas de alta pureza, e após numerosos pré-tratamentos que permitam remover os componentes capazes de prejudicar o catalisador.

2.2.6. Fotodegradação

Existem quatro mecanismos pelos quais os plásticos se degradam no meio-ambiente: fotodegradação, degradação termo-oxidativa, degradação hidrolítica e biodegradação por microrganismos. Sabe-se que a degradação natural desses polímeros começa com a fotodegradação, porque a radiação ultravioleta da luz solar fornece a energia de ativação necessária para se iniciar a incorporação de átomos de oxigênio no polímero, o que leva à degradação termo-oxidativa. Isso faz com que o polímero se fragilize e comece a quebrar em moléculas cada vez menores, até que as cadeias poliméricas alcancem peso molecular suficientemente baixo para serem metabolizadas por microrganismos. Esses últimos convertem o carbono das cadeias em dióxido de carbono, ou transformam-nas em biomoléculas.

No entanto, esse processo é muito lento, e pode levar 50 anos ou mais, até a degradação completa dos materiais plásticos.

2.2.7. Degradação em reator de micro-ondas

O reator de micro-ondas é utilizado de forma eficiente. O seu uso tem vantagem de menor tempo de processamento e menor utilização de energia.

A interação molecular entre o polímero e um campo eletromagnético resulta na absorção de radiação de micro-ondas, o que ocasiona um aumento de temperatura no material. Para exemplificar, será citado abaixo o caso das borrachas, por serem mais amplamente estudadas recentemente.

Esse processo utiliza energia de micro-ondas (300 MHz a 300 GHz) para romper as ligações entre átomos de enxofre, e entre átomos de enxofre e carbono, sem romper as ligações carbono-carbono da cadeia principal. O tratamento de micro-ondas remodela a rede tridimensional das borrachas termofixas, devido a um processo termomecânico, e as transforma em um novo produto reciclado.

Resíduos industriais de SBR (borracha de butadieno estireno) podem ser reciclados de forma bastante eficiente pela degradação de micro-ondas. Durante esse tratamento na SBR, as ligações polissulfídicas são quebradas, assim como os grupos de sulfóxidos e de

grupos sulfeto, que são liberados na forma de SO_2 e compostos orgânicos voláteis com baixo peso molecular [17].

2.3. Reciclagem energética

Reciclagem energética (quaternária) é a incineração do polímero. A incineração com objetivo de gerar energia é um dos meios mais eficazes de redução de volume dos materiais. Apesar desse método gerar uma quantidade considerável de energia proveniente dos polímeros, é ecologicamente inaceitável do ponto de vista de saúde, visto que há o lançamento de substâncias nocivas, como dióxidos de carbono e enxofre, ao meio ambiente, além de toxinas presentes em alguns materiais, como o PVC. Dessa forma, este tipo de reciclagem deve ocorrer em elevadas temperaturas e deve ser equipado com algum processo de tratamento de gases.

Visto que polímeros são hidrocarbonetos, não é surpreendente que sejam ótimas fontes de calor, quando queimados. A quantidade de energia que pode ser recuperada depende do poder calorífico de cada material. Em média os plásticos apresentam valor de 35 MJ/kg, enquanto o papel e lixo orgânico apresentam valores de 16 MJ/kg e 3 MJ/kg, respectivamente. O que faz com que os plásticos apresentem alto potencial energético relativo, quando incinerados.

Existem diversos métodos para recuperação energética, como a pirólise, incineração e recuperação gasosa, a partir de aterros sanitários, entre outros.

Tabela 3: Poder calorífico de alguns dos mais utilizados polímeros [19].

Polímero	Poder calorífico (MJ/kg)
Polietileno (PE)	41,8
Polipropileno (PP)	30,9
Policloreto de Vinila (PVC)	13,7
Poliamida (PA)	36,8
Poliestireno (PS)	39,0
Politereftalato de Etileno (PET)	21,8
Epóxi	30,0

A Tabela 3 apresenta o poder específico de alguns dos mais utilizados polímeros no mundo.

A reciclagem energética pode ser aplicada tanto em polímeros termoplásticos

quanto termofixos. Por exemplo, placas de circuito impresso são geralmente incineradas para remoção de materiais não-metálicos e, dessa forma, os metais contidos nessas placas podem ser reaproveitados [20].

A reciclagem energética é ainda mais eficiente quando conectada a um fornecimento de água quente ou uma planta industrial, pois a energia recuperada é utilizada para aquecimento de água e fornecimento de energia. Em Paris (França), construções residenciais em algumas regiões são equipadas com combustores; dessa forma, o lixo doméstico é incinerado localmente e utilizado para providenciar aquecimento para os residentes, a um baixo custo [15].

2.4. Reutilização

2.4.1. Reutilização de termoplásticos

A reciclagem de ordem zero de termoplásticos não é tão comum quanto para termofixos, isto porque, como visto anteriormente, há uma facilidade de reciclagem para os termoplásticos, o que acaba sendo uma preferência ante à reutilização. No entanto, há bastante espaço para reutilização em aplicações consideradas menos críticas, como, por exemplo, utensílios domésticos, móveis e até mesmo casas.



Figura 6: Moradores da Bolívia construindo uma casa a partir de garrafas PET [21].

A Figura 6 mostra uma casa sendo construída com utilização de garrafas PET. É

uma forma barata de reutilização e de fácil manufatura e tem bastantes adeptos pela Bolívia e pelo mundo.

Para a construção de uma dessas casas é necessário o preenchimento da garrafa PET com areia, cascalho e pedaços de madeira; e com uma matriz de cimento e terra. A construção de casas com o emprego desses materiais apresenta diversas vantagens em relação ao tijolo tradicional:

1. O tempo de execução é 15% menor.
2. Há economia com cimento, água e equipamentos.
3. O custo de transporte é inferior, devido ao menor peso.
4. Não há necessidade de tantos operários, causando economia de 75% em mão de obra.
5. A resistência mecânica é aproximadamente 20 vezes superior à do tijolo convencional.
6. Praticamente não há desperdícios por utilizar garrafas PET descartadas.

Essas vantagens supracitadas ocasionam uma redução no custo final de até aproximadamente 45%, o que revela ainda mais os benefícios desse tipo de reutilização, que se apoia nos três pilares do desenvolvimento sustentável: pilar econômico, ambiental e social [22].

Este tipo de metodologia tem sido extremamente útil para os mais de 90 mil refugiados que atualmente vivem no deserto Argeliano [23]

2.4.2. Reutilização de termofixos

Os polímeros termofixos apresentam algumas propriedades muito interessantes, como resistência química, resistência ao calor, e integridade estrutural. Além disso, possuem uma alta resistência mecânica específica quando usados em compósitos, o que torna esses polímeros ótimos substitutos para metais como o alumínio. Essas propriedades fazem desses materiais ótimos candidatos para aplicações de alto nível, como a aeroespacial. No entanto, esses polímeros, como mencionado anteriormente, não podem ser reciclados, devido às suas ligações cruzadas, e isso faz com que haja preocupação em como descartar esses materiais; a solução viável é sua reutilização.

Uma das maneiras mais usadas para a reutilização dos termofixos é o retalhamento desses polímeros em particulados de diferentes tamanhos, a fim de servirem de preenchimento para materiais compósitos. No entanto, esses compósitos usualmente são utilizados em aplicações menos críticas, devido à perda de resistência

mecânica do material reutilizado. Esta perda é atribuída à fraca ligação entre o polímero reutilizado e a matriz [24].

Um exemplo é o uso do polímero melamina em concretos não-estruturais. Os resíduos deste polímero são esmerilhados e utilizados com areia, água, cimento e pó de alumínio. Esse concreto resultante atinge todos os requerimentos necessários para concretos não-estruturais, de acordo com a ASTM C129 Tipo 2. A utilização da melamina nessa mistura pode reduzir consideravelmente a densidade do concreto, devido a sua baixa gravidade específica. No entanto, a resistência à compressão tende a diminuir por causa da fraca ligação entre as partículas poliméricas e a pasta de cimento [25].

3. Reciclagem no Brasil

Atualmente, o Brasil perde mais de R\$120 bilhões por ano ao não reciclar lixo e só reaproveitamos 13% dos resíduos urbanos, em comparação com a Alemanha e Áustria, onde a marca já ultrapassa os 50%. Isso mostra um enorme potencial para o Brasil e é um ramo que ainda pode ser muito explorado por empresários, e infelizmente a falta de investimento nessa indústria acaba encarecendo o produto, devido à baixa oferta. Outro fator que pode prejudicar a indústria da reciclagem é a queda do preço do barril de petróleo, tornando o plástico reciclado menos interessante, devido à menor qualidade. A logística inversa da reciclagem também é um desafio a ser superado no Brasil, em grande parte devido à dispersão dos materiais pós-consumo [26].

Em 2012, o Brasil reciclou 21% de todo plástico pós-consumo do país. E apesar dos três processos, e diversas técnicas introduzidas na seção anterior, o Brasil se vale inteiramente da reciclagem mecânica e, até o momento, não há indícios de uso de reciclagem química ou energética em larga escala.

De acordo com o Compromisso Empresarial Para Reciclagem (CEMPRE), até 2012, o lixo gerado no Brasil era da ordem de 200 mil toneladas por dia. A composição desses resíduos são representados pela Figura 7. Os plásticos representam cerca de 13,5% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil.

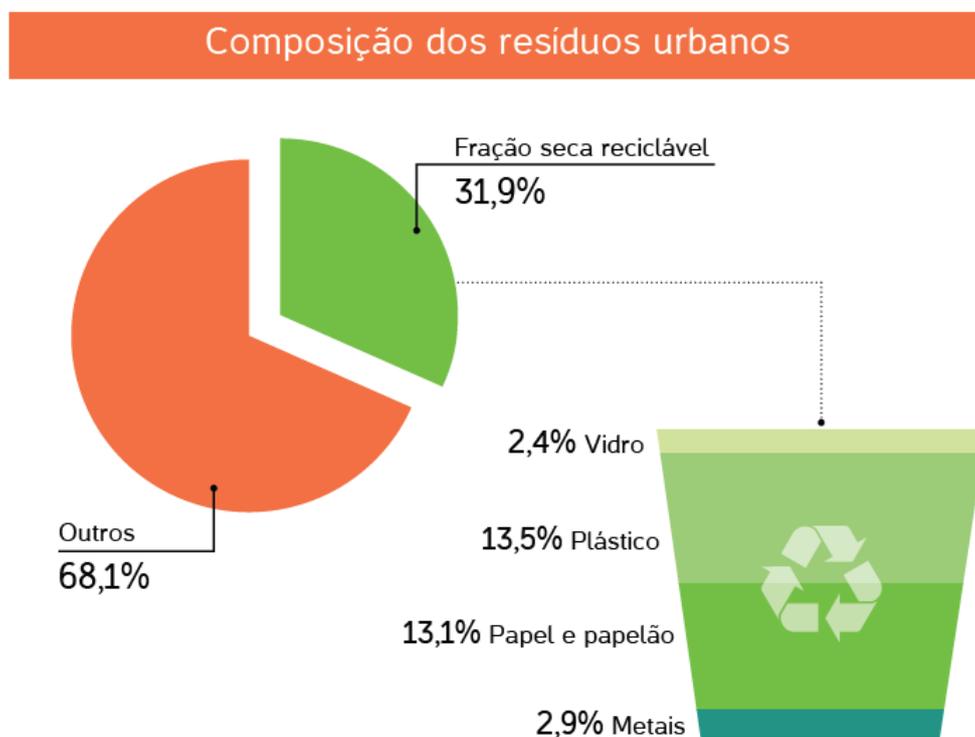


Figura 7: Infográfico representando a composição dos resíduos gerados no Brasil [27].

Considerando os dados de 2012, existem 762 recicladoras no Brasil, com capacidade de reciclagem de quase 2 milhões de toneladas por ano, e estas empresas empregam diretamente quase 19 mil pessoas. O faturamento somado chega a R\$ 2,5 bilhões. A região sul e sudeste é a que mais recicla no Brasil inteiro, sendo São Paulo responsável por 39% da reciclagem. Isso condiz com o caráter mais industrial da região.

Apesar de parecer pouco, o Brasil está entre os países que mais reciclam plásticos no mundo [28]. A Figura 8 mostra a porcentagem das empresas de reciclagem por Estado.

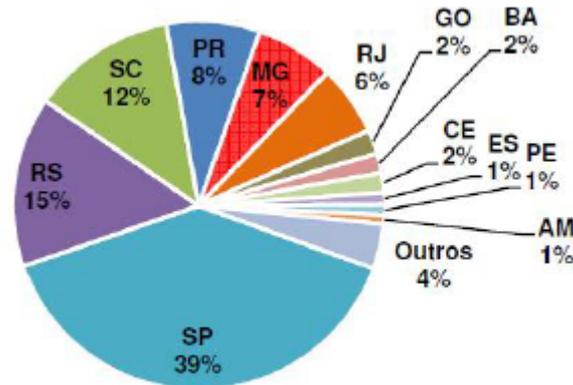


Figura 8: Regiões com maior densidade de empresas de reciclagem no Brasil [28].

O fato de não usarmos toda a capacidade de reciclagem do país, faz com que deixemos de faturar cerca de R\$ 6 bilhões por ano, isso sem contar o que é deixado de ganhar por não ter capacidade de reciclar 100% dos plásticos, o que é um tremendo desperdício para o meio-ambiente e a economia do país. Além disso, com a reciclagem, há um ganho de 78% em redução de energia em relação ao plástico virgem, o que gera uma grande economia energética para a empresa recicladora, principalmente pelo fato de o Brasil ser um país com uma energia elétrica muito cara, sendo o 6º país com a energia mais cara do mundo. [29]

Dentre os polímeros coletados, os polietilenos, o PET e o PP estão entre os mais reciclados. Isso porque usualmente são utilizados em aplicações de curto prazo, como em embalagens. Por outro lado, o PVC, apesar de muito demandado na indústria, quase não é reciclado, devido às suas aplicações de longo prazo, em tubos, por exemplo.

Apesar de geralmente a reciclagem gerar um polímero de pior qualidade, isso vem mudando e cada vez mais os plásticos reciclados vem ganhando qualidade, fazendo com que sejam demandados em segmentos de maior exigência técnica, e portanto, aumentando seu valor comercial.

Em relação às empresas recicladoras, 75% delas têm mais de 11 anos de mercado,

14% têm entre 6 e 10 anos, 6% entre 4 e 5 anos e 4% até 3 anos. Do total, 34% são pequenas, com faturamento de R\$120 mil a R\$1,2 milhão por ano; 31% são médias, com faturamento de R\$1,2 milhão a R\$12 milhões por ano; 24% são microempresas, com faturamento até R\$120 mil por ano; 6% são grandes empresas, com faturamento acima de R\$12 milhões e 2% são cooperativas. Em relação ao número de funcionários, 29% das empresas têm entre 21 e 50 pessoas, 23% acima de 50 colaboradores, 19% de 6 a 17 pessoas, 17% de 11 a 20 e 12% até cinco funcionários [30].

4. Possibilidades para o futuro

4.1. Lagartas degradantes de plástico

Polietileno (PE) e Polipropileno (PP) correspondem a aproximadamente 92% de toda produção de plástico mundial. O PE é amplamente utilizado nas indústrias de embalagens, e representa 40% de toda a demanda, por plásticos, com mais de um trilhão de sacolas plásticas utilizadas todo ano. Na Europa, 38% dos plásticos são descartados em aterros sanitários, 26% reciclados mecanicamente e quimicamente e 36% reciclados energeticamente, via combustão, o que impacta significativamente o meio-ambiente. Uma nova metodologia pode surgir para suprir essa demanda com a utilização de lagartas degradantes de plástico, da espécie *Galleria mellonella*.

Quando um filme de PE foi deixado em contato com as lagartas, buracos começaram a surgir após 40 minutos. Uma análise gravimétrica das amostras mostrou uma perda de massa de aproximadamente 13% do PE em 14 horas de tratamento, o que é consideravelmente superior aos resultados obtidos por outros meios anteriormente utilizados, como bactérias e fungos [31]. No entanto, ainda é difícil afirmar a viabilidade de tal processo ser utilizado no futuro, mas pode ser uma indicação do uso de outro tipo de seres vivos no futuro.



Figura 9: Lagarta/mariposa da espécie *Galleria mellonella* [32].

4.2. Uma nova classe de termofixos: reciclando o irreciclável

Como dito anteriormente, infelizmente, os polímeros termofixos não podem ser reciclados, devido às ligações cruzadas entre cadeias. No entanto, pesquisadores da IBM (*International Business Machines*) descobriram um polímero termofixo capaz de ser reciclado. O polímero em questão é o *Polyhexahydrotriazine* (PHT), que pode ser decomposto por meio do uso de ácidos fortes. O monômero puro foi recuperado e reutilizado para novos materiais.

As propriedades do PHT são similares às dos tradicionais termofixos não recicláveis; este é rígido, resistente ao calor, quimicamente estável, possui boa resistência mecânica e é leve, com a grande vantagem de também ser reciclável e ficar ainda mais resistente, quando usado como matriz em materiais compósitos com fibra de carbono.

O processo de polimerização é através da reação de aminas com paraformaldeídos. O processo pode ser utilizado com facilidade em larga escala com as estruturas já existentes no mercado, e é tão viável quanto não muito caro para ser adotado em escala comercial.

O PHT pode substituir os já existentes termofixos das demais aplicações, desde aparelhos eletrônicos até a indústria automotiva e aeroespacial, com a grande vantagem de evitar a contaminação do meio-ambiente com o descarte em aterros sanitários e outros processos de descarte [33].

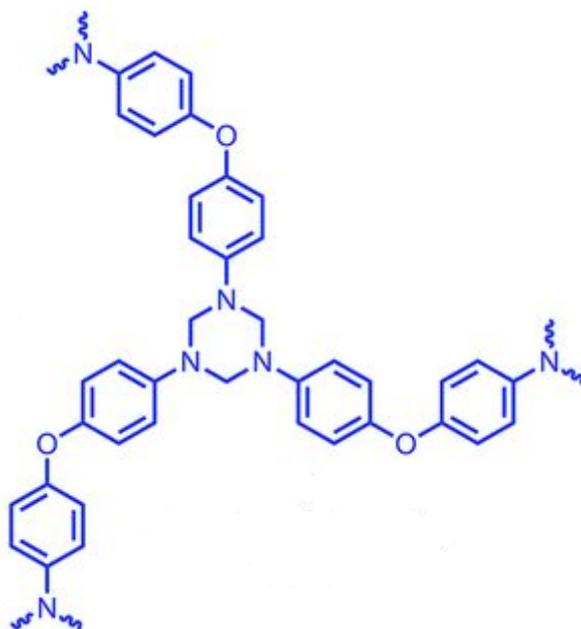


Figura 10: Estrutura do PHT, sua fórmula é $(CH_2NR)_3$, onde R é um grupo radical [34].

4.3. Ruas com piso de plástico

Uma inovação provável em um futuro próximo são as ruas com piso de plástico. O projeto é chamado de *PlasticRoad* e foi introduzido em 2015 pela cooperação de três empresas; KWS, Wavin e Total. Esse projeto prevê a construção de estradas feitas de plástico reciclado em estruturas leves, modulares e ocas. As unidades pré-fabricadas são fáceis de transportar, de montar e de manter. O fato de ser mais leve que o asfalto significa que o terreno dificilmente irá ceder. Além disso, quando os plásticos chegarem ao limite, podem ser reciclados novamente, contribuindo para uma economia circular e um ambiente mais limpo. O primeiro protótipo era esperado para o fim de 2017.

Devido à estrutura modular, esse tipo de estrada pode ser construída de forma muito mais rápida e sua manutenção também é bastante fácil, precisando substituir apenas a “peça” necessária, diferente do asfalto tradicional. O interior oco também é útil para armazenar temporariamente água da chuva, impedindo enchentes durante períodos de elevada precipitação; pode ser usado para construção de canos; passagem de cabos; construção de sensores; ou até mesmo cabos elétricos para recarregar carros elétricos. Esse tipo de estrada pode durar até 3 vezes mais do que aquelas construídas com materiais tradicionais, ao mesmo tempo que é 70% mais rápido de construir e manter, e 4 vezes mais leve também. Além disso, o piso plástico não é afetado por corrosão ou condições meteorológicas, e pode suportar temperatura ambiente entre -40°C até 80°C [35].



Figura 11: Imagem conceitual do projeto *PlasticRoad*. É possível observar a facilidade da construção e manutenção com a estrutura modular, e as possíveis aplicações ao utilizar o interior da estrutura [35].

4.4. Polímeros de regeneração autônoma

Polímeros estruturais são muito susceptíveis a danos na forma de trincas; que quando internas estas são muito difíceis de serem detectadas e o reparo é praticamente impossível. Independente da aplicação, assim que trincas surgem dentro do material polimérico, a integridade da estrutura é significativamente comprometida.

Uma das soluções encontradas para o problema da não identificação de danos estruturais é o uso de polímeros que se autorregeneram. Este material é incorporado com microcápsulas que contém agentes regeneradores, não especificados, que são liberados quando em contato com uma trinca. A polimerização do agente regenerador é acionada quando em presença de catalisadores. Os experimentos mostraram que 75% da resistência à fratura do material foi recuperada [36].

A Figura 12 ilustra o conceito. A regeneração ocorre na presença de microcápsulas e catalisadores químicos dentro da matriz polimérica. Quando a trinca se aproxima e rompe as microcápsulas, o agente regenerador vai preenchendo a trinca

através de forças de capilaridade. Em seguida, quando em contato com os catalisadores, ocorre a polimerização do agente, ligando as faces da trinca.

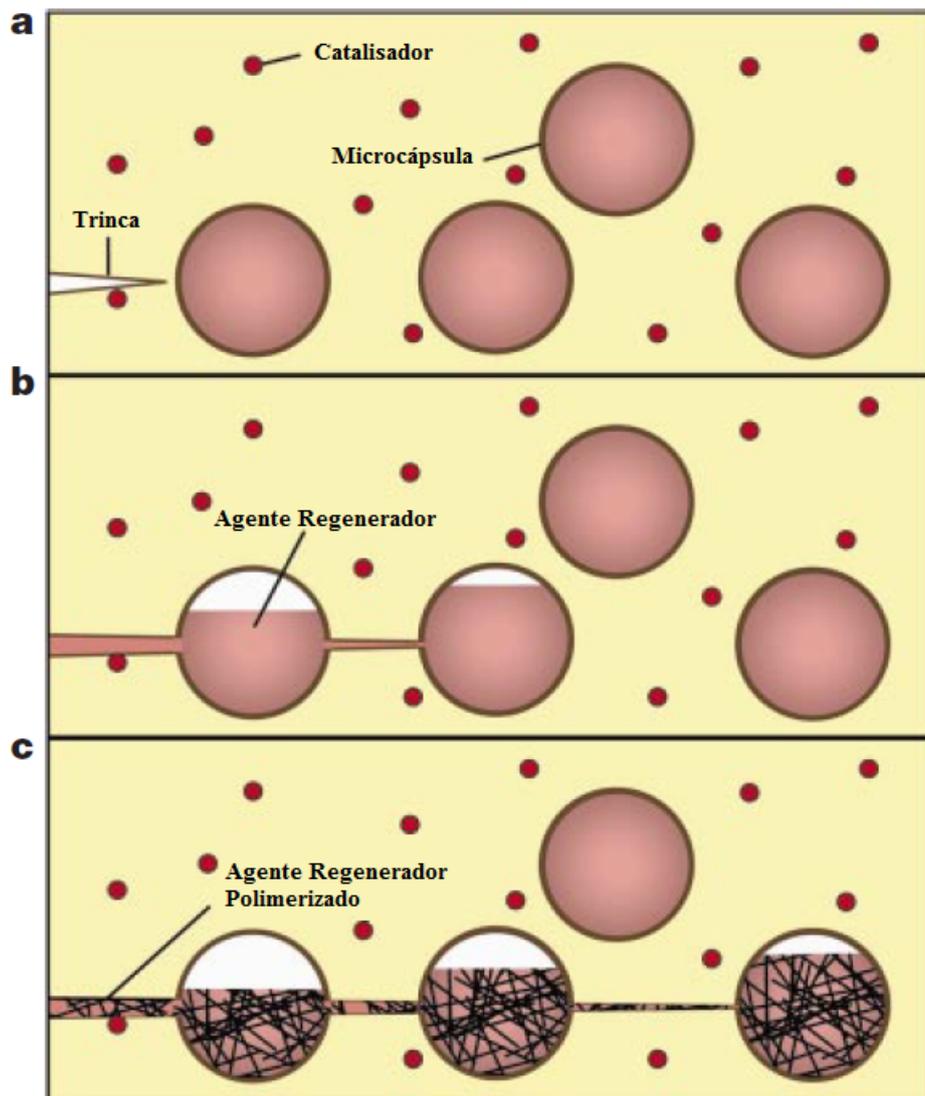


Figura 12: Ilustração do conceito de autorregeneração de polímeros [36].

5. Estudos de Caso

Esse capítulo é dedicado ao exame do cenário atual da coleta de resíduos no Estado do Rio de Janeiro, por meio de estudos de caso, onde foram realizadas três entrevistas, dois estudos e uma pesquisa.

5.1. Contextualização

Nossa primeira entrevista foi com a Cooperativa Popular Amigos do Meio Ambiente (COOPAMA), no bairro Maria da Graça (RJ) [37]. Grande parte dos resíduos é recebido de forma gratuita através da Comlurb, que por lei é obrigada a distribuir os resíduos coletados entre cooperativas. Antigamente, outra parte dos resíduos era comprada, mas com as atuais dificuldades, a totalidade é recebida gratuitamente ou coletada pelos cooperados.

Como será analisado mais à frente, a maioria dos resíduos é de plástico e papelão, e a triagem é realizada no próprio local, de forma manual, onde contam com 2 prensas hidráulicas e aguardam mais maquinário. A triagem é feita por tipo de material e de forma visual, o que sugere que o processo não é realizado da maneira mais efetiva.

Atualmente, o faturamento médio mensal da COOPAMA é da ordem de 60 mil reais, sendo que a maior parte é decorrente de projetos, como o projeto Ecobarreira, que com o auxílio de uma estrutura, feita de garrafas PET, bloqueia os resíduos que fluem em rios, para permitir o posterior recolhimento. A receita proveniente deste projeto é devido à coleta do material e não da venda para recicladoras.

Apesar de prestar um serviço de saúde pública, a COOPAMA, uma das maiores cooperativas do Estado, enfrenta diversas dificuldades, como lucro muito baixo, fazendo com que os cooperados, que são muito humildes, ganhem um salário irrisório. Muito deste baixo lucro é devido à baixa quantidade de material recebido pela cooperativa, grande parte vindo da Comlurb, e esta quantidade não é suficiente para o tamanho da mesma. Além disso, grande parte deste material também vem contaminado, sendo o principal inimigo o lixo orgânico, que além de deixar o local infestado de moscas, pode também inviabilizar a reciclagem do mesmo.

Ainda para mostrar a criticidade da situação, a COOPAMA recebe móveis que podem ser vendidos ou reaproveitados, e também objetos que vêm sendo armazenados para um futuro bazar; tudo isto para complementar a baixa receita da cooperativa.

Outras dificuldades são os custos elevados. Atualmente, 30% dos custos são

administrativos e 70% operacionais; e a cooperativa não tem nenhum subsídio, sendo responsável por despesas de luz, água, aluguel, etc. Algumas sugestões de melhoria são auxílio do governo para essas prestadoras de serviço público, fornecendo luz gratuitamente ou com alto desconto; ceder espaço para evitar alto gasto com aluguel, ou até indicar prestadores de serviço bancados pelo próprio governo. Outra necessidade é a qualificação dos cooperados, que precisam de capacitação e a COOPAMA não conta com parceiros para capacitá-los. Um projeto interessante é o Light Recicla, da empresa de energia Light, que troca resíduos por desconto na conta de luz de moradores de comunidades de baixa renda; esses resíduos são destinados às cooperativas como a COOPAMA, que não faz mais parte do projeto. No entanto, apesar de ser um projeto vantajoso, fomos informados que a Light cobra dessas cooperativas o material destinado, o que pode ter afastado a COOPAMA do projeto, assim como o custo logístico.

A segunda entrevista foi com a Recicloteca em Botafogo (RJ). A Recicloteca é um centro de informações sobre reciclagem e meio-ambiente criado pela ONG Ecomarapendi em 1991 e patrocinado pela Ambev desde 1993. Tem como objetivo difundir informações sobre questões ambientais, com ênfase na redução, reaproveitamento e reciclagem de resíduos. Além de um centro de informações, também realiza palestras em universidades e empresas, seminários, etc. A Recicloteca é uma grande difusora da filosofia 3R (reduzir, reutilizar e reciclar) [38].

Uma das dificuldades que as cooperativas sofrem, segundo a Recicloteca, é o baixo valor pago pelo material reciclado, muito porque as recicladoras precisam de quantidade, qualidade e frequência, o que só um depósito intermediário consegue prover. Uma possível solução seria uma união entre as cooperativas para conseguir preços mais competitivos e a frequência que as recicladoras necessitam. Além disso, a reciclagem é vista como custo e não como investimento; falta o reconhecimento pelo Estado do caráter sustentável prestado pelas cooperativas.

Por fim, foi realizada uma entrevista com o Recicla CT, uma iniciativa do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); que apesar do nome, não faz reciclagem de resíduos, e sim a coleta. Os resíduos coletados são do próprio Centro de Tecnologia, e encaminhados para o centro de triagem que há no mesmo, onde são conferidos, separados, prensados, pesados e depois enviados gratuitamente, com o apoio de um caminhão da Prefeitura Universitária (PU), para quatro cooperativas no Rio de Janeiro, selecionadas a partir de um processo seletivo bianual, desde que possuam licença ambiental.

Embora realize tudo isso, o Recicla CT quer ter uma diretoria de gestão ambiental,

visto que a UFRJ não tem uma política ambiental em nível universidade. Além disso, almeja um benefício econômico para a UFRJ, reciclando materiais orgânicos através da compostagem, por exemplo.

5.2. Estudo COOPAMA

Atualmente, a COOPAMA tem um histórico de receita mensal de R\$60 mil. No entanto, os dados recebidos, de parte da operação de julho à novembro de 2017, mostram que a venda dos resíduos gera uma receita de aproximadamente R\$27 mil por mês, mas como mencionado anteriormente, grande parte da receita vêm de projetos externos. Além disso, outra parte da receita vêm da venda de resíduos eletrônicos e outros tipos de venda, o que pode evidenciar um desequilíbrio entre o que devia ser a maior fonte de receita e o que é na prática. A massa média mensal é de aproximadamente 54 toneladas, considerando-se metais, papéis e papelões, plásticos e outros; desconsiderando-se resíduos eletrônicos e outros tipos de receita. Na análise, foram desconsiderados os meses de julho e novembro de 2017, visto que estes estão incompletos; dessa forma, o estudo leva em conta agosto, setembro e outubro de 2017.

A Tabela 4 mostra a comparação da porcentagem da receita e porcentagem da massa entre os materiais. É possível observar o potencial de receita que se pode obter com a venda de resíduos plásticos, que representam 49% da receita para uma massa coletada de 19%, bem superior ao dos demais materiais coletados.

Tabela 4: Comparação entre as classes de materiais analisados.

Material	Receita (%)	Massa (%)	R\$/kg
Plástico	49%	19%	R\$ 1,30
Papel/Papelão	48%	73%	R\$ 0,33
Metal	2%	6%	R\$ 0,14
Outros	1%	2%	R\$ 0,30

Realizando uma análise mais minuciosa, é possível tirar mais algumas informações interessantes. Dividindo a receita de cada categoria de material pela sua massa vendida, consegue-se um importante *Key Performance Indicator* (KPI), o preço por quilograma vendida (R\$/kg) de cada material, como mostrado na Tabela 4. Dessa forma, pode-se observar a discrepância desse indicador entre os plásticos e o segundo colocado, os papéis e papelões, sendo o primeiro quase quatro vezes mais rentável que o segundo.

Examinando mais a fundo a categoria de materiais plásticos, temos PET, polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP) e plástico filme. Com os

resultados da Tabela 5 podemos observar que o PET se destaca como o material com maior valor por quilograma vendido.

Tabela 5: Comparação entre os materiais plásticos coletados e analisados.

Material	R\$/kg	Massa (%)
PET	R\$ 1,78	35%
PEAD	R\$ 1,31	15%
PP	R\$ 1,04	14%
Plástico Filme	R\$ 0,92	36%

Dessa forma, podemos imaginar que caso uma cooperativa tenha algum tipo de restrição que a incapacite de coletar e vender, seja por espaço físico ou custo, por exemplo, a mesma pode decidir por focar em materiais plásticos - talvez até focando em apenas PET; ao se analisar esse caso específico, este parece ser um bom negócio, quando comparado com os outros materiais.

5.3. Estudo Recicla CT

Como mencionado anteriormente em nossa entrevista, o Recicla CT não vende seus resíduos, eles são distribuídos gratuitamente para cooperativas do município do Rio de Janeiro, portanto não haverá uma avaliação financeira deles.

Diferente do caso anterior, o Recicla CT conseguiu reunir dados de 2010 até 2016 para análise, e a base de dados contém os seguintes elementos: metais, papéis e papelões, plásticos, vidros, tetrapak, eletrônicos, óleo vegetal e outros. No entanto, eletrônicos e óleo vegetal foram desconsiderados pelo fato de serem de diferentes unidades.

De janeiro de 2010 até dezembro de 2016, o Recicla CT conseguiu coletar e distribuir aproximadamente 460 toneladas de resíduos, o que representa cerca de 5,5 toneladas por mês. A Tabela 6 apresenta as classes de materiais coletados e suas respectivas massas médias mensais.

Tabela 6: Peso médio mensal dos materiais coletados pelo Recicla CT, de janeiro de 2010 até dezembro de 2016.

Material	Massa Média Mensal (kg)	Representatividade (%)
Papel e Papelão	3436,2	63,0%
Metal	1072,3	19,6%
Plástico	434,0	7,9%
Vidro	24,0	4,5%
Tetrapak	14,7	0,3%
Outros	257,8	4,7%

É possível observar também que papéis e papelões são os materiais mais coletados, com massa bem superior aos plásticos, onde a razão chega a aproximadamente 7,9; esse valor é o quase o dobro do valor da COOPAMA, onde essa razão é da ordem de 3,9; sugerindo que papéis e papelões são os materiais mais coletados e reciclados.

Os dados da Tabela 7 representam a massa média mensal dos materiais plásticos, mostrando que o PET é o material com a maior representatividade, o que é bem próximo da representatividade do mesmo material no estudo da COOPAMA.

Tabela 7: Peso mensal dos materiais plásticos coletados pelo Recicla CT.

Material Plástico	Massa Média Mensal (kg)	Representatividade (%)
PET	147	33,8%
PP	101	23,4%
Plástico Filme	87	20,0%
PEAD	59	13,6%
PVC	20	4,6%
Alto Impacto	20	4,6%

5.4. Pesquisa no CT/UFRJ

Uma pesquisa foi realizada para entender o hábito de separação de resíduos dos estudantes do Centro de Tecnologia da UFRJ, onde até o momento da análise 279 pessoas responderam o formulário. O formulário da pesquisa buscava as seguintes informações: gênero, idade, local de residência, renda familiar, curso, situação acadêmica, se separava ou não os resíduos, e como era feita a separação e, se não era feita, qual era o porquê de não ser realizada. A idade, curso e situação acadêmica não se mostraram muito relevantes para a pesquisa e por isso foram posteriormente desconsiderados na análise dos resultados.

Das 279 pessoas que responderam, 44% afirmaram não separar os resíduos e 56% afirmaram separar. Das pessoas que disseram não realizar a separação do lixo, 80% alegaram que não há coleta seletiva aonde moram, o que pode ser uma proposta de melhoria para aumentar o índice de reciclagem. Já as pessoas que disseram separar o lixo, 69% afirmaram separar parcialmente os resíduos em recicláveis e orgânicos, 18% separação completa (papel, plástico, metal, vidro e orgânico) e 13% separação completa e eletrônicos.

Em relação a gênero, não houve diferença significativa entre homens e mulheres; o não para homens foi de 42% e para mulheres 46%; enquanto o sim foi de 58% e 54%, respectivamente. No entanto, dois resultados são interessantes de serem examinados: a porcentagem de separação considerando a renda familiar e o local que a pessoa passou a

maior parte da vida.

A Tabela 8 mostra a porcentagem das pessoas que separam os resíduos domésticos por renda familiar.

Tabela 8: Porcentagem das pessoas que separam os resíduos domésticos, de acordo com a renda familiar.

Renda Familiar	Sim	Não
Acima de R\$ 15.000	71%	29%
R\$ 7.801 a R\$ 15.000	63%	37%
R\$ 5.201 a R\$ 7.800	57%	43%
R\$ 2.601 a R\$ 5.200	39%	61%
R\$ 1.301 a R\$ 2.600	41%	59%
Até R\$ 1.300	60%	40%

É possível observar que quanto maior a renda familiar, maior a porcentagem de separação de lixo, sendo a única exceção as famílias com renda até R\$ 1300, o que pode sugerir que as pessoas com maior renda podem ter mais acesso à informação ou moram em lugares com melhor atendimento de coleta seletiva.

Podemos também analisar a Tabela 9 e verificar que as pessoas que viveram a maior parte do tempo na Zona Sul do Rio de Janeiro tendem a reciclar mais os resíduos domésticos, o que reforça a hipótese da renda e acesso à coleta seletiva.

Tabela 9: Porcentagem das pessoas que separam os resíduos domésticos, de acordo com o local onde viveram a maior parte da vida.

Maior Vivência	Sim	Não
Zona Sul	64%	36%
Zona Oeste	54%	46%
Zona Norte	51%	49%
Outra Cidade/Município	57%	43%
Outro Estado	67%	33%

Além disso, pessoas de outros Estados aparentam separar mais do que quem passou a maior parte do tempo no Rio de Janeiro, o que pode sugerir que o tamanho da população possa influenciar essa tomada de decisão, mas para isso seria necessário outro tipo de análise.

O propósito da pesquisa foi mais identificar possíveis causas da não separação do que realizar análises minuciosas, sendo o principal ponto de atenção a falta, ou alegação de que faltam coletas seletivas mais bem estruturadas pela cidade do Rio de Janeiro.

6. Conclusão

Quando se fala em sustentabilidade, os três pilares - econômico, social e ambiental - estão estreitamente conectados, visto que se não identificarmos uma vantagem econômica, direta ou indireta, no processo de reciclagem (pilar econômico), teremos uma conduta negativa que prejudicará o meio-ambiente (pilar ambiental), vindo a corromper nossa saúde e bem-estar (pilar social).

No entanto, o Brasil deu um grande passo no início desta década [39]. Em 2010, foi aprovada a Lei 12.305/2010, que constituiu um acordo entre empresas e o governo federal, para a implantação da logística reversa de produtos descartados pós-consumo, respeitando os três pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental. De acordo com a lei supracitada, a responsabilidade pela reciclagem é compartilhada entre o poder público, a população e as empresas que fabricam e comercializam produtos descartados após o uso, seguindo o fluxo representado na Figura 3. Além disso, os lixões devem ser extinguidos e somente os materiais que não podem ser recuperados devem ter como destino aterros sanitários. Vale ressaltar a marca atual de 21% dos plásticos pós-consumo reciclados (2012). A composição dos resíduos urbanos no Brasil pode ser ilustrada pela Figura 7. No entanto, essa lei estabelece apenas uma política de reciclagem para os resíduos sólidos, mas não engloba nenhuma penalidade às instituições que não se comprometerem com as diretrizes dessa lei. Temos, portanto, uma oportunidade de melhoria, onde devemos pressionar nossos governantes a conceberem leis complementares punitivas para quem não seguir essas diretrizes.

O grande desafio para a reciclagem é a logística reversa, que até alguns anos atrás não era de suma importância para as empresas; hoje é realizada com apoio de grandes empresas de renome internacional, como Ambev, BRF, Coca-Cola, Nestlé e McDonald's. Esse tipo de ação é de grande interesse das empresas, visto que hoje em dia há indivíduos que buscam produtos e serviços que possuam uma cadeia de suprimentos sustentável, isso é, que evitem emissão desnecessária de dióxido de carbono e outros poluentes à atmosfera, tal como o que ocorre muito na logística das empresas.

Essa logística reversa não seria possível sem a ajuda da população que contribuiu com a coleta seletiva, seja de porta a porta ou através de PEV's (Pontos de Entrega Voluntária); e das cooperativas, que contam com catadores dispostos a aumentar a eficiência das coletas.

Como mencionado no capítulo 5, dos estudos de caso, precisamos reconhecer a cadeia reversa de reciclagem como um serviço público prestado para a sociedade, e

oferecer subsídios financeiros para que mais pessoas se interessem pela área e o segmento de cooperativas cresça. Além disso, como vimos na pesquisa realizada entre estudantes do CT/UFRJ, podemos partir da hipótese que a maioria das pessoas não faz a separação de resíduos por falta de coleta seletiva no local de residência, ou indo até mesmo não sabem que existe. Por isso, é necessário expandirmos a área de atuação das coletas seletivas e reforçar que os condomínios, ou outra instituição, informem seus moradores da coleta, incentivando-os a participar desse serviço público. Mesmo se essas medidas aumentarem pouco a participação dos indivíduos, já será ótimo, visto que é plausível assumir que mais de 50% das pessoas no Brasil não têm esse hábito.

Mesmo diante de um cenário de incerteza, o Brasil vêm batendo a meta, estabelecida pelo governo Federal, de municípios beneficiados pela coleta seletiva e hoje já impacta aproximadamente 7% dos municípios brasileiros, onde 13% da população do Brasil é favorecida. Apesar de um número baixo em comparação com países desenvolvidos, é animador o crescimento da conscientização visto no Brasil, sendo desejável que não nos acomodemos no futuro próximo [27].

Não precisamos, necessariamente, buscar situações financeiramente desvantajosas, em prol do meio-ambiente. Como vimos, o mercado de reciclagem de plásticos, no Brasil, tem o potencial de gerar algumas dezenas de bilhões de reais por ano, e como demonstrado no capítulo 5, os plásticos possuem um ótimo KPI de preço por quilograma, dando uma ótima oportunidade de mercado a ser explorado.

A sumarização dos processos apresentados neste projeto de graduação busca introduzir o assunto, de forma a se encontrar um processo que seja economicamente viável, e que satisfaça a necessidade específica de uma situação.

Adicionalmente, as perspectivas futuras servem para nos lembrar que a criatividade é um motor a ser utilizado na busca pela melhora da qualidade de vida do ser humano e para mostrar que algumas técnicas inovadoras já estão próximas da realidade.

Este projeto deve servir como boa referência aos processos de reciclagem de um nicho de mercado de algumas dezenas de bilhões de reais, com oportunidade de impactar milhões de vidas, direta e indiretamente, de acordo com os três pilares da sustentabilidade.

Referências Bibliográficas

- [1] YOUNG, R. J., LOVELL, P. A. *Introduction to polymers*. CRC Press, 2011.
- [2] CANEVAROLO JR, S. V. *Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2 ed. São Paulo, BRA, Artliber Editora, 2006.
- [3] PLASTICS, M. *Thermoset and Thermoplastic Differences*. Disponível em: <http://www.modorplastics.com/thermoset-vs-thermoplastics>. Acessado em: 05 abr. 2017.
- [4] CALLISTER, W. D. *Materials science and engineering*. New York, John Wiley & Sons, 2007.
- [5] ASHBY, M. F., MARQUES, A. S., BUTTON, S. T. *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*. Rio de Janeiro, Brasil, Elsevier Editora Ltda., 2012.
- [6] BANK, W. *Waste Generation*. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/Chap3.pdf>. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [7] UNFPA. *World Population to Increase by One Billion by 2025*. Disponível em: <http://www.unfpa.org/news/world-population-increase-one-billion-2025>. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [8] WORLDOMETERS. *Current World Population*. Disponível em: <http://www.worldometers.info/world-population/>. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [9] STATISTA. *Global plastic production from 1950 to 2015*. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [10] MATTERS, P. *Waste in the UK and the world*. Disponível em: https://www.populationmatters.org/documents/waste_in_the_uk_and_the_world.pdf. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [11] STANFORD. *Benefits of Recycling*. Disponível em: <https://lbre.stanford.edu/pssistanford-recycling/frequently-asked-questions/frequently-asked-questions-benefits-recycling>. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [12] INSIGHT, P. *Brazil Processed Plastics Market*. Disponível em: <https://www.plasticsinsight.com/brazil-processed-plastics-market/>. Acessado em: 17 abr. 2017.

- [13] NEWSWIRE, P. *Plastics Market Worth \$654.38 Billion By 2020: Grand View Research, Inc.* Disponível em: <http://www.prnewswire.com/news-releases/plastics-market-worth-65438-billion-by-2020-grand-view-research-inc-511720541.html>. Acessado em: 12 abr. 2017.
- [14] FRANCIS, R. *Recycling of polymers : methods, characterization and applications.* Wiley-VCH, 2016.
- [15] GOODSHIP, V. *Introduction to plastics recycling.* Smithers Rapra, 2007.
- [16] AGUADO, J. *Feedstock recycling of plastic wastes.* Royal Society of Chemistry, 1999.
- [17] AZAPAGIC, A. *Polymers - The Environment and Sustainable Development.* J. Wiley, 2003.
- [18] GOODSHIP, V. *Management, recycling and reuse of waste composites.* CRC Press LLC., 2010.
- [19] INTERNATIONAL, C. *Energy recovery from waste plastics.* Disponível em: <http://www.chemikinternational.com/year-2013/year-2013-issue-5/energy-recovery-from-waste-plastics/>. Acessado em: 08 out 2017.
- [20] WEI, B. “Progress in research of comprehensive utilization of nonmetallic materials from waste printed circuit boards”, *Procedia Environmental Sciences*, v. 16, n. 16, pp. 500–505, 2012.
- [21] HOMESTEAD, N. *Plastic Bottle Homes and Greenhouses.* Disponível em: <https://www.niftyhomestead.com/blog/plastic-bottle-homes/>. Acessado em: 03 out 2017.
- [22] MOJTABA VALINEJAD SHOUBI, MASOUD VALINEJAD SHOUBI, A. S. B. “Investigating the Application of Plastic Bottle as a Sustainable Material in the Building Construction”, *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, v. 2, n. 1, pp. 28–34, 2013.
- [23] GUARDIAN, T. *The house that Tateh built ... out of sand-filled plastic bottles.* Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/30/house-tateh-built-sand-filled-recycled-waste-plastic-bottles-western-sahara->. Acessado em: 03 out 2017.
- [24] PICKERING, S. “Recycling technologies for thermoset composite materials—current status”, *School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering*, v. 50, n. 37, pp. 1206–1215, maio 2006.

- [25] PANYAKAPO, P. “Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete”, *Waste Management*, v. 28, n. 9, pp. 1581–1588, 2008.
- [26] TEMPO, O. *Brasil perde R\$ 120 bilhões por ano ao não reciclar lixo*. Disponível em: <http://www.otempo.com.br/capa/economia/brasil-perde-r-120-bilh%C3%B5es-por-ano-ao-n%C3%A3o-reciclar-lixo-1.1423628>. Acessado em: 27 jun 2017.
- [27] CEMPRE. *CEMPRE REVIEW 2015*. Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>. Acessado em: 29 out 2017.
- [28] PLASTIVIDA. *Brasil recicla mecanicamente 21% dos plásticos*. Disponível em: http://www.plastivida.org.br/images/releases/Release_091_Reciclagem_Plasticos_.pdf. Acessado em: 31 maio 2017.
- [29] VEJA. *Brasil piora em ranking e passa a ser o 6º com a energia mais cara do mundo*. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/blog/impavido-colosso/brasil-piora-em-ranking-e-passa-a-ser-o-6-com-a-energia-mais-cara-do-mundo/>. Acessado em: 04 jun 2017.
- [30] ABIPLAST. *Levantamento mapeia a reciclagem de plásticos no Brasil*. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/noticias/levantamento-mapeia-a-reciclagem-de-plasticos-no-brasil/20161006101952_L_493. Acessado em: 31 maio 2017.
- [31] BOMBELLI, P. “Recycling technologies for thermoset composite materials—current status”, *Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth Galleria mellonella*, v. 27, n. 8, pp. R292–R293, 2017.
- [32] ECONOMIST, T. *Plastic-eating caterpillars could save the planet*. Disponível em: <http://www.economist.com/news/science-and-technology/21721328-escape-shopping-bag-triggers-idea-plastic-eating-caterpillars-could>. Acessado em: 27 jun 2017.
- [33] CONVERSATION, T. *Recycling the ‘unrecyclable’: a new class of thermoset plastics*. Disponível em: <http://theconversation.com/recycling-the-unrecyclable-a-new-class-of-thermoset-plastics-26594>. Acessado em: 28 jun 2017.
- [34] WIKIWAND. *Polyhexahydrotriazine*. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/en/Polyhexahydrotriazine>. Acessado em: 28 jun 2017.
- [35] PLASTICROAD, E. *A Revolution in Building Roads*. Disponível em: <https://www.plasticroad.eu/en/>. Acessado em: 29 jun 2017.

- [36] WHITE, S. R. “Autonomic healing of polymer composites”, *Nature*, v. 409, n. 6822, pp. 794–797.
- [37] COOPAMA. *Site institucional*. Disponível em: http://www.coopama.com/crbst_8.html. Acessado em: 03 jan 2018.
- [38] RECICLOTECA. *Site institucional*. Disponível em: <http://www.recicloteca.org.br/>. Acessado em: 03 jan 2018.
- [39] EXAME. *15 países que dão lição em reciclagem de lixo*. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/mundo/15-paises-que-dao-licao-em-reciclagem-de-lixo/>. Acessado em: 29 out 2017.