

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ROTAS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E SEUS ASPECTOS
AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DA BIODEGRADAÇÃO

Juliana de Carvalho Dias

2016



ROTAS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E SEUS ASPECTOS AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DA BIODEGRADAÇÃO

Juliana de Carvalho Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadora: Alessandra Magrini

Rio de Janeiro
Outubro de 2016

ROTAS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E SEUS ASPECTOS
AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DA BIODEGRADAÇÃO

Juliana de Carvalho Dias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Alessandra Magrini, D.Sc.

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, D.Sc.

Prof. Gilson Brito Alves Lima, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2016

Dias, Juliana de Carvalho

Rotas de destinação dos resíduos plásticos e seus aspectos ambientais: uma análise da potencialidade da biodegradação/ Juliana de Carvalho Dias – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 76, p.:il.;29,7 cm

Orientadora: Alessandra Magrini

Dissertação (mestrado) –
UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético,
2016.

Referências Bibliográficas: p. 66

1. Biodegradação de PET 2. PET 3. Plásticos I.
Magrini, Alessandra. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético.
III Título

“Somente após a última árvore ser cortada.

Somente após o último rio ser envenenado.

Somente após o último peixe ser pescado.

Somente então o homem descobrirá que dinheiro não pode ser comido.”

(Provérbio indígena Cree)

Dedicatória

Dedico este Mestrado aos meus
pais e marido,
pelo constante incentivo e apoio em todos os
meus desafios, escolhas
e decisões.

Agradecimentos

A Deus por ter me dado a vida e ter me permitido continuar em minha vida acadêmica.

A meus pais Gloria e Luiz pelo amor incondicional e por terem me ensinado muitos valores sólidos, dentre eles o da importância do estudo e o da persistência.

A meu marido Michele por seu incansável apoio, dedicação e companheirismo nos momentos de dificuldade encontrados nesta jornada, com destaque para a disciplina de Física, que se mostrou ainda mais complexa do que no período de graduação em Engenharia.

Aos meus demais familiares que sempre se mostraram atentos e interessados no andamento de meu mestrado.

À minha orientadora Alessandra por a cada reunião me desafiar ainda mais, fazendo com que eu buscasse sempre o meu melhor.

Ao PPE, COPPE e UFRJ por terem me acolhido como aluna do curso de mestrado.

Aos professores do PPE por todo conhecimento que aprendi ao longo deste curso, com destaque para o professor Marcos Aurélio, que ainda me deu a honra de participar da banca de minha defesa.

À equipe da secretaria, com destaque para a Sandrinha, que sempre me socorreu quando necessário e com muito carinho.

Ao meu eterno professor, orientador e amigo Gilson que me apresentou ao mundo das pesquisas e também me deu a honra de participar da banca de minha defesa.

A PETROBRAS pela oportunidade de realizar este mestrado e por me introduzir no assunto de Biodegradação de PET, com destaque para as colegas de trabalho Aline e Gina.

Aos colegas de curso pelo companheirismo nas disciplinas e nos trabalhos em grupo.

Aos amigos e todas as pessoas que torceram pelo meu sucesso e acreditaram em mim.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ROTAS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E SEUS ASPECTOS AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DA BIODEGRADAÇÃO

Juliana de Carvalho Dias

Outubro/2016

Orientadora: Alessandra Magrini

Programa: Planejamento Energético

A produção mundial de plásticos aumentou de forma bastante acelerada nos últimos 50 anos, com destaque para a produção chinesa, responsável por $\frac{1}{4}$ da produção mundial. O PET tem se destacado dentre os plásticos por ser considerado o melhor e mais resistente plástico para fabricação de embalagens, que é uma das principais aplicações do plástico na atualidade. Infelizmente, este aumento de produção dos plásticos aliado à falta de programas de gestão adequada destes resíduos resulta no descarte inadequado deste material de grande durabilidade, gerando impactos ambientais e afetando também a saúde humana.

Buscando realizar uma análise da potencialidade da biodegradação dos plásticos é feita uma abordagem geral do mercado de plásticos no Brasil e no mundo e um panorama dos resíduos plásticos e suas rotas de destinação existentes, com destaque para a biodegradação. Como forma de exemplificação da aplicação desta tecnologia alternativa são apresentados alguns estudos de caso de biodegradação aplicada aos resíduos de PET. Apesar desta tecnologia ainda estar em desenvolvimento, ela vem recebendo destaques no meio científico e já se mostra bastante promissora.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PLASTIC WASTE DISPOSAL METHODS AND ITS ENVIRONMENTAL ASPECTS: AN ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF BIODEGRADATION

Juliana de Carvalho Dias

October/2016

Advisor: Alessandra Magrini

Department: Energetic and Environmental Planning

Global plastic production has increased very rapidly over the past 50 years, with emphasis on Chinese production, which accounts for $\frac{1}{4}$ of the world's plastic production. PET stands out from plastics because it is considered the best and most resistant plastic for packaging, which is a major plastics application today. Unfortunately, this plastic production increase coupled with a lack of proper waste management programs which results in an inappropriate disposal of this material, that generates environmental impacts and also affects human health.

In order to analyze the potential of plastic biodegradation a general approach of the plastics market in Brazil and the world and also an overview of plastic waste and its disposal methods is conducted, especially regarding biodegradation. There are some biodegradation studies applied to PET waste for exemplification. Although this alternative technology is still under development, it has received acknowledgement from the scientific community and it has proven quite promising.

Sumário

1.	Introdução.....	1
2.	A indústria do plástico.....	4
2.1.	Panorama Mundial.....	4
2.2.	Panorama Nacional	13
3.	Os plásticos e o PET: processos, características, produtos e aplicações	16
3.1.	Processos e características	16
3.2.	Os principais produtos e suas aplicações	18
3.2.1.	Embalagens	19
3.2.2.	Construção civil	22
3.2.3.	Demais setores.....	23
3.3.	O PET: Características, produção e produtos.....	23
4.	Gestão dos plásticos pós consumo.....	27
4.1.	Panorama mundial dos resíduos	27
4.2.	Os resíduos sólidos no Brasil	29
4.3.	Os plásticos pós consumo	31
4.4.	Rotas de destinação dos resíduos plásticos	36
4.4.1.	Aterros.....	37
4.4.2.	Reciclagem.....	38
5.	Os processos de degradação de polímeros.....	45
5.1.	Degradação física.....	46
5.2.	Degradação química.....	47
5.3.	Biodegradação	48
5.4.	Biodegradação: tecnologia alternativa e promissora.....	50

6.	Experiências de biodegradação de PET	53
6.1.	Projeto de biodegradação de PET por fungos – Universidade de Campinas (Unicamp), SP.	53
6.2.	Projeto de biodegradação de PET por larvas – Universidade de Stanford, EUA	54
6.3.	Projeto de biodegradação de PET por bactérias – Universidade de Yokohama, Japão	55
6.4.	Projeto de biodegradação do PET – Petrobras, Brasil	56
6.5.	Considerações sobre os projetos.....	58
7.	Conclusões e recomendações.....	59
	Referência Bibliográfica.....	64

Lista de figuras

Figura 1 – Cadeia petroquímica e do plástico.	17
Figura 2 – Simbologia utilizada para identificação de tipos de resinas plásticas.	17
Figura 3 – Estrutura molecular do polímero PET.	24
Figura 4 – Garrafas PET.....	25
Figura 5 – Cordas do varal e da vassoura feito com PET reciclável.....	27
Figura 6 – Participação das Regiões do País no Total de RSU Coletado.	30
Figura 7 – Carcaça de jovem Albatroz recheada de lixo plástico.	33
Figura 8 – Processos e rotas de destinação de plásticos.....	37
Figura 9 – Aterro sanitário.....	38
Figura 10 – Processo de biodegradação de Polímero.....	50
Figura 11 – Larva de besouro, conhecida como bicho-da-farinha.....	54

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação do panorama dos plásticos entre Europa, EUA e Brasil.	16
Tabela 2 – Principais resinas plásticas e suas aplicações e características.....	20
Tabela 3 – Tempo de degradação de alguns materiais.....	34
Tabela 4 – Demanda energética para produção de recipientes.	35
Tabela 5 – Demanda energética para produção de recipientes.	41
Tabela 6 – Percentual de água nos resíduos sólidos.....	41
Tabela 7 – Energias de ligação para algumas das ligações químicas mais frequentes em polímeros comerciais.	46

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Crescimento na produção global de plásticos 1950-2014 (em milhões de toneladas).....	4
Gráfico 2 – Produção global de plásticos 2004-2014 (em milhões de toneladas).....	5
Gráfico 3 – Produção mundial de plásticos em percentual.....	6
Gráfico 4 – Produção mundial de PET 2006-2014 (em milhões de toneladas).....	7
Gráfico 5 – Produção de plásticos na Europa 2004-2014 (em milhões de toneladas)...	7
Gráfico 6 – Principais consumidores de plásticos na Europa.....	8
Gráfico 7 – Consumo de plásticos por tipo de resina na Europa.....	9
Gráfico 8 – Produção de PET na Europa 2007-2014 (em milhões de toneladas).....	9
Gráfico 9 – Principais setores consumidores de Transformados Plásticos na Europa.	10
Gráfico 10 – Produção de plásticos nos Estados Unidos 2004-2015 (em milhões de toneladas).....	11
Gráfico 11 – Distribuição de plásticos por segmento nos Estados Unidos.....	11
Gráfico 12 – Consumo de plásticos por tipo de resina nos Estados Unidos.....	12
Gráfico 13 – Demanda da resina de PET nos Estados Unidos 2007-2014 (em milhões de toneladas).....	12
Gráfico 14 – Produção de transformados plásticos no Brasil 2007-2015 (em milhões de toneladas).....	13
Gráfico 15 – Aplicações do plástico por tipo de resina e percentual de consumo.....	14
Gráfico 16 – Principais setores consumidores de Transformados Plásticos no Brasil.	14
Gráfico 17 – Produção de PET no Brasil 2000-2015 (em milhões de toneladas).....	15
Gráfico 18 – Produção de embalagens por tipo de matéria prima.....	21
Gráfico 19 – Percentual de geração de lixo por região em 2011.....	27
Gráfico 20 – Composição do lixo mundial.....	28
Gráfico 21 – Composição do lixo brasileiro.....	31

Gráfico 22 – Percentual de reciclagem de PET 2000-2015..... 40

Lista de siglas

ABRE: Associação Brasileira de Embalagens

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABETRE: Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos

ABIPET: Associação da indústria do PET ABIPLAST: Associação Brasileira da Indústria do Petróleo

ABIQUIM: Associação Brasileira da Indústria Química

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACC: American Chemistry Council

BBC: British Broadcasting Corporation

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CEMPRE: Compromisso Empresarial para Reciclagem

CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CMAI: Chemical market associates, Inc.

UNEP: United Nations Environment Programme

WRAP: Waste and Resources Action Programme

WEF: World Economic Forum

1. Introdução

Antes da Revolução Industrial, apenas sobras de alimento compunham o lixo produzido. A partir deste marco, todo material descartado pela sociedade passou a compor o lixo. Foram sendo incorporados novos materiais como, por exemplo, vidros, plásticos, isopor, borrachas, alumínio, dentre outros de difícil decomposição.

Esta revolução possibilitou um maior conforto e bem-estar humano, mas por outro lado, aumentou a quantidade de resíduos gerados e não utilizados pelo homem. Muitos destes resíduos são depositados em aterros, provocando a contaminação do meio ambiente e oferecendo riscos à saúde humana principalmente nas áreas urbanas.

A partir da metade do século passado começamos a entender que vivemos em um espaço limitado constituído de água, terra e ar. A cada século que passa a nossa capacidade de produzir bens de consumo aumenta progressivamente, mas a quantidade de recursos naturais é sempre a mesma. Por outro lado, o aumento da produção de bens de consumo incrementa também a quantidade de rejeitos originados na extração das matérias-primas, fabricação, utilização e descarte de produtos. (VALT, 2007).

O tema dos resíduos sólidos nos centros urbanos vem assumindo papel de destaque entre as demandas da sociedade por inúmeras razões. Dentre elas os aspectos relacionados à veiculação de doenças, a possibilidade de contaminação de cursos d'água, solo e lençóis freáticos e mortandade de animais. Em países de menor desenvolvimento, há as questões sociais ligadas aos catadores, em especial às crianças que vivem nos lixões e também as pressões oriundas das atividades turísticas.

Diante do exposto, fica claro que a gestão de resíduos é uma questão que envolve os âmbitos social, ambiental, econômico e de saúde. Desta forma, o Governo e também a própria Sociedade começam a se mobilizar para enfrentar este problema.

Foram produzidos 1,3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no mundo em 2011, sendo somente os plásticos responsáveis por cerca de 10% de todo o resíduo gerado (World Bank, 2012).

Como se pode observar, os plásticos possuem uma representativa parcela na composição dos resíduos sólidos gerados. Este fato merece bastante atenção, pois

como o material plástico é difícil de ser compactado, ele ocupa um grande volume do lixo, dificultando a decomposição dos demais materiais.

Além disso, caso este resíduo seja descartado de forma incorreta, a alta resistência e durabilidade do plástico podem acabar impactando negativamente o meio ambiente, pois sua degradação pode levar muitos anos. Outro ponto de preocupação é que os próprios processos de produção do plástico e o de incineração pós uso emitem gases do Efeito Estufa.

Desta forma, diante dos potenciais impactos relacionados à gestão dos resíduos plásticos e até mesmo à sua cadeia produtiva, a reciclagem se mostra como uma prática de extrema importância na busca da preservação do meio ambiente. Este processo possui algumas tipologias, que serão abordadas ao longo deste trabalho.

Dentre os resíduos plásticos abordados neste trabalho, é dada ênfase ao PET, pois este material tem sido considerado o melhor e mais resistente plástico para fabricação de embalagens, podendo ser utilizado para diversas aplicações.

Desta forma, este material tem tido um alto consumo nos últimos anos e vem sem bastante estudado. Em 2011 foram consumidas 572.000 toneladas de PET no Brasil (ABIPET, 2012).

Os resíduos plásticos são responsáveis por 11% da composição gravimétrica da coleta seletiva feita em todo o Brasil, sendo que somente o PET seria responsável por 42% de todos os plásticos coletados (CEMPRE, 2016).

Já em termos de reciclagem, o índice de reciclagem do PET no Brasil em 2012 foi de 58,9%, correspondendo ao valor de 331.000 toneladas. Em 2011, o valor foi de 57,9%, alcançando o segundo lugar mundial. O país com maior índice de reciclagem no mundo foi o Japão, com 77,9% (ABIPET, 2013).

Em muitos países, os consumidores podem comprar refrigerantes envasados em garrafas de PET produzidas com percentuais variados de material reciclado (CEMPRE, 2016).

O objetivo geral desta dissertação é uma análise da potencialidade do processo de biodegradação dos plásticos. Os objetivos específicos são um panorama geral do mercado de plásticos, a abordagem do pós uso dos plásticos, a avaliação das diferentes rotas de destinação de resíduos plásticos e a demonstração de alguns estudos de caso de biodegradação aplicada ao PET.

A metodologia aplicada neste trabalho foi bibliográfica e exploratória. No âmbito bibliográfico, foi realizada uma ampla pesquisa de material por meio de uma revisão da Literatura sobre o tema, utilizando livros, artigos científicos e sites da internet.

As principais fontes de pesquisa para a busca de informações para esta dissertação são as plataformas Science Direct (<http://www.sciencedirect.com/>), Biblioteca Digital da Unicamp (<http://www.sbu.unicamp.br/>), Royal Society Publishing (<https://royalsociety.org/journals/>), Research Gate(<https://www.researchgate.net/>) e os sites das instituições ABIPET (<http://www.abipet.org.br/index.html>) , ABIPLAST (<http://www.abiplast.org.br/>) , WEF (<https://www.weforum.org/>) e Plastic Europe (<http://www.plasticseurope.org/>).

Estes destaques e as demais fontes utilizadas podem ser vistas em mais detalhes na parte das referências bibliográficas. No âmbito exploratório, foram analisados quatro projeto com experiência em biodegradação de PET.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo aborda a situação atual da indústria do plástico no Brasil e no Mundo. Englobando um panorama quantitativo e qualitativo de sua produção, setores econômicos e tipos de resina fabricados.

Para as análises internacionais foram escolhidos o Continente Europeu e os Estados Unidos (EUA). Estes representantes foram selecionados com base em seu desenvolvimento econômico e social.

O segundo discorre sobre os plásticos, a cadeia petroquímica e plástica, as características de cada tipo de plástico e os produtos e aplicações disponíveis. Os principais setores econômicos de aplicação do plástico no Brasil e no mundo são abordados.

O terceiro capítulo faz um panorama dos resíduos sólidos e sua composição no Brasil e no mundo e aborda especificamente os resíduos plásticos. Posteriormente são mostradas as rotas existentes para a destinação dos resíduos plásticos.

No quarto capítulo apresentam-se os processos de degradação existentes, o físico, químico e o biológico. Concluindo com as justificativas de porque a biodegradação é vista como uma tecnologia alternativa e promissora para os resíduos plásticos.

No quinto capítulo, são relatados alguns estudos na área de biodegradação do PET que vem sendo conduzidos no mundo. As referidas experiências foram

desenvolvidas no Brasil, na universidade Unicamp e na empresa Petrobras e no mundo nos países Japão e EUA. Os microorganismos usados nestes casos foram fungos, larvas e bactérias. Ao fim do capítulo são feitas algumas considerações sobre os projetos.

No último capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação e são feitas algumas recomendações a respeito.

2. A indústria do plástico

2.1. Panorama Mundial

A produção de plásticos aumentou vertiginosamente nos últimos 50 anos (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016). No gráfico 1, pode-se verificar que em 1964 a produção era de 15 milhões de toneladas. Já em 2014, esta produção passou para 311 milhões de toneladas (PLASTIC EUROPE, 2015).

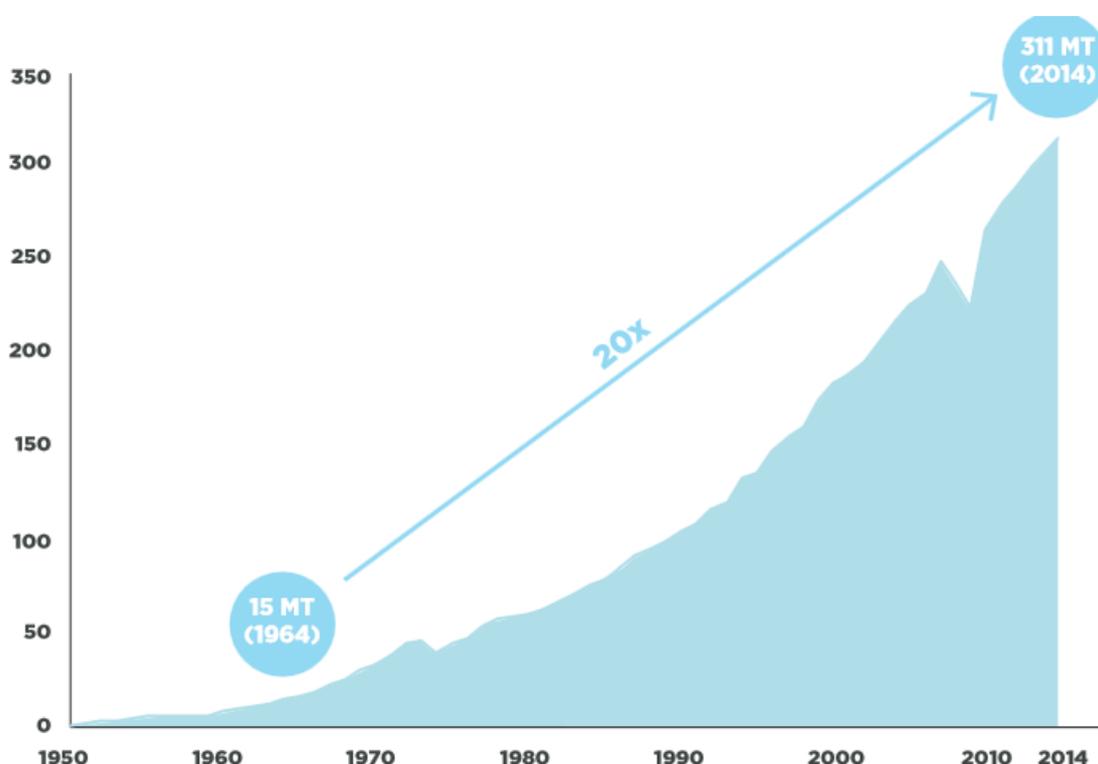


Gráfico 1 – Crescimento na produção global de plásticos 1950-2014 (em milhões de toneladas).

Fonte: Plastic Europe, 2015.

A expectativa é que até 2050 esta produção chegue a 1.124 milhões de toneladas e que o setor de plástico passe a ser responsável por 20% do consumo total de petróleo, considerando uma taxa esperada de crescimento da demanda total de petróleo de 0,5% ao ano (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

A projeção feita para 2050 também engloba outros indicadores. Um deles é a proporção entre resíduos plásticos descartados no oceano e a quantidade de peixes no local, em peso absoluto. Em 2014 esta taxa era de 1 plástico para 5 peixes. Em 2050 esta taxa seria de 1 plástico para 1 peixe (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

O outro indicador apresentado foi o percentual do carbono emitido cuja responsabilidade era dos plásticos, seja por sua produção ou incineração pós uso. Em 2014 os plásticos eram responsáveis por 1% de todo o carbono emitido. Já em 2050 esta taxa seria de 15% (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

O gráfico 2 retrata a produção mundial total de plásticos nos últimos anos em milhões de toneladas.

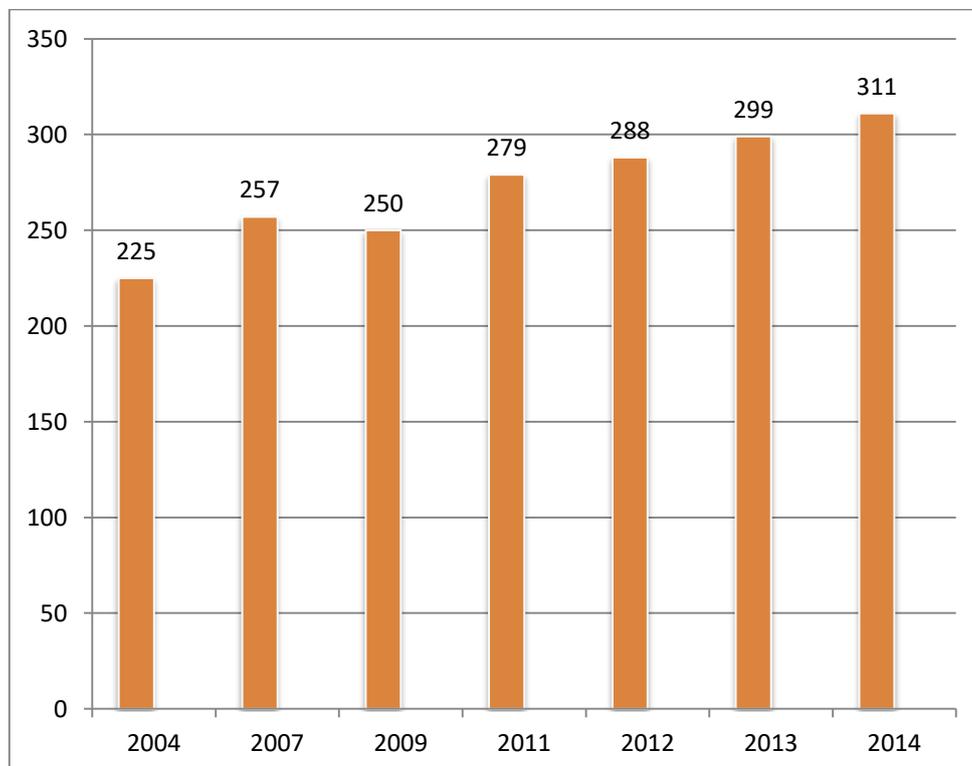


Gráfico 2 – Produção global de plásticos 2004-2014 (em milhões de toneladas).
Fonte: Elaboração própria a partir da Plastic Europe, 2015.

Segundo dados do gráfico 2, o crescimento médio da produção de plásticos ao longo do período foi de 5,7% ao ano.

No gráfico 3 é possível observar a distribuição percentual desta produção de plásticos por regiões.

Conforme pode-se verificar no gráfico 3, somente a China é responsável por $\frac{1}{4}$ da produção mundial de plásticos. Já a Europa ocupa a posição de segundo lugar e o Brasil apresenta um percentual de 2,4%.

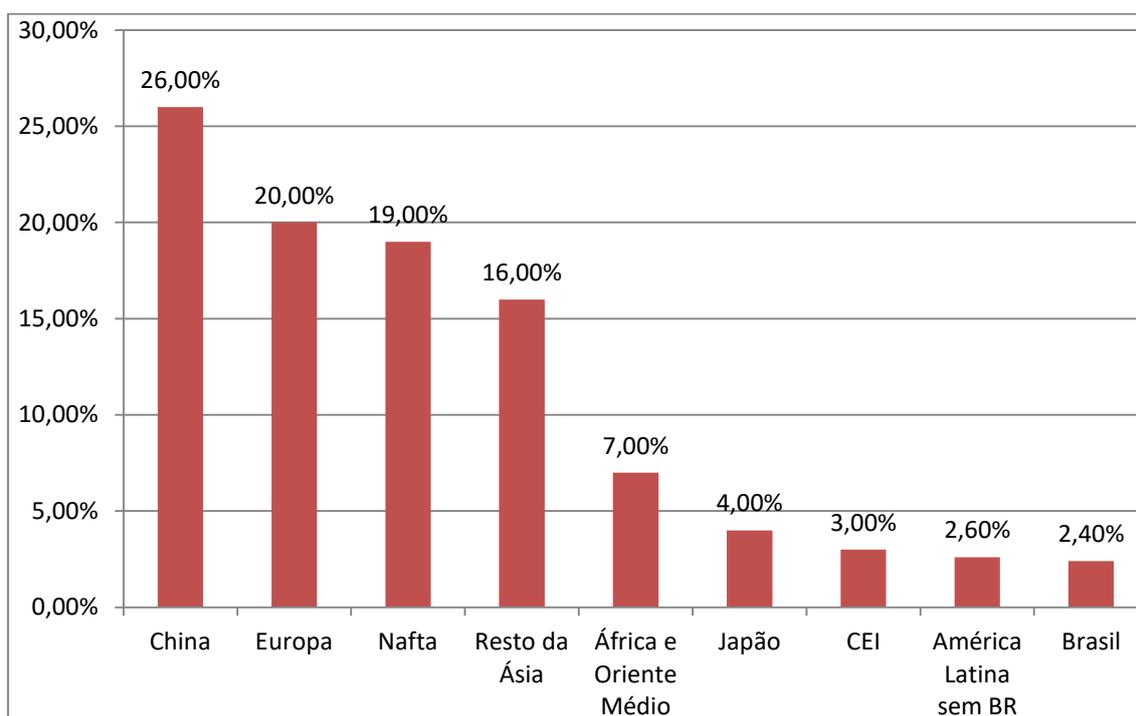


Gráfico 3 – Produção mundial de plásticos em percentual.

Fonte: Elaboração própria a partir de Plastics Europe, 2015.

Nota: A CEI compreende os países Armênia, Belarus, Cazaquistão, Federação Russa, Moldávia, Quirguistão, Tadjiquistão, Turcomenistão, Ucrânia, Uzbequistão, Geórgia e Azerbaijão. A NAFTA compreende EUA, México e Canadá.

O gráfico 4 retrata a produção mundial de PET no período de 2006 a 2014.

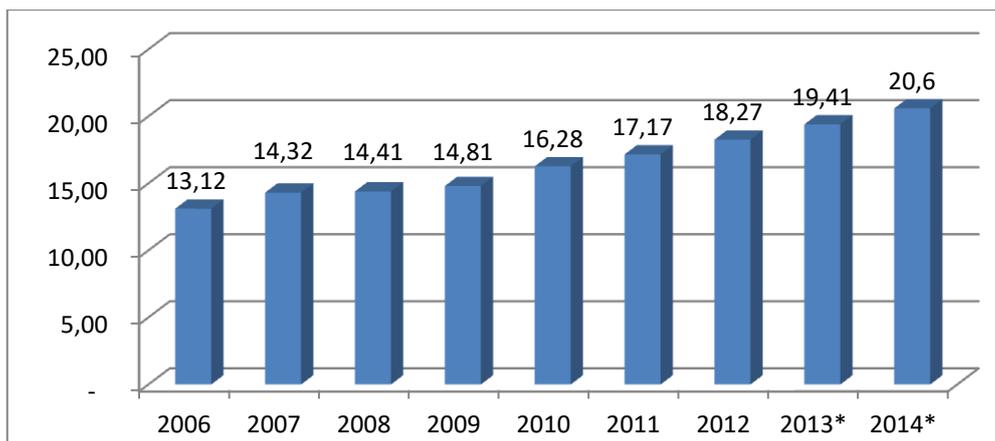


Gráfico 4 – Produção mundial de PET 2006-2014 (em milhões de toneladas).
 Fonte: Elaboração própria a partir de Chemical Market Associates Inc (CMAI), 2012.

Segundo dados do gráfico 4, o crescimento médio da produção de PET ao longo do período foi de 0,9% ao ano. Ao comparar os valores de produção mundial do PET com os de produção mundial de plásticos, verifica-se que em média o PET é responsável por cerca de 6% da produção total de plásticos no mundo.

Passando para uma análise dos plásticos de maneira mais regional, segundo dados de 2015 da Plastic Europe, a demanda de plásticos na Europa no período de 2004 a 2014 em milhões de toneladas pode ser vista no gráfico 5.

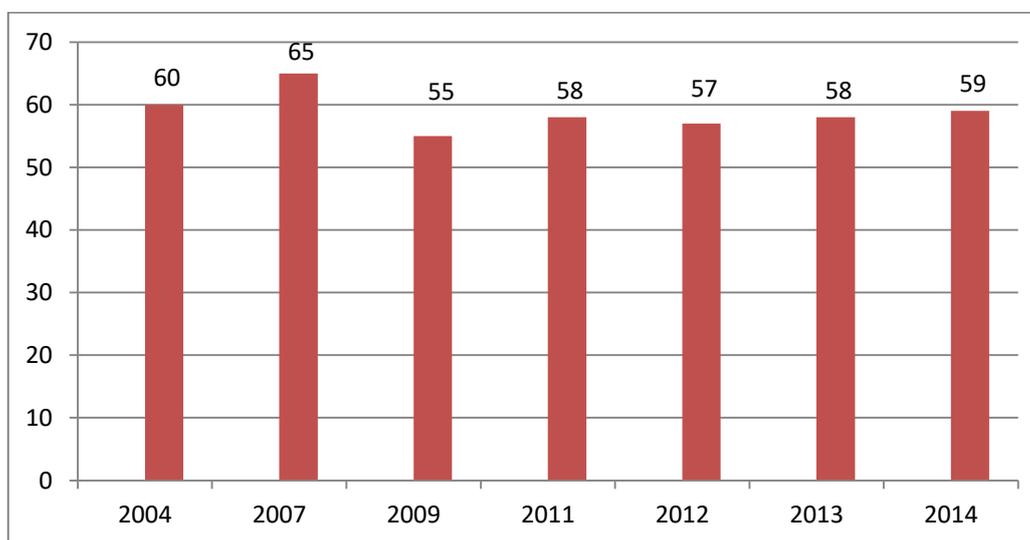


Gráfico 5 – Produção de plásticos na Europa 2004-2014 (em milhões de toneladas).
 Fonte: Elaboração própria a partir de Plastics Europe, 2015.

O crescimento médio da produção de plásticos na Europa foi de 1,8% ao ano nos últimos anos.

O gráfico 6 apresenta quais são os principais países consumidores na Europa. Somente a Alemanha é responsável por ¼ de todo este volume de consumo.

O gráfico 7 apresenta o percentual de consumo de cada tipo de resina na Europa. As resinas mais utilizadas são polietileno (PE), incluindo o de baixa densidade (PEBD), de média densidade (PEMD), linear de baixa densidade (PEBDL) e de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), PVC, poliestireno (PS), poliuretano (PU) e PET.

Conforme gráfico 7, na Europa, o PET é responsável por 7% de todas as resinas consumidas. No gráfico 8 é possível observar a distribuição da produção de PET na Europa nos anos de 2007 a 2014.

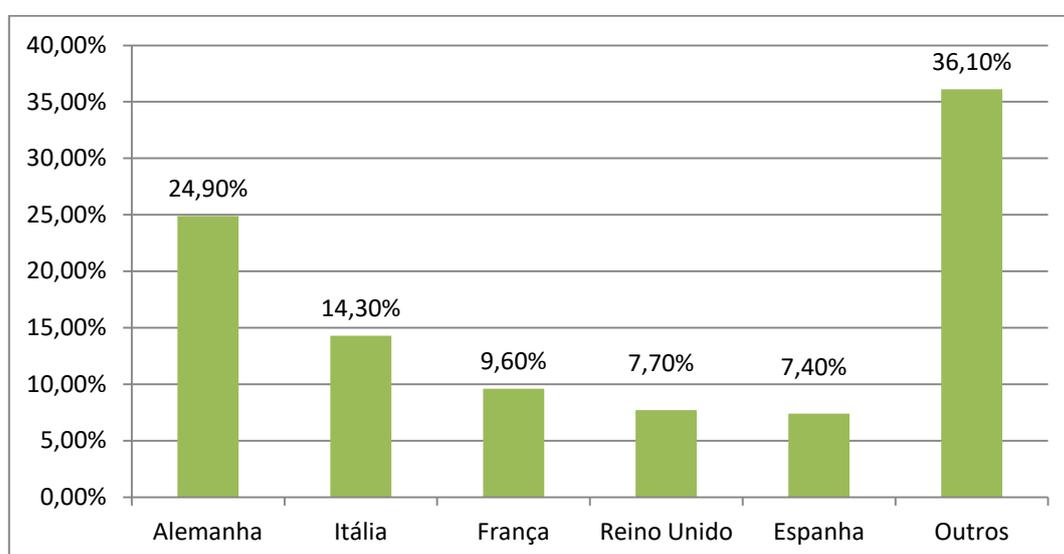
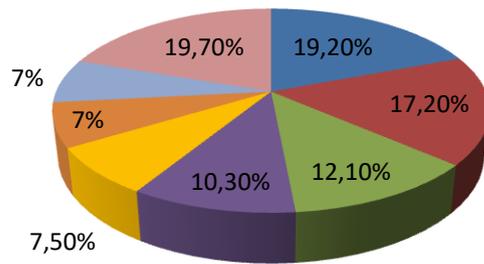


Gráfico 6 – Principais consumidores de plásticos na Europa.
Fonte: Elaboração própria a partir de Plastics Europe, 2015.

O crescimento médio da produção de PET na Europa no referido período foi de 0,8% ao ano.

Outra forma de avaliação do consumo de plásticos é pelo consumo de plásticos por segmento, na Europa, o setor de embalagens continua na liderança, seguido pelos setores de construção civil, automóveis, eletro-eletrônicos e agricultura, de acordo com informações de 2015 da Plastic Europe, conforme pode ser visto no gráfico 9.



- Polipropileno (PP)
- Polietileno de baixa densidade (PEBD) e linear de baixa densidade (PEBDL)
- Polietileno de média densidade (PEMD) e de alta densidade (PEAD)
- PVC
- Poliuretano (PU)
- Poliestireno (PS)
- PET
- Outros

Gráfico 7 – Consumo de plásticos por tipo de resina na Europa.
 Fonte: Elaboração própria a partir de Plastics Europe, 2015.

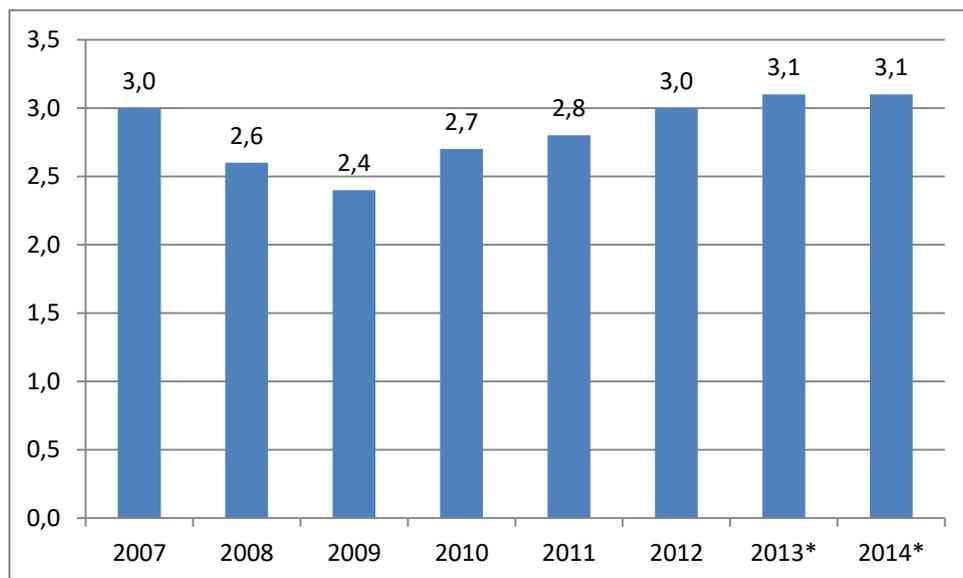


Gráfico 8 – Produção de PET na Europa 2007-2014 (em milhões de toneladas).
 Fonte: Elaboração própria a partir de Polyester Analysis Ltd, 2013.

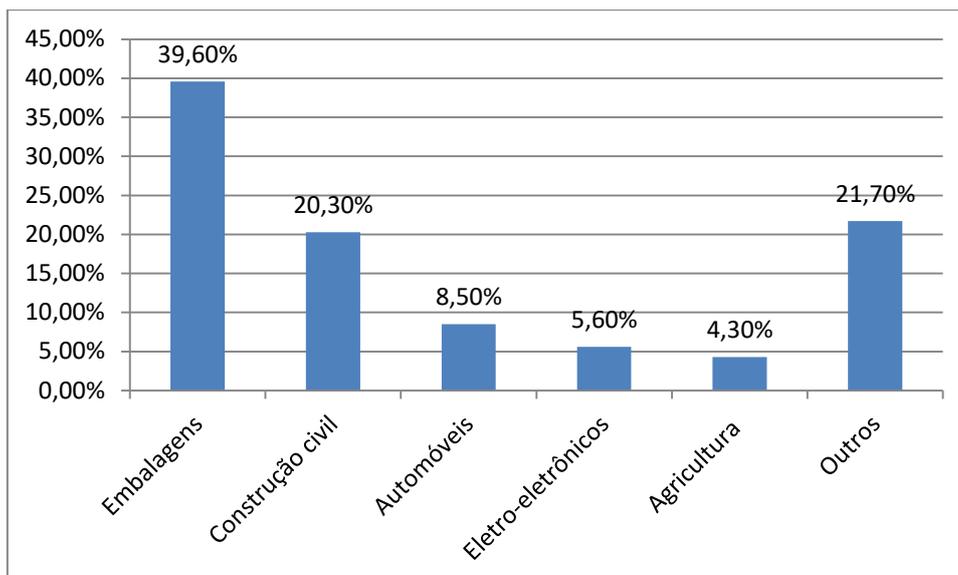


Gráfico 9 – Principais setores consumidores de Transformados Plásticos na Europa.
 Fonte: Elaboração própria a partir de Plastics Europe, 2015.

A indústria de plásticos gera 1,45 milhões de empregos diretos em toda a Europa e é formada por aproximadamente 60.000 companhias. O grau de inovação desta indústria é bem elevado, chegando a ocupar posição entre as 5 indústrias mais inovadoras (PLASTIC EUROPE, 2015).

Com relação aos EUA, a indústria de plásticos é a terceira maior indústria do país e emprega cerca de 900 mil trabalhadores (SOCIETY OF THE PLASTICS INDUSTRY, 2016).

A produção de plásticos em 2014 foi de 52,7 milhões de toneladas e a de 2015 de 54 milhões de toneladas (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2016).

Os Estados Unidos são responsáveis por 17% de toda a produção mundial de plástico e em 2012 sua produção foi de 48,1 milhões de toneladas. Este percentual foi ratificado pela produção de 2012, 2014 e 2015 (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2013).

Assim, diante da ausência de mais dados de produção dos EUA e tomando como base o percentual de 17% e os dados de produção de 2012, 2014 e 2015, é possível estimar a produção de plásticos americana nos anos anteriores. Esta projeção pode ser vista no gráfico 10.

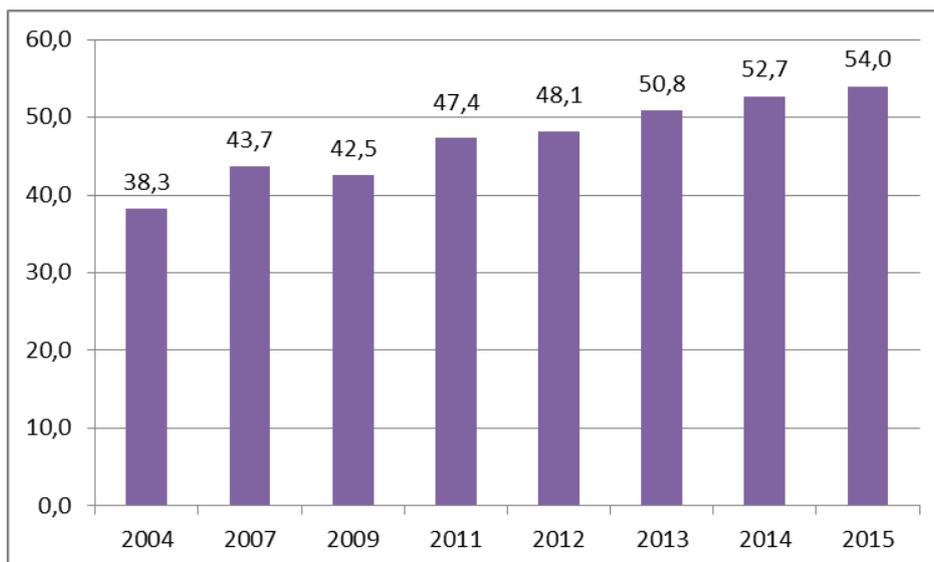


Gráfico 10 – Produção de plásticos nos Estados Unidos 2004-2015 (em milhões de toneladas).
 Fonte: Elaboração própria a partir de American Chemistry Council, 2013 e 2016.

O crescimento médio da produção de plásticos nos EUA no referido período foi de 5,2% ao ano. Analisando-se a produção de plásticos americana por segmento, o setor com maior demanda é o de embalagens plásticas, seguida Consumidor e institucional, exportação e pela construção civil. Esta distribuição é bastante semelhante à estrutura da União Europeia. O gráfico 11 apresenta Distribuição de plásticos por segmento nos Estados Unidos em 2015.

Em relação à demanda por resina nos EUA, o gráfico 12 apresenta a demanda por tipo de resina termoplástica em 2015.

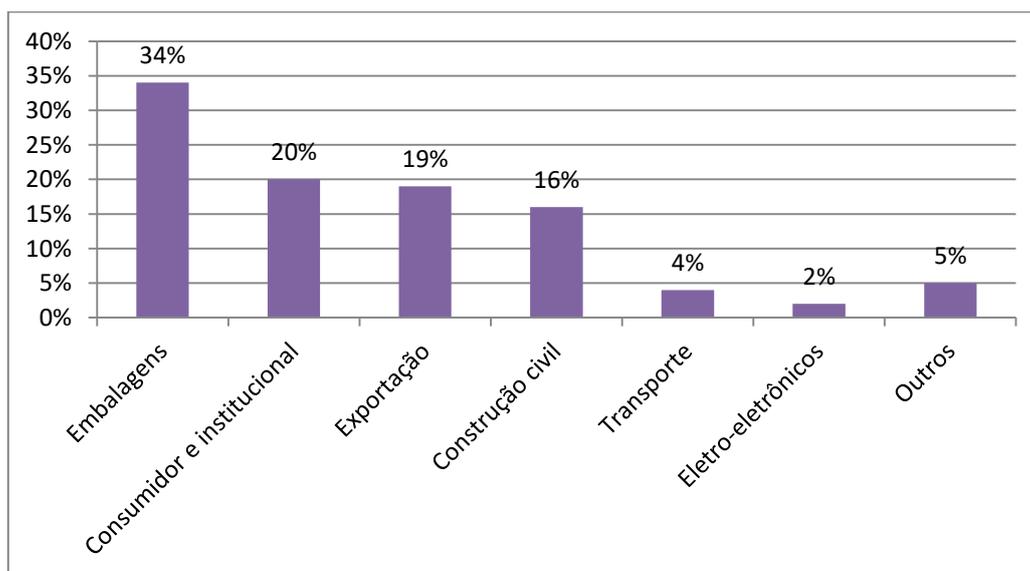


Gráfico 11 – Distribuição de plásticos por segmento nos Estados Unidos.
 Fonte: Elaborado a partir American Chemistry Council, 2016

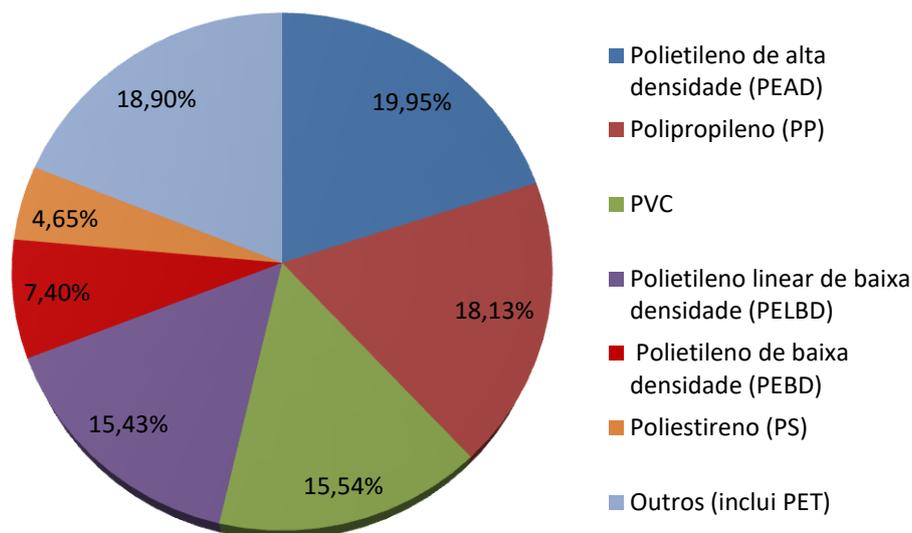


Gráfico 12 – Consumo de plásticos por tipo de resina nos Estados Unidos.
 Fonte: Elaborado a partir American Chemistry Council, 2016.

Pode-se observar no gráfico 13 a demanda anual de PET nos EUA.

A produção e demanda de PET na América do Norte são muito próximas ao equilíbrio e as exportações e importações se compensam (POLYESTER ANALYSIS LTD, 2013).

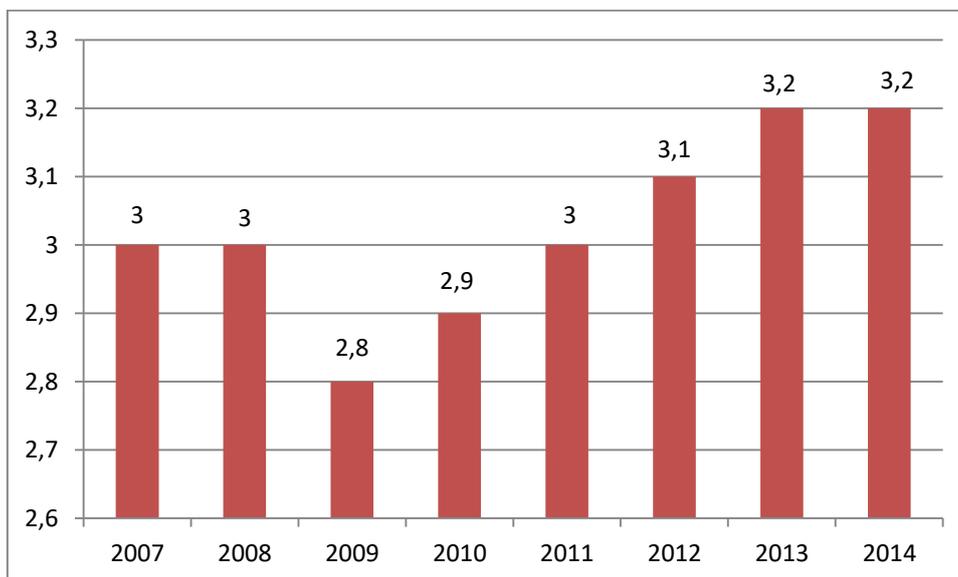


Gráfico 13 – Demanda da resina de PET nos Estados Unidos 2007-2014 (em milhões de toneladas).

Fonte: Elaborado a partir Polyester Analysis, 2013 e 2016.

O crescimento médio da demanda de PET nos EUA no referido período foi de 1 % ao ano.

2.2. Panorama Nacional

No gráfico 14 é possível observar a evolução da produção de transformados plásticos desde 2007 em milhões de toneladas.

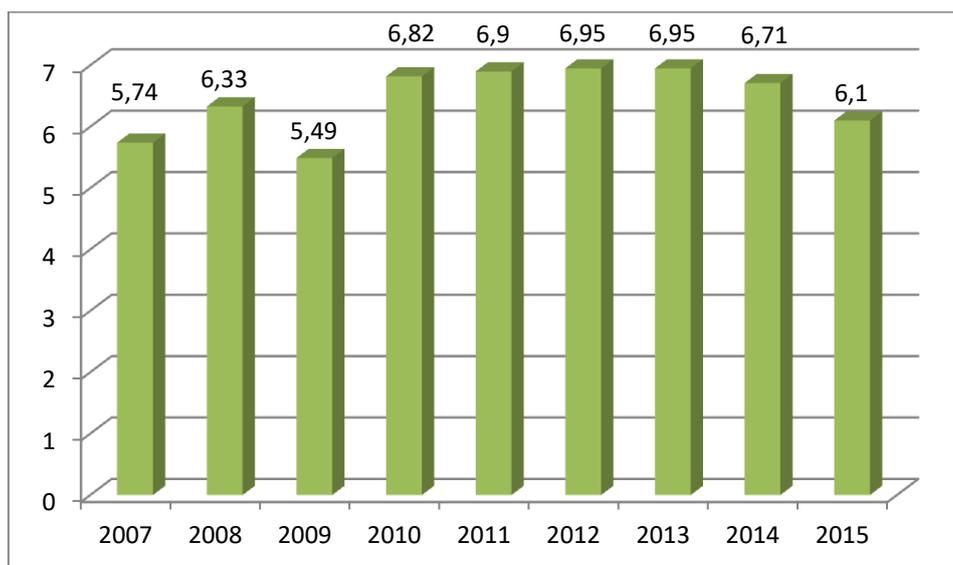


Gráfico 14 – Produção de transformados plásticos no Brasil 2007-2015 (em milhões de toneladas).

Fonte: Elaborado a partir de ABIPLAST, 2014 e 2016.

O crescimento médio da produção de plásticos no Brasil no referido período foi de 1,3% ao ano.

O setor de transformados plásticos possui mais de 11,5 mil empresas distribuídas por todo o Brasil e emprega cerca de 352.000 pessoas (ABIPLAST, 2014).

Aproximadamente 92% do volume total de produção de plástico no Brasil está concentrado nas empresas de grande porte. Os estados que possuem o maior número de empresas do setor de transformados plásticos são: São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

O gráfico 15 apresenta as principais aplicações do plástico por tipo de resina e o percentual de consumo de cada resina. Os mais consumidos são os polietilenos, polipropilenos e PVC.

A versatilidade do material plástico é comprovada pela sua presença em segmentos industriais distintos que permeiam toda a matriz industrial.

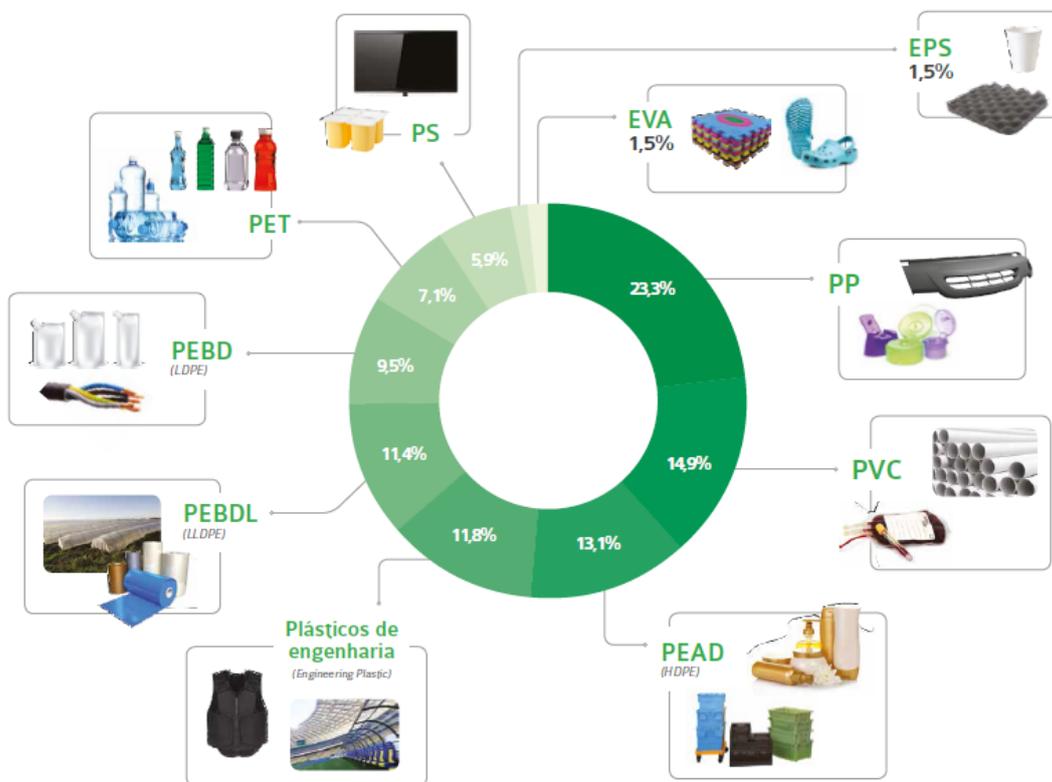


Gráfico 15 – Aplicações do plástico por tipo de resina e percentual de consumo.
 Fonte: Abiplast, 2015.

No gráfico 16 pode-se observar o consumo de plástico por setores da economia no Brasil.

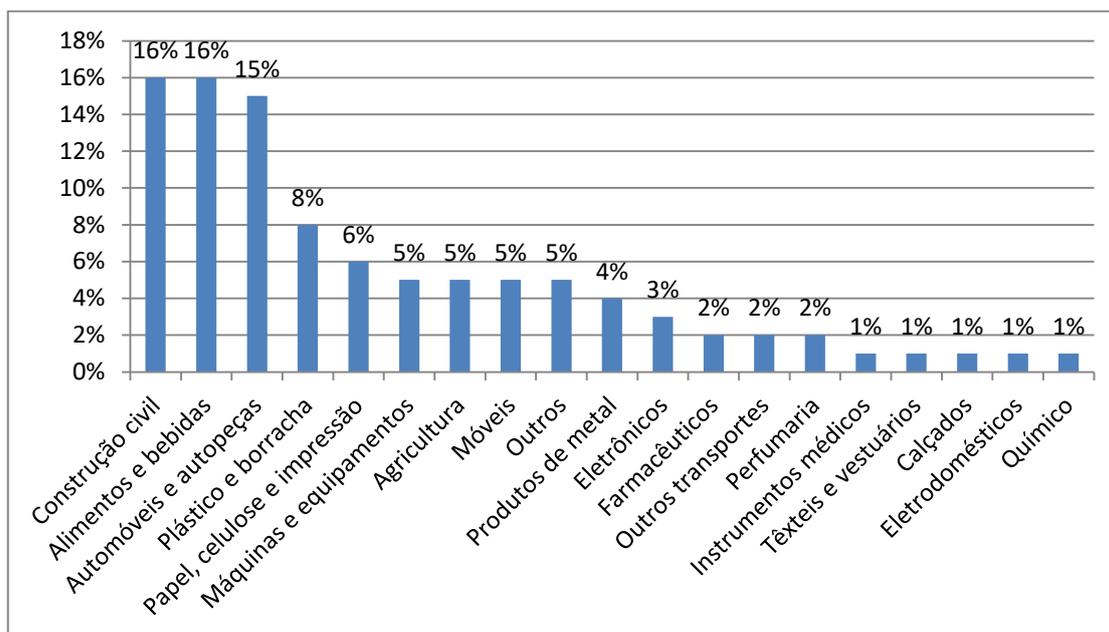


Gráfico 16 – Principais setores consumidores de Transformados Plásticos no Brasil.
 Fonte: Elaborado a partir de ABIPLAST, 2014.

Buscando fortalecer a cadeia produtiva do plástico brasileiro, a Braskem, em conjunto com a ABIPLAST criou em 2013 o Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico (PICplast). Este plano proporciona o desenvolvimento de programas estruturais que contribuam com a competitividade e crescimento da transformação plástica, incluindo investimentos para aumentar as exportações de produtos transformados, incentivo à inovação e o reforço na qualificação profissional e na gestão empresarial.

O gráfico 17 mostra a evolução da produção de PET em milhões de toneladas.

O crescimento médio da produção de PET no Brasil no referido período foi de 6% ao ano. Já somente considerando o mesmo período que as demais regiões esta taxa seria de 3,1% ao ano.

Para fins de comparação, a tabela 1 apresenta os principais dados comparando as regiões abordadas, Europa, Estados Unidos e Brasil.

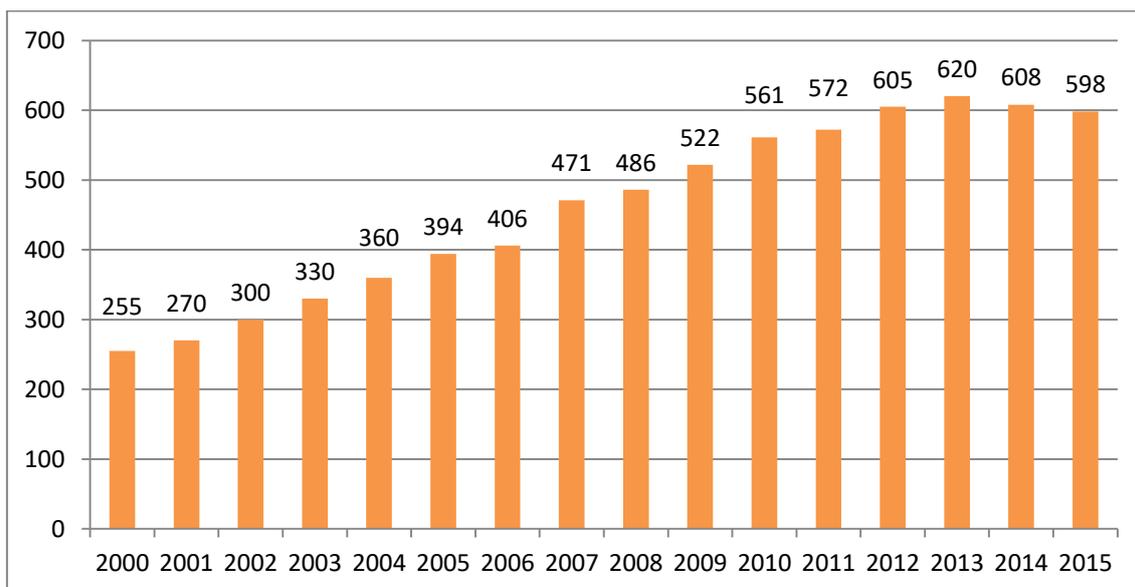


Gráfico 17 – Produção de PET no Brasil 2000-2015 (em milhões de toneladas).

Fonte: Elaborado a partir de ABIPET, 2016.

Tabela 1 – Comparação do panorama dos plásticos entre Europa, EUA e Brasil.

	Europa	EUA	Brasil
Crescimento na produção de plásticos (2004-2015)	1,8%aa	5,2%aa	1,3%aa
Principais setores consumidores de plástico (em ordem de importância)	Embalagens e construção civil	Embalagens e construção civil	Construção civil, embalagens e automóveis e autopeças
Principais resinas consumidas (em ordem de importância)	PP, PEBD, PEBDL, PEMD, PEAD e PVC	PEAD, PP, PVC, PEBD	PP, PVC PEAD
Consumo % do PET dentre os plásticos	7%	Dado não disponível	7,1%
Crescimento na produção de PET (2007-2015)	0,8%aa	1%aa	3,1%aa

Fonte: Elaborado a partir de Plastic Europe, 2015, Chemical Market Associates Inc, 2012, Polyester Analysis Ltd, 2013, American Chemistry Council, 2013 e 2016, ABIPLAST, 2014 e 2016 e ABIPET, 2016.

3. Os plásticos e o PET: processos, características, produtos e aplicações

3.1. Processos e características

O petróleo é componente básico de muitos produtos, sendo atualmente matéria-prima fundamental na sociedade. A maioria dos plásticos é produzida a partir do petróleo.

Apesar da grande preocupação com a possível aceleração do esgotamento do petróleo pela produção dos plásticos, somente 6% da produção mundial deste recurso não renovável é usado para produção de plásticos (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

A cadeia produtiva dos plásticos inicia-se com o uso da nafta, obtida pelo processo de refino do petróleo ou do gás natural, utilizada como matérias-primas para a obtenção de eteno, benzeno, propeno e isopropeno, tolueno, orto/paraxileno, xileno misto, buteno, butadieno e outros petroquímicos básicos.

A primeira geração petroquímica é a responsável pela obtenção destas cadeias básicas de hidrocarbonetos, e tal conversão é realizada nas centrais de matérias-primas dos polos petroquímicos. A produção de resinas a partir dos produtos petroquímicos básicos constitui a segunda geração petroquímica. As resinas produzidas são então processadas para a geração de variados produtos nas indústrias

de transformação plástica, ou seja, nas empresas da terceira geração petroquímica (SIQUIM/EQ/UFRJ,2003).

A figura 1 retrata a cadeia petroquímica e do plástico.

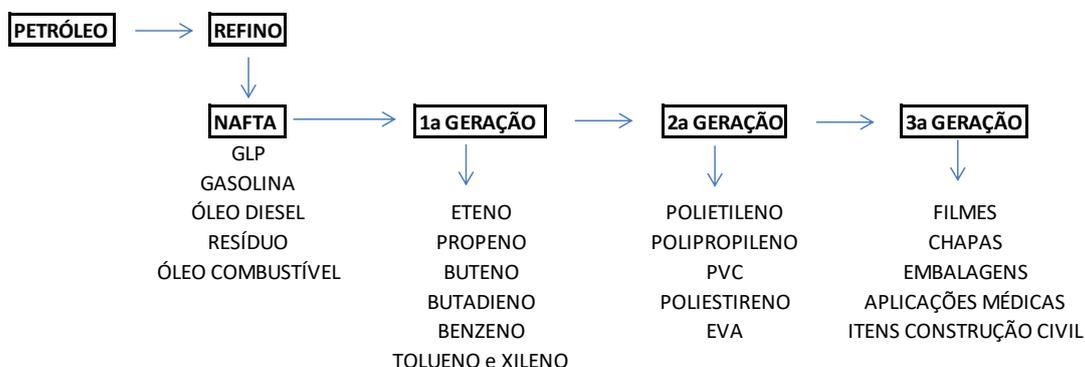


Figura 1 – Cadeia petroquímica e do plástico.
 Fonte: Elaborado a partir de dados da ABISPLAST, 2014.

As resinas plásticas são divididas em 7 tipos (ABNT, 2016).

Na figura 2 é possível observar o símbolo de identificação de cada um. O objetivo desta padronização é facilitar a triagem de resíduos plásticos ao serem encaminhados à reciclagem.



Figura 2 – Simbologia utilizada para identificação de tipos de resinas plásticas.
 Fonte: Norma NBR 13230 ABNT.

Os plásticos, cuja origem da palavra vem do grego “*plastikós*”, ou seja, adequado à moldagem, são materiais produzidos através de um processo químico chamado de polimerização, que proporciona a união de monômeros para formar polímeros (ABIQUIM, 2016).

Os polímeros plásticos podem ser classificados em dois grandes grupos distintos pelo comportamento térmico durante o processamento: os termoplásticos e os termofixos. Os termoplásticos são moldáveis, pois amolecem quando aquecidos. Esse processo pode ser repetido inúmeras vezes e a degradação do polímero será mínima. Já os termofixos, não são facilmente moldáveis por aquecimento. Durante o processamento, esses polímeros são moldáveis, mas tornam-se rígidos ao final do processo e resistentes ao aumento de temperatura. Assim, os plásticos termofixos são, normalmente, mais rígidos que os termoplásticos (PARENTE, 2006).

Há algumas alternativas aos materiais plásticos derivados do petróleo, dentre elas os biopolímeros. Estes são produzidos a partir matérias-primas renováveis como cana-de-açúcar, milho, mandioca e batata, e óleos de girassol, soja e mamona. Atualmente a indústria já produz com este material sacolas, sacos para acondicionar alimentos e/ou lixo, pratos, copos e talheres (A LAVOURA, 2012).

Os principais biopolímeros produzidos pelo Brasil são o biopolímero de amido, produzido a partir do milho, mandioca, batata ou trigo, e os biopolímeros polilactos e polihidroxialcanoato, ambos produzidos a partir de bactérias (A LAVOURA, 2012).

O plástico verde é utilizado nas tampas de embalagens das embalagens TETRAPAK desde 2011, se tornando a primeira empresa do mundo a utilizar biopolímeros em embalagens cartonadas para envase de alimento (TETRAPAK, 2016).

O plástico verde é produzido a partir do eteno, obtido do etanol de cana-de-açúcar. Seu grande diferencial é que ele contribui com a redução da emissão dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. Cada tonelada de polietileno verde produzido equivale ao sequestro de carbono de 33 árvores (BRASKEM, 2016).

O polietileno verde apresenta as mesmas características e propriedades do polietileno tradicional e também pode ser reciclado.

3.2. Os principais produtos e suas aplicações

Os plásticos são divididos em alguns grupos ou categorias com características e aplicações específicas. Na tabela 2 podem-se ver as principais resinas plásticas e suas aplicações e características.

O crescimento da indústria de plásticos tem efeito em vários setores importantes na economia no mundo. Esta indústria possibilita a inovação em vários produtos e outros setores econômicos como o de saúde, de geração de energia,

aeroespacial, automotivo, marítimo, eletrônico, construção civil, têxtil e de embalagens. Nenhum deles seria capaz de crescer ou produzir inovações sem os materiais plásticos e suas soluções.

Conforme demonstrado no gráfico 16 e na tabela1, os principais setores de aplicação do plástico nos setores de embalagens, construção civil e automóveis e peças.

3.2.1. Embalagens

As primeiras "embalagens" surgiram há mais de 10.000 anos e serviam como simples recipientes para beber ou estocar. Esses primeiros recipientes, como cascas de coco ou conchas do mar, usados em estado natural, sem qualquer beneficiamento, passaram com o tempo a ser obtidos a partir da habilidade manual do homem. Tigelas de madeira, cestas de fibras naturais, bolsas de peles de animais e potes de barro, entre outros ancestrais dos modernos invólucros e vasilhames, fizeram parte de uma segunda geração de formas e técnicas de embalagem (ABRE, 2015).

Depois da 2ª Guerra Mundial, o processo de industrialização viabiliza a substituição de importações impulsionando a demanda por embalagens, tanto ao consumidor como de transporte. Vários setores reagiram a essas novas necessidades (ABRE, 2015).

A partir dos anos 60, cresce a produção de embalagens plásticas. Dos anos 70 até os dias atuais, a indústria brasileira de embalagem vem acompanhando as tendências mundiais produzindo embalagens com características especiais como o uso em fornos de microondas, tampas removíveis manualmente, proteção contra a luz e o calor e evidência de violação, etc (ABRE, 2015).

Tabela 2 – Principais resinas plásticas e suas aplicações e características.

Resina	Aplicação	Característica
PET (Poli(tereftalato de etileno))	Frascos e garrafas para uso alimentício, hospitalar e cosmético, bandejas para microondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis, telhas.	Resistência térmica e química, impermeabilidade a gases.
PEAD (Poli(etileno de alta densidade))	Embalagens: bolsas, garrafas, frascos, rolhas. Automobilístico: tubos.	Inquebrável, resistentes a baixas temperaturas, leve, rígido, impermeável, resistência química.
PC (Policarbonato)	Transmissores eletrônicos, semáforos, calculadoras.	Isolante elétrico, baixa absorção de água, brilhante, transparente.
PEBD (Poli(etileno de baixa densidade))	Eletrônicos, Embalagens: sacos, garrafas, tampas, tetrapak. Construção civil: tubulação, mangueiras.	Baixa condutividade elétrica e térmica e resistente à ação de substâncias químicas.
PP (Poli(propileno))	Embalagens, Medicina: seringa, material esterilizável. Papelaria. Automobilístico: Freio, para-choques.	Conservante do aroma, inquebrável, transparente, brilhante, rígido, resistente, a mudança de temperatura.
PS (Poli(estireno))	Embalagem: alimento, remédios, cosméticos.	Isolante elétrico, possui estabilidade térmica.
EVA (Copolímero de etileno e acetato de vinila)	Construção civil.	Flexível, resistente.
ABS (Copolímero de acrilonitrila butadieno e estireno)	Calçados, Peças automobilística.	Resistente ao calor, tensão e impactos. Bom absorvente de umidade.
PU (Poliuretano)	Espuma flexível e Espuma rígida.	Espuma flexível: elástico e com poros. Espuma rígida: isolante térmico.
Resina Epóxi	Automobilístico: anti-corrosivo de peças. Construção civil.	Alta resistência química e pode ter resistência mecânica.
Resina Fenólica	Móveis: composição de conglomerado. Utilidades para o lar: cabos de frigideira.	Primeiro polímero completamente sintético produzido. Resistente ao calor.
PVC (Policloreto de Vinila)	Bens duráveis: frascos rígidos e flexíveis, blisters e filmes.	Resistente e leve.

Fonte: Adaptado de ABIPLAST, 2011.

Conforme gráfico 18, atualmente aproximadamente 40% das embalagens produzidas no Brasil utilizam o plástico como matéria prima.

A produção anual de embalagens plásticas em 2013 foi de 78 milhões de toneladas (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

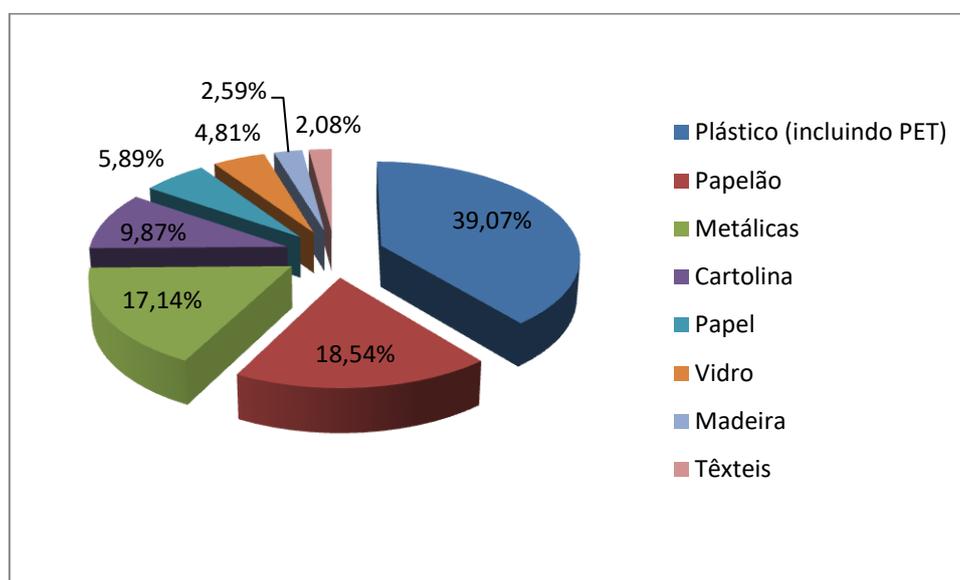


Gráfico 18 – Produção de embalagens por tipo de matéria prima.
Fonte: Elaborado a partir dos dados da ABRE, 2015.

Em faturamento, o plástico foi o material que mais movimentou recursos com a produção de embalagens no primeiro semestre de 2015. Eles ficaram com R\$ 23,1 bilhões, 40,17% do setor. Papel, papelão e cartão, aparecem em segundo com R\$ 14,8 bilhões (33,4%), seguido pelas metálicas, com R\$ 9,9 bilhões (17,29%) e vidro, com R\$ 2,7 bilhões (4,84%), entre outras (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

O setor de embalagens possui dois grandes grupos. O da indústria alimentícia e da indústria de bebidas. O uso de embalagens plásticas para o transporte e comercialização de alimentos frescos possibilitou um grande avanço na tecnologia de preservação e contaminação dos alimentos embalados.

Para o setor de bebidas, por sua vez, as garrafas de plástico para refrigerantes conferem a impermeabilidade aos gases, não permitindo que eles escapem antes do consumo.

As vantagens de aplicar o material plástico nas embalagens são muitas, dentre elas a versatilidade, flexibilidade, menor consumo de energia em sua produção, redução do peso do lixo e o menor custo de coleta e destino final. Além de não oferecerem riscos no manuseio e serem recicláveis.

A legislação para a produção de materiais que ficam em contato com alimentos e bebidas está cada vez mais exigente com as empresas fabricantes. No Brasil o órgão responsável por esta regulamentação é a Anvisa.

A Resolução nº 17 de 17 de março de 2008 regulamenta a lista positiva de aditivos para materiais plásticos de embalagens e equipamentos em contato com alimentos. Posteriormente a Resolução nº 56 de 16 de Novembro de 2012 dispôs sobre a lista positiva de monômeros, outras substâncias iniciadoras e polímeros autorizados para a elaboração de embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos.

3.2.2. Construção civil

As aplicações do plástico nas formas de PVC, polipropileno e polietileno são cada vez mais comuns no mercado da construção civil. Leveza, possibilidade de reúso e reciclagem e maior durabilidade são os principais atributos que fazem do plástico uma matéria-prima mais vantajosa quando comparada aos materiais tradicionais.

O resultado é um ganho de produtividade na obra e também uma menor necessidade de manutenção na fase de operação. Além dos diferenciais citados, o plástico tem um grande aliado, a sustentabilidade, já que as soluções feitas a partir dele são 100% recicláveis.

Telhas, calhas, pisos, forros e esquadrias são apenas alguns exemplos dos vários papéis que o PVC pode desempenhar na construção. Leveza, resistência à tração e impactos, impermeabilidade, facilidade de instalação e de higienização fazem com que este material esteja entre um dos mais utilizados na indústria moderna da construção civil.

Segundo gráfico 9, cujos dados são de pesquisa realizada pela Associação Plastics Europe em 2015, o setor econômico da construção civil seria responsável por consumir aproximadamente 21% do consumo total de plásticos na Europa. É o segundo setor que mais consome plásticos na Europa.

Ao considerar as regiões dos EUA e do Brasil, este setor econômico é responsável por 16% do consumo total de plásticos, como pode ser visto nos gráficos 11 e 16.

Os principais fatores que fazem com que os plásticos sejam bastante aplicados na construção civil são seu baixo peso, sua resistência mecânica e à corrosão, sua

maleabilidade e flexibilidade. Assim, o uso de plásticos na construção civil permitiu a existência de construções não só mais leves, mas também mais baratas e versáteis.

Apesar de todos os benefícios acima citados do uso do plástico na construção civil, os resíduos da construção civil constituem grande parte do passivo ambiental gerado pelos resíduos sólidos.

3.2.3. Demais setores

Na indústria automobilística, o plástico agrega flexibilidade e leveza na produção de autopeças, como por exemplo, em painéis de carros com design moderno e peças mais leves que colaboram na redução do consumo de combustível.

Na indústria de equipamentos médicos, as multinacionais investem bastante em pesquisa e desenvolvimento de polímeros adequados para produzir as mais variadas peças. Grande parte dos recursos é destinada à descoberta de fórmulas sofisticadas, indicadas para aplicações em que o desempenho exigido é rigoroso. São matérias-primas com alta resistência mecânica, térmica e química, muitas vezes biocompatíveis com os pacientes.

As aplicações do plástico na medicina são diversas: bolsas de sangue e de soro, seringas para injeções e outras peças descartáveis. Além disso, atualmente praticamente todas as embalagens de remédios são feitas com plástico.

3.3. O PET: Características, produção e produtos

O Polietileno Tereftalato (PET) é um termoplástico da família do poliéster que teve sua origem nas primeiras décadas do século passado na Universidade de Harvard. O Dr. Wallace H. Carothers foi um dos principais investigadores que deu continuidade aos trabalhos do professor Staudinger, desenvolvendo os princípios da policondensação de polímeros de cadeia longa (KAPLAN, 1998).

Esta matéria-prima chegou ao Brasil em 1988, mas apenas a partir de 1993 passou a ter uso intensivo no mercado de embalagens de água e refrigerantes. Nesta época teve início a substituição gradativa das garrafas de vidro (retornável) por embalagens não-retornáveis, o que resultou em alterações no comportamento de compra do consumidor, no padrão de concorrência e no market-share dos grupos estratégicos do setor (ABIPET, 2009).

O polímero do PET é uma cadeia bastante longa e formada por várias moléculas do composto Bis (Hidroxietil terifalato) (BHET). Na figura 3, pode-se ver a estrutura deste polímero.

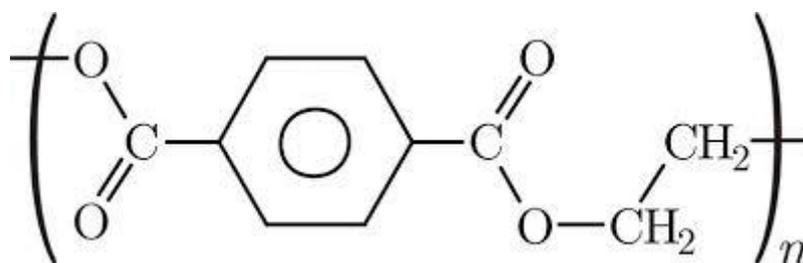


Figura 3 – Estrutura molecular do polímero PET.
Fonte: Silva, G.A., 2010.

O PET tem merecido muito destaque. Ele tem sido considerado o melhor e mais resistente plástico para fabricação de garrafas, frascos e embalagens para refrigerantes, águas, sucos, óleos comestíveis, medicamentos, cosméticos, produtos de higiene e limpeza, destilados, isotônicos, cervejas, entre vários outros.

Devido à sua grande resistência, ele suporta contato com agentes agressivos e possui excelente barreira para gases e odores. Além de reduzir custos de transporte e produção, evitando desperdícios em todas as fases de produção e distribuição.

A produção do PET ocorre por meio da reação entre o Ácido tereftálico (PTA) e Etilenoglicol (MEG).

A produção global do PET em 2014 foi de 41,56 milhões de toneladas e a estimativa para 2020 é atingir o total de 73,39 milhões de toneladas (INSTITUIÇÃO RESEARCH AND MARKET, 2015).

Há diferentes tipos de resina PET. O que as difere é o peso molecular, que quanto maior, mais resistência térmica, mecânica e química o polímero tem.

As fibras do polímero PET são as que possuem o maior volume de fibras sintéticas vendidas atualmente. Desta forma, sua baixa biodegradabilidade é fruto de sua alta cristalinidade e do tipo da sua cadeia polimérica.

O PET pode ser utilizado para diversas aplicações, incluindo garrafas para bebidas, embalagem para comida, embalagem para produtos químicos, cosméticos, produtos farmacêuticos, aplicações industriais, matéria prima para produção de fibras

de carpete. Dentre todas as aplicações, o setor de embalagens é o mais predominante.

O PET é o plástico mais reciclado do Brasil (PLASTIVIDA, 2016).

Na figura 4 podem-se verificar alguns exemplos de utilização do polímero PET.



Figura 4 – Garrafas PET.
Fonte: Planeta Sustentável, 2012.

As garrafas PET possuem algumas vantagens quando comparadas às de demais materiais. Elas são leves e resistentes. Desta forma, se tornam de manuseio fácil, permitindo levá-las a qualquer lugar.

O custo do transporte de garrafas PET é mais barato do que o custo de transporte das garrafas dos demais materiais. Em relação às garrafas de vidro, por exemplo, as embalagens de PET são mais leves, possuindo a melhor relação peso/conteúdo do mercado. A garrafa PET de dois litros tem em média apenas 47g, enquanto uma garrafa de vidro de um litro para refrigerante pesa 950g. Além disso, elas podem ser comprimidas para estocagem, cabendo no mesmo espaço mais garrafas do que as de vidro.

O PET comercialmente é conhecido como drácon ou terilene. Ele é bastante utilizado, sendo que aproximadamente cinco milhões de toneladas dele são usadas para fabricar tecidos, como por exemplo, o tergal, que é uma mistura do drácon com o algodão.

Também é possível produzir fibras sintéticas para maiôs e roupas de inverno, cordas, filmes fotográficos, fitas de áudio e vídeo, guarda-chuvas, embalagens, garrafas de bebidas, gabinetes de forno, vasos e válvulas cardíacas e protetores de queimaduras para vítimas com o material do PET.

Ele pode ser encontrado em aplicações como isolamento de capacitores, películas cinematográficas, fitas magnéticas, filmes e placas para radiografia. É usado também como resina para moldagem (reforçado com fibra de vidro na fabricação de carcaças de bombas), carburador, componente elétrico de carros, etc. (KAPLAN, 1998).

Em relação ao aspecto ambiental, há algumas questões a respeito da utilização do PET. Este material não deve ser lançado no ambiente após seu uso porque ele não é biodegradável. Contudo, infelizmente milhares de embalagens PET são deixadas em leitos de rio, centros urbanos e rodovias, se tornando um grande perigo à Natureza.

Desta forma, uma solução para este problema tem sido a reciclagem. Neste contexto, a coleta seletiva é muito importante, pois por meio dela os plásticos são selecionados para posterior transferência ao tratamento especial que permite reutilizá-los novamente. Os produtos da reciclagem do PET são muito variados. É possível fabricar desde fibra de poliéster para a confecção de roupas à produção de novas embalagens.

Vários setores da economia utilizam produtos que levam PET reciclado. Alguns produtos de destaque são utensílios domésticos, itens de construção civil, automóveis, ônibus, caminhões e sinalizações de trânsito. Os primeiros podem ser visualizados na figura 5.



Figura 5 – Cordas do varal e da vassoura feito com PET reciclável.
Fonte: ABIPET, 2016.

4. Gestão dos plásticos pós consumo

4.1. Panorama mundial dos resíduos

Os resíduos são uma questão de interesse mundial. Caso não sejam corretamente tratados, podem gerar ameaças à saúde e ao Meio ambiente. Desta forma, a gestão de resíduos passa a ser um serviço essencial para qualquer sociedade, em especial nas áreas urbanas.

A produção mundial de resíduos sólidos em 2011 foi de aproximadamente 1,3 bilhões de toneladas por ano e a expectativa é que até 2025 haja mais 1,4 bilhões pessoas no mundo e este valor atinja 2,2 bilhões de toneladas por ano (World Bank, 2012).

O gráfico 19 retrata a distribuição da geração do lixo mundial por região.

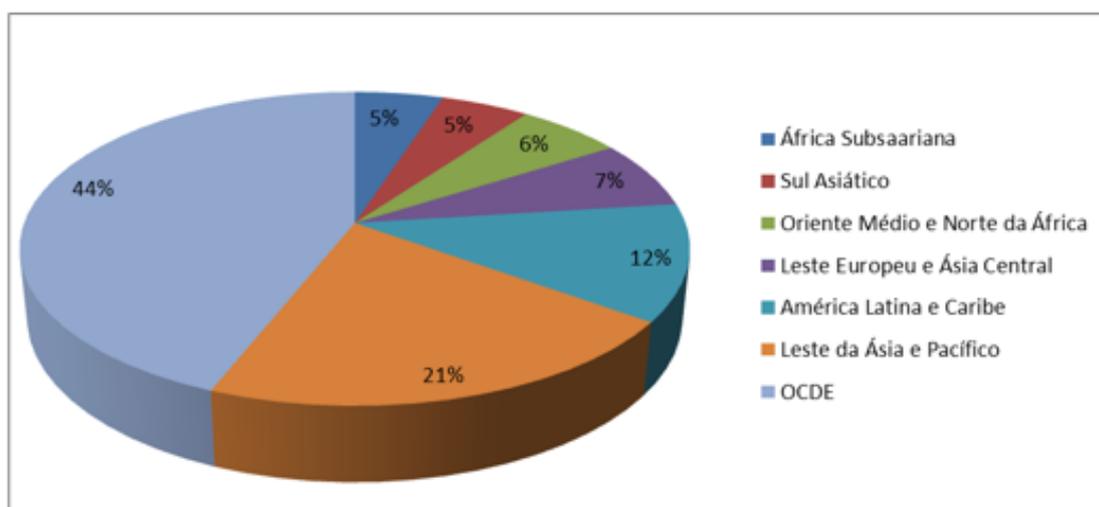


Gráfico 19 – Percentual de geração de lixo por região em 2011.
Fonte: Elaborado a partir dos dados do relatório do World Bank, 2012.

A OCDE é um organismo composto por 34 membros. São eles: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coreia do Sul, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Tcheca, Suécia, Turquia.

O gráfico 20 apresenta a composição deste lixo gerado no mundo inteiro.

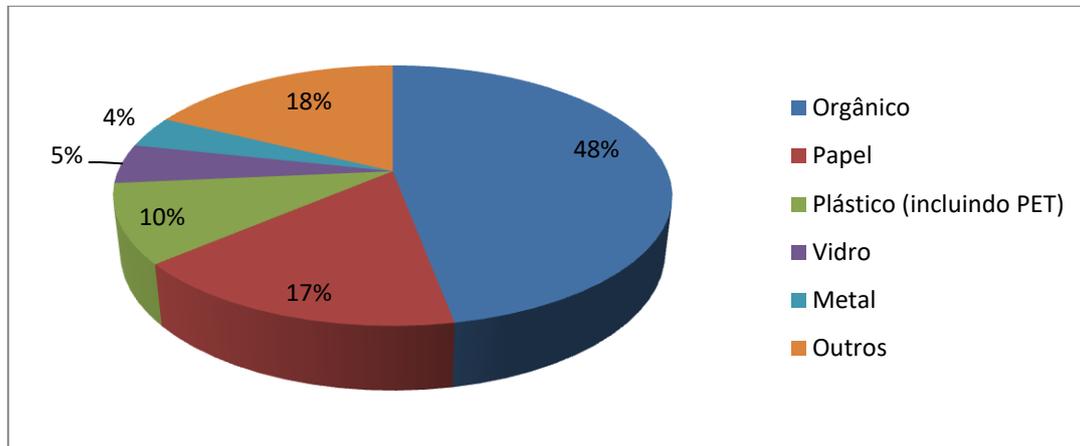


Gráfico 20 – Composição do lixo mundial.

Fonte: Elaborado a partir dos dados do relatório do World Bank, 2012.

Como se pode observar no gráfico acima, os resíduos plásticos são responsáveis por grande parte dos resíduos sólidos gerados em todo o mundo.

A abordagem hierárquica dos 4 R's parece ser a mais lógica e promissora estratégia de gerenciamento adequado de resíduos e tem sido adotada por vários países, como o Canadá e países da Europa (Brown, 1993). Essa abordagem tem a seguinte hierarquia: reduzir; reutilizar, reciclar e recuperar.

Reduzir na origem é a alternativa preferível, pois se o resíduo não é gerado, não é gerado também um problema de controle de resíduo. Exemplos de redução na origem são a redução de rejeitos em um processo industrial, a redução do peso de embalagens e o desenvolvimento de produtos mais duráveis. Reutilizar significa simplesmente usar um objeto ou material novamente. Assim, reciclar é usar um resíduo no lugar de um material virgem na fabricação de novos produtos. Nessa abordagem, recuperar significa reciclar um material extraído de resíduos misturados ou de resíduos de outros processos. Como exemplos, podem ser citadas as recuperações energéticas, onde resíduos são queimados para produzir energia, e o uso de resíduos de incineração como agregado para construção de estradas (Brown, 1993).

4.2. Os resíduos sólidos no Brasil

Os resíduos sólidos ainda são uma das principais questões ambientais no Brasil. O desenvolvimento socioeconômico brasileiro infelizmente não foi adequadamente acompanhado por empreendimentos de tratamento e destinação de resíduos.

Quando comparado aos países desenvolvidos, o Brasil apresenta significativo atraso em relação à gestão de resíduos sólidos, porém, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) iniciou em 2010 um processo de evolução deste gerenciamento, no setor público e no privado, pautado por elevados padrões de proteção ambiental e sustentabilidade.

Esta política instituída pela Lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010 possui instrumentos importantes para a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos. Dentre estes instrumentos estão a Logística Reversa, a Coleta Seletiva, o Plano de Resíduos Sólidos, os Inventários e o Sistema declaratório anual de resíduos sólidos. Além de ter introduzido o conceito de responsabilidade compartilhada de todos os geradores de resíduos e de manejo de resíduos sólidos.

A compreensão e aplicação deste conceito são de extrema relevância, pois o Brasil teve nos últimos anos um enorme crescimento na geração de resíduos por dia (ABRELPE, 2015).

De 2003 à 2014 a geração de lixo cresceu muito mais do que o crescimento da população. A taxa de crescimento do lixo foi de 29% enquanto a do crescimento populacional foi de 6% (ABRELPE, 2015).

Este aumento é fruto de uma maior renda e consumo da população, que infelizmente não foi acompanhada de avanços significativos em gestão ambiental de qualidade.

Nem todo RSU gerado é coletado. Em 2014, foram coletadas 215.297 toneladas de lixo por dia, distribuídos de forma desigual pelo território brasileiro conforme figura 6.

Como se pode observar, a região Sudeste é a maior responsável pela coleta de RSU. Esta região foi responsável pela coleta de 105.431 toneladas por dia.

A composição do RSU pode indicar o poder aquisitivo de uma população e ela varia de acordo com alguns fatores, como a época do ano, as características geológicas do local, o ponto e momento de coleta.

O gráfico 21 apresenta os principais materiais descartados no Brasil. Como pode ser observado, os resíduos plásticos são responsáveis por grande parte do lixo brasileiro.



Figura 6 – Participação das Regiões do País no Total de RSU Coletado.
Fonte: ABRELPE, 2015.

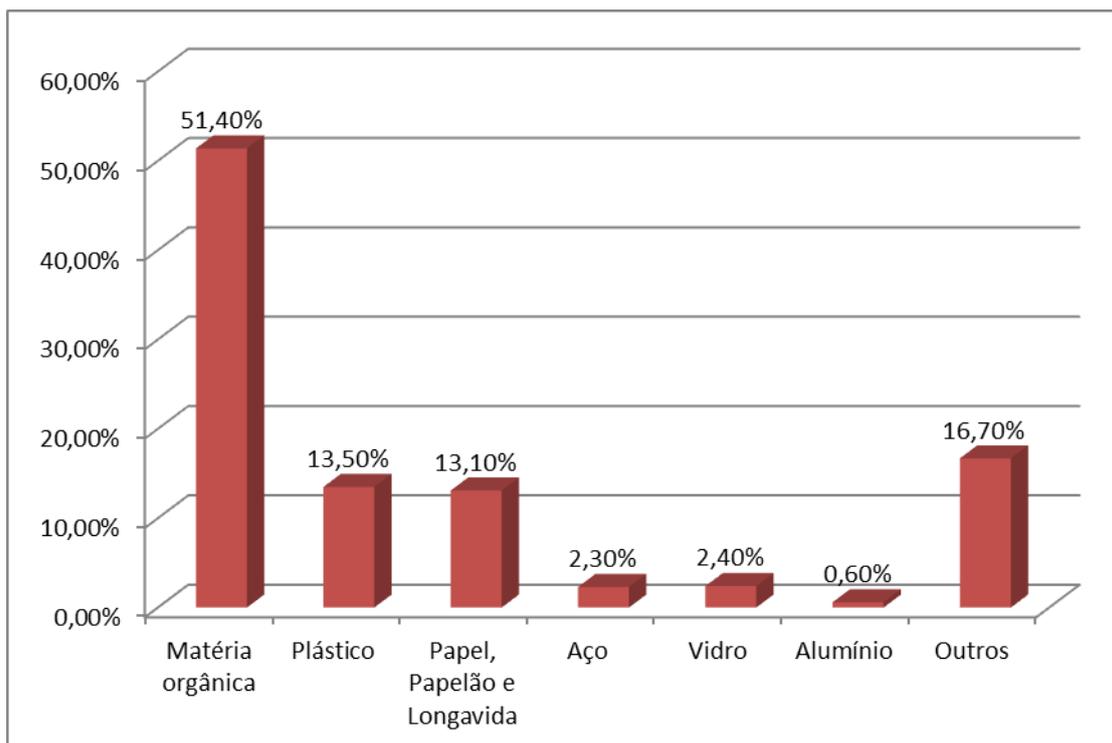


Gráfico 21 – Composição do lixo brasileiro.
 Fonte: Elaborado a partir de ABIPLAST, 2014.

4.3. Os plásticos pós consumo

O lixo plástico é considerado um dos maiores vilões do meio ambiente. Geralmente é composto em grande parte por sacolas plásticas que são motivo de enorme debate internacional, pois que levam centenas de anos para se degradar.

Seu consumo exagerado tem causado situações assustadoras. Na África do Sul, por exemplo, há tantas sacolas espalhadas pelas cidades, matas e rodovias que passaram a ser chamadas de "flor nacional", tamanha a quantidade vista em gramados, jardins e florestas. Na Índia, centenas de vacas morrem todos os anos ao ingerirem sacos plásticos.

Porém, o lixo plástico não se resume apenas a este resíduo. Outro grande problema são as garrafas PET. Estas se destacam nos rios e córregos durante as enchentes de verão nas grandes cidades.

O plástico apresenta muitas vantagens quando comparado aos demais materiais em vários tipos de aplicações diferentes, contudo, como os plásticos são feitos a partir de misturas de polímeros e alguns aditivos, estes podem conter substâncias impuras e contaminantes, trazendo riscos à saúde do homem, aos animais e às plantas.

Adicionalmente, ainda há incertezas sobre as potenciais consequências de exposição em longo prazo a substâncias encontradas nos plásticos. O mau gerenciamento dos resíduos sólidos e a falta de conscientização do povo podem acabar agravando os problemas ambientais gerados pelo uso do plástico.

As externalidades relacionadas ao uso de plásticos e embalagens plásticas se concentram em três áreas. São elas: a degradação dos sistemas naturais, como resultado de lançamento de plásticos especialmente nos oceanos, a emissão de gases do Efeito Estufa na produção dos plásticos e na incineração dos plásticos pós uso e os possíveis impactos na saúde e meio ambiente causados pelas substâncias componentes dos plásticos (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

Estima-se que haja 150 milhões de toneladas de lixo plástico no oceano. Caso nenhuma ação enérgica seja tomada, haverá em peso mais plástico do que peixes no oceano até 2050 (OCEAN CONSERVANCY, 2015, MCKINSEY, 2015).

Este dado denuncia o quanto o material plástico é descartado de forma irregular, que é um dos principais problemas enfrentados pela reciclagem no Brasil e no mundo.

O prejuízo anual dos plásticos no ecossistema marinho é de cerca de 13 bilhões de Dólares e segundo dados da Cooperação econômica Ásia-Pacífico, os custos dos plásticos no oceano para o turismo, pesca e marinha mercante é de aproximadamente 1,3 bilhões de Dólares na referida região (UNEP, 2014).

A imensa quantidade de resíduos plásticos na natureza não deve ser percebida como um impacto meramente estético, uma vez que tais resíduos podem exercer efeitos em animais, que ficam presos, ingerem, engasgam e podem até morrer, além de serem observadas contaminações pelos seus aditivos (BARNES, GALGANI *et al.*, 2009).

Plásticos são facilmente transportados a longas distâncias das áreas de origem pelo vento ou carregados pela água, acumulando-se principalmente nos oceanos, onde podem acarretar uma variedade de impactos ambientais e econômicos (THOMPSON, SWAN *et al.*, 2009).

Plásticos descartados também podem afetar os sistemas terrestres e de água doce, incluindo emaranhamento, ingestão por animais, bloqueio de sistemas de drenagem e impactos estéticos. No entanto a literatura sobre a poluição de plástico em grande parte se concentra nos sistemas marinhos.

Caso o uso crescente de plásticos permaneça conforme o esperado, a emissão dos gases do Efeito Estufa pelo setor dos plásticos será responsável por 15% de toda a produção anual de carbono no mundo (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

Os primeiros relatos de contaminação do meio ambiente por plásticos datam da década de 1960, quando foram encontradas carcaças de aves marinhas contendo pedaços de plásticos na costa da Nova Zelândia (BARNES, GALGANI *et al.*, 2009)

Na figura 7 é possível observar um albatroz com resíduos plásticos em seu estômago.

Hoje já foram reportadas mais de 260 espécies com hábitos alimentares distintos (filtradores, detritívoros, decompositores) que foram encontradas engasgadas, sufocadas, presas e imobilizadas por resíduos plásticos. Tais resíduos também foram encontrados em estômagos e cloacas de animais. Entre as espécies encontram-se invertebrados, aves marinhas, peixes, mamíferos e tartarugas (THOMPSON, SWAN *et al.*, 2009).

A questão ambiental do plástico deve ser avaliada de forma global, ou seja, é importante avaliá-la não somente no seu pós-uso, mas também em todo seu ciclo de vida.



Figura 7 – Carcaça de jovem Albatroz recheada de lixo plástico.
Fonte: Projeto TAMAR, 2013.

Até mesmo o desenvolvimento do chamado plástico biodegradável não é uma solução a longo prazo para o problema do plástico, porque muitos desses materiais contêm apenas uma proporção de materiais biodegradáveis (amido, por exemplo), deixando para trás fragmentos microscópicos de plástico (KLEMCHUK, 1990).

A maioria dos plásticos apresenta alta resistência ao envelhecimento e baixa taxa de degradação biológica. Quando os polímeros são expostos à radiação UVB na luz solar, as propriedades oxidantes da atmosfera e as propriedades hidrolíticas da água do mar tornam esses materiais quebradiços, promovendo a quebra em pedaços cada vez menores; entretanto, para as moléculas de polímeros tornarem-se biodisponíveis, elas devem sofrer uma degradação ainda maior.

Dessa forma, a eventual biodegradação de plásticos no ambiente marinho requer uma quantidade desconhecida de tempo (ANDRADY, 2005 apud MOORE, 2008).

A tabela 3 abaixo apresenta o tempo de degradação de cada tipo de material feito de polímero.

Peças plásticas com maiores dimensões podem persistir por décadas, mesmo quando sujeitos à luz solar direta, e durar até mais quando protegidos da radiação UV sob a água ou sedimentos. Com exceção do poliestireno expandido, plásticos demoram muito mais para se degradarem em água do que em terra, principalmente devido à exposição reduzida aos raios UV e às temperaturas mais baixas dos ambientes aquáticos (GREGORY, ANDRADY, 2003).

Tabela 3 – Tempo de degradação de alguns materiais.

Material	Tempo de degradação
Cordas de náilon	30 anos
Embalagens PET	mais de 100 anos
Esponjas	indeterminado
Isopor	indeterminado
Luvas de borracha	indeterminado
Plásticos (embalagens, equipamentos)	até 450 anos
Pneus	indeterminado
Sacos e sacolas plásticas	mais de 100 anos

Fonte: FOGAÇA, J.R.V., 2016.

Apesar da questão da difícil e lenta degradação dos plásticos, há um ponto bastante positivo na fabricação de plásticos, quando se compara o seu processo ao processo de produção de bens em materiais concorrentes.

A tabela 4 apresenta a comparação entre consumo energético pela produção de materiais em plástico em demais materiais. Pode-se observar que a energia média

necessária para produzir materiais em plástico é inferior ao custo de energia associado aos processos que produzem bens em materiais concorrentes.

Tabela 4 – Demanda energética para produção de recipientes.

Material	Energia média utilizada (Kw /h.kg)
Lata de alumínio	3
Garrafas retornáveis (refrigerante)	2,4
Garrafas retornáveis (cerveja)	2
Lata de aço	0,7
Caixa de papel para leite	0,18
Embalagens de plástico para bebida	0,11

Fonte: SCOTT, 1999.

Apesar de os plásticos serem vistos como prejudiciais ao Meio Ambiente, já está cada vez mais claro que eles oferecem inúmeras aplicações em diversos setores econômicos e que a utilização do plástico para fabricar utensílios permite melhores condições de higiene e possibilita que populações carentes tenham acesso a tecnologias avançadas devido ao custo deste material ser mais baixo do que o custo dos demais materiais.

Porém, devido às questões ambientais relacionadas aos plásticos pós consumo, é de grande importância o estabelecimento de políticas públicas e mecanismos de gerenciamento de resíduos que favoreçam a reutilização e a reciclagem dos plásticos. Desta forma, menos resíduos seriam descartados e seria evitado o desperdício de energia e matéria prima.

Concomitantemente se devem buscar formas de mitigar eventuais impactos negativos causados pelo pós-uso do plástico. Há algumas experiências internacionais de ideia postas em prática para a situação se reverter (MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE BRASILEIRO, 2016).

Na Irlanda, com a instituição da cobrança pela sacola plástica, houve uma redução de 97% no consumo deste produto. Na Austrália, os varejistas assinaram o programa do governo para banir as sacolas plásticas. Já na China, a distribuição gratuita de sacolas plásticas foi proibida a partir de 2008.

Em 2007, os comerciantes de São Francisco, na Califórnia, foram obrigados por lei a banir as sacolas plásticas comuns. Desde então, a coleta do lixo passou a ser feita em coletores seletivos especiais, que não aceitam o depósito de sacolas

plásticas. Desta maneira, os resíduos orgânicos deveriam ser embalados em papel, jornal ou sacos de bioplástico certificados.

A solução de investimento nos bioplásticos tem sido bastante discutida. Estes são plásticos em que todo Carbono constituinte é oriundo de produtos renováveis, fruto de atividade agrícola ou extrativismo vegetal. Os polímeros de amido são os mais usados.

No entanto, além de ser uma produção ainda bem reduzida, quando comparada à dos plásticos convencionais, atualmente nenhum dos bioplásticos comercializados é de fato totalmente sustentável (ALVAREZ-CHAVES, EDWARDS *et al.*, 2011).

Adicionalmente, algumas questões ambientais relevantes acerca das limitações na produção de bioplásticos a partir de fontes oleosas foram apontadas pelo CGEE em 2010. Dentre elas a competição dos bioplásticos com alimentos ao usarem matérias primas de uso alimentar ou ao ocuparem terras férteis.

Conforme mencionado anteriormente, o investimento em reciclagem destes resíduos é de extrema importância, pois, desta forma, menos resíduos sólidos são lançados ao meio ambiente, nos aterros sanitários e nos lixões. A forma mais comum de reciclagem do plástico ainda é o amolecimento e transformação do material em novos objetos, sem a retirada definitiva dele da natureza.

A Reciclagem de resíduos de PET no Brasil é uma das mais desenvolvidas no mundo. Conta com alto índice de reciclagem e uma enorme gama de aplicações para o material reciclado, criando uma demanda constante e garantida (ABIPET, 2016).

A taxa de reciclagem de PET no Brasil em 2015 foi de 51%, sendo em sua maioria reaproveitado nas indústrias têxtil, na fabricação de resina insaturada e alquídica e de embalagens para produtos alimentícios e demais embalagens (ABIPET, 2016).

Tem-se buscado algumas alternativas para a degradação dos polímeros sintéticos, pois os plásticos poluem o meio ambiente não somente quando são queimados e depositados no solo, mas também quando são reciclados.

4.4. Rotas de destinação dos resíduos plásticos

As prioridades na gestão dos resíduos sólidos urbanos devem ser primeiramente a minimização da geração desses resíduos, através de mudanças de

hábitos de consumo e a produção de produtos com menor quantidade de material, feitos de material reciclável, etc. Depois de minimizar a geração de resíduos, a preocupação deve se voltar para a sua destinação: reciclagem, incineração e disposição, nesta ordem (DEMAJOROVIC, 1995, VALLE, 1995 apud ROLIM, 2000).

Algumas possibilidades para a minimização da geração de resíduos é a redução na fonte, produzindo produtos com menos plástico, o reuso e a reciclagem, fabricando produtos com material reciclado. A figura 8 apresenta uma visão geral de como são os principais processos e rotas dos plásticos pós-consumo.

4.4.1. Aterros

A disposição é a alternativa mais antiga, porém, esta deve ser a última opção para a destinação de resíduos. Nela o lixo pode ser depositado em lixões, aterros controlados e aterros sanitários. O objetivo destas áreas é isolar seu conteúdo e evitar o contato dos resíduos com os lençóis freáticos e o solo. Em geral, são construídos longe dos centros urbanos.

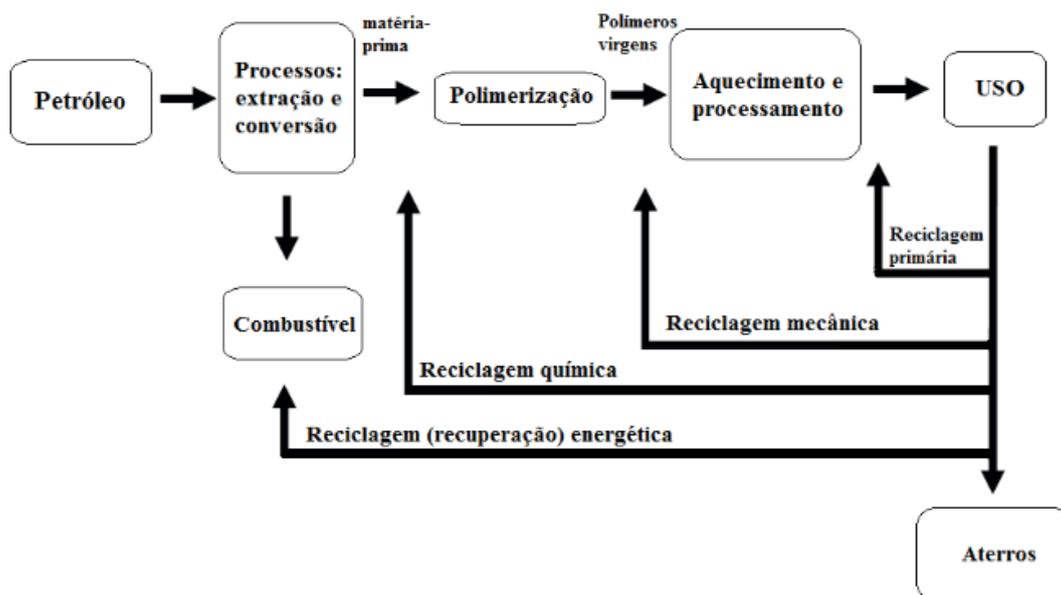


Figura 8 – Processos e rotas de destinação de plásticos.
 Fonte: AL-SALEM, LETTIERI et al. 2010, apud OLIVEIRA, 2012.

O principal problema ambiental do aterro sanitário é a sua própria constituição, independente se há materiais plásticos presentes ou não. O período de recuperação das áreas degradadas pela disposição dos resíduos pode ser bastante longo, além do fato dos aterros ocuparem áreas grandes impactando economicamente a compra e ocupação de terrenos.

A destinação de resíduos para aterros sanitários atingiu mais de 50% de todos os resíduos sólidos coletados no país. A parte restante foi destinada para aterros controlados ou lixões, mostrando a urgência desta situação no Brasil (ABRELPE, 2010).

A figura 9 apresenta um aterro sanitário.

4.4.2. Reciclagem

Os processos de reciclagem são a melhor opção para destinação de resíduos (DEMAJOROVIC, 1995, VALLE, 1995 apud ROLIM, 2000).

Na definição adotada pela EPA (Environmental Protection Agency), a agência ambiental dos EUA, reciclagem é a ação de coletar, reprocessar, comercializar e utilizar materiais antes considerados como lixo.

Reciclar é economizar energia, poupar recursos naturais e trazer de volta ao ciclo produtivo o resíduo que seria jogado fora, para que o mesmo seja usado novamente como matéria-prima.



Figura 9 – Aterro sanitário.
Fonte: FOGAÇA, J. R. V., 2016.

Assim, a reciclagem é um processo de transformação de materiais previamente separados para posterior utilização. Os resíduos são recuperados por meios de uma série de operações que permitem que materiais já processados sejam aproveitados como matéria-prima no processo gerador ou em outros processos.

A taxa de reciclagem dos países europeus aumentou 21% entre 2001 e 2010. Atualmente, 35% de todo o lixo gerado nas cidades ganha vida nova e ainda gera receita. A gestão de resíduos sólidos da União Europeia já rende 1% do PIB do bloco (AGENCIA EUROPEIA DO AMBIENTE, 2013).

Alguns países ainda precisam ir além, a fim de atender as metas mandatórias ambiciosas do bloco, que determinam uma taxa de reciclagem de lixo urbano de 50% até 2020. Os primeiros a atingir esta meta foram a Áustria, Alemanha, Bélgica, Holanda e Suíça, onde a vontade política e a participação civil deram um novo valor ao lixo.

Infelizmente, no Brasil, a gestão dos resíduos sólidos não tem acompanhado o avanço de países como os mencionados acima. Este assunto não tem merecido ainda toda a atenção necessária por parte do poder público, apesar de ser considerado um dos setores do saneamento básico.

A taxa de reciclagem de plásticos em geral é menor do que a taxa de 14% das embalagens plásticas. Já o PET, conforme já mencionado anteriormente, obteve uma taxa de reciclagem de 51% em 2015. Esta taxa faz com que o PET tenha a maior taxa de reciclagem de todos os plásticos.

Pode-se acompanhar a evolução da taxa de reciclagem do PET ao longo dos anos no gráfico 22.

Após o primeiro ciclo de uso do plástico, é perdido na economia cerca de 95% do valor do material da embalagem, aproximadamente \$ 80 a 120 bilhões anuais (FORUM ECONOMICO MUNDIAL, 2016).

A reciclagem primária, também chamada de reciclagem pré-consumo, é efetuada na própria indústria geradora dos resíduos, ou por outras empresas transformadoras, com materiais termoplásticos, provenientes de resíduos industriais, que são limpos e de fácil identificação, não contaminados por impurezas (PINTO, 1995 apud ROLIM, 2000).

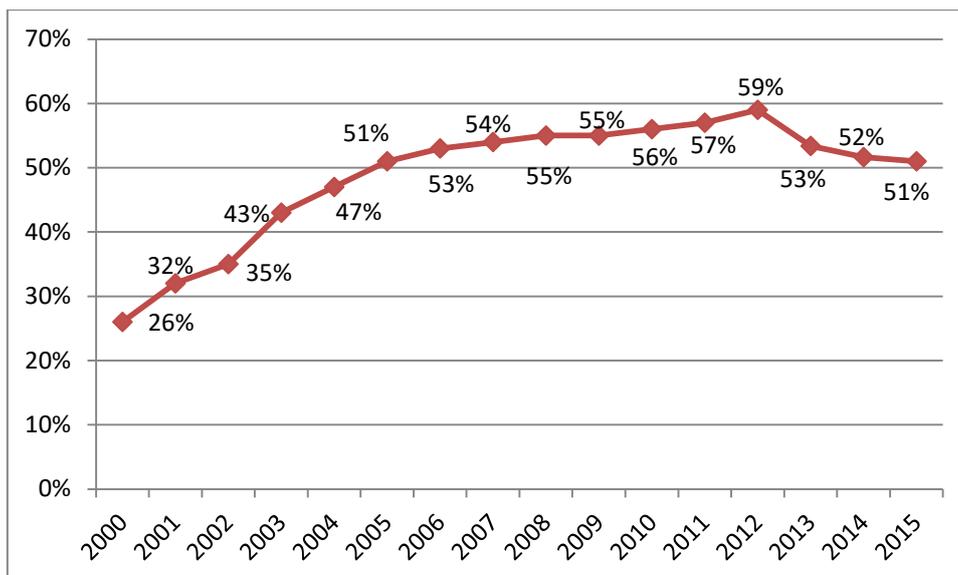


Gráfico 22 – Percentual de reciclagem de PET 2000-2015.
 Fonte: Elaborado a partir dos dados do relatório da ABIPET, 2016.

A reciclagem mecânica é também conhecida por reciclagem secundária.

A reciclagem secundária ou pós consumo, é a conversão de resíduos plásticos descartados no lixo. São constituídos pelos mais diferentes tipos de materiais e resinas, com propriedades também diferentes, exigindo uma boa separação, para poderem ser reaproveitados (PINTO, 1995 apud ROLIM, 2000).

A reciclagem terciária é também chamada de reciclagem química. É a decomposição dos resíduos plásticos, através de processos químicos ou térmicos, em petroquímicos básicos: monômeros ou misturas de hidrocarbonetos que servem como matéria prima em refinarias ou centrais petroquímicas, para obtenção de produtos nobres de elevada qualidade (HIWATASHI, 1999, PINTO, 1995 apud ROLIM, 2000).

Ela pode ser feita por meio de diversos métodos. O tipo do plástico reciclado, sua composição e a massa molecular dos produtos desejados é que vão determinar qual o melhor método a ser aplicado.

A principal vantagem da reciclagem química é a possibilidade de tratar polímeros heterogêneos e contaminados com o uso limitado de pré-tratamento, quando comparada à reciclagem mecânica. (SCHEIRS, 1998, apud OLIVEIRA, 2012).

A reciclagem quaternária é a reciclagem energética, ou seja, a destruição do resíduo plástico por combustão, para obter energia térmica (MANO, 1994, BONELLI, 1994 apud ROLIM, 2000).

A reciclagem quaternária difere da incineração pela primeira utilizar os resíduos plásticos como combustível na geração de energia elétrica, enquanto a segunda não reaproveita a energia dos materiais (PLASTIVIDA/ABIQUIM 1997 apud ROLIM, 2000).

Este processo é uma estratégia muito eficiente. O conteúdo de energia dos polímeros é alto e muito maior que de outros materiais. O valor calórico de 1 kg de resíduo polimérico é comparável ao de 1l de óleo combustível e maior que o do carvão. Os resíduos poliméricos contidos no resíduo sólido urbano contribuem com 30% deste valor calórico, permitindo a produção de eletricidade, vapor ou calor (KAMINSKY, 1992 apud SPINACÉ, DE PAOLI, 2005).

Um fator que contribui para a viabilidade desta alternativa é o poder calorífico dos plásticos, que em geral é alto, como pode ser observado na tabela 5.

Outro fator que impacta diretamente a eficiência da combustão é o teor de água dos resíduos.

A tabela 6 mostra os teores de água geralmente encontrados em cada material dos resíduos sólidos urbanos.

Apesar de este processo trazer consigo a preocupação acerca da liberação de substâncias tóxicas na atmosfera, em particular alguns gases do Efeito Estufa, como o dióxido de carbono, ele na realidade é mais do que uma simples alternativa para a destinação dos resíduos urbanos.

Tabela 5 – Demanda energética para produção de recipientes.

Item	Capacidade calorífica (MJ/ kg)
Poli(Etileno) (PE)	43,3 – 46,5
Poli(Propileno) (PP)	46,5
Poli(Estireno) (PS)	51,9
QUEROSENE	46,5
ÓLEO LEVE	45,2
ÓLEO PESADO	42,5
PETRÓLEO	42,3
LIXO DOMÉSTICO	31,8

Fonte: AL-SALEM, LETTIERI *et al.*, 2010.

Tabela 6 – Percentual de água nos resíduos sólidos.

Material	Quantidade de água (%)
Matéria orgânica	58,33
Papel e cartolina	55,59
Plásticos	22,31
PET	8,27

Vidro	1,12
Metais	2,64
Celulose	6,64
Tetrapack	32,87
Têxtil	46,00
Madeira	5,55
Resíduos de construção	0,12

Fonte: Adaptada de MONTEJO, COSTA, *et al.*, 2011.

As emissões gasosas produzidas pela incineração podem ser controladas conforme exigências da legislação local e ainda a planta de incineração pode ser instalada próximo às fontes geradoras do RSU, diminuindo os custos de transporte.

As tecnologias de reciclagem avançaram muito, permitindo que grande parte das resinas mais comuns sejam recicladas. Contudo, é importante cautela na etapa de separação, pois as propriedades mecânicas de um produto plástico podem ser profundamente afetadas se este for contaminado com outra resina (HOPEWELL, DVORAK *et al.*, 2009).

Um dos piores problemas de contaminação no processo de reciclagem é o que envolve as resinas PVC e PET. Quando o PVC é o contaminante e o PET o contaminado, o PVC se degradará durante o processamento do PET, devido à elevada temperatura exigida neste processo.

Já quando o PET é o contaminante e o PVC é o contaminado, o PET tem de ser eliminado do processo por filtração, pois não funde à temperatura de processamento do PVC.

Além da questão da contaminação por outra resina, alguns outros fatores devem ser considerados para avaliar a viabilidade da reciclagem dos plásticos: a existência de incentivos fiscais e financeiros, disponibilidade de tecnologia para o processo específico, existência de empresas de reciclagem da resina em questão, teor de água, volume total disponível para a reciclagem, natureza química dos materiais e a demanda do mercado pelo plástico reciclado.

Um aspecto importante a se considerar em relação especificamente à reciclagem dos plásticos é que o PET reciclado (PETR) não pode ser usado para a produção de recipientes para refrigerantes, pois as temperaturas envolvidas não são altas o suficiente para garantir a esterilização do produto (CANN, CONELLY, 2000 apud CANN, 2016).

Desta maneira, o uso do PETR acaba não diminuindo a quantidade de PET virgem utilizado em embalagens de alimentos. E, além disso, o processo de reciclagem do PET gera impactos ambientais.

Após três ciclos de processamento, ocorre uma alteração bastante expressiva de suas propriedades e este se torna quebradiço e duro. Desta maneira, não é possível usá-lo para as mesmas aplicações que um polímero virgem é aplicado. Uma forma de minimizar esta questão é tentar eliminar ao máximo a quantidade de resíduos e umidade (SPINACE, DE PAOLI, 2005).

No processo de reciclagem de PET ocorre a produção de impactos, tais como: consumo de recursos naturais (água e energia), geração de resíduos sólidos, emissões atmosféricas, efluentes líquidos. Os recursos energéticos considerados incluem a energia elétrica utilizada nos equipamentos e o combustível utilizado para o transporte externo e interno das matérias-primas e do produto final (MARTINS, 2003).

Atualmente, o interesse na reciclagem do PET tem sido crescente e este interesse vem de sua visibilidade nos rios, calçadas, aterros e lixões.

O material plástico a ser reciclado pode ter duas origens distintas. Ele pode ser proveniente da fase pós-industrial, assim como do pós-uso. Os rejeitos plásticos oriundos da indústria são homogêneos e estão livres de contaminação, facilitando sua reciclagem. Assim, a maioria deste tipo de resíduo é reciclada na própria fábrica. Já os que originam do pós-uso da população, por estarem geralmente contaminados e misturados a outros resíduos, são o foco das questões relacionadas à reciclagem (INSTITUTO PVC, 2016).

Para os Estados membros da União Europeia, a Diretiva 2008/98/CE estabelece que não menos de 30% do lixo sólido plástico deve ser destinado para reuso ou reciclagem. Além disso, até 2020 todos os fluxos de resíduos sólidos (incluindo plásticos) devem ser destinados para tratamento térmico e/ou mecânico e recuperação de energia, reduzindo assim ao mínimo o percentual de resíduos sólidos a ser disposto em aterros. (AL-SALEM, LETTIERI *et al.*, 2010).

No Brasil o Plastivida é o instituto responsável por disseminar largamente o conhecimento sobre os plásticos e promover a sua utilização de maneira sustentável. Ele desenvolveu o estudo “Elaboração e monitoramento dos índices de reciclagem de plástico no Brasil” visando levantar a situação da indústria brasileira de reciclagem de plásticos.

Os dados deste estudo chamaram a atenção para a importância dos milhares de catadores informais de lixo que atuam no país. Infelizmente o serviço ambiental prestado pelo catador é antes de tudo uma maneira de sobreviver, uma necessidade de vida. Em muitos casos eles trabalham com toda sua família, incluindo crianças em condições bastante precárias.

A participação de catadores na separação informal do lixo é o ponto de maior destaque do aspecto social na questão do lixo. Outro ponto de grande relevância é a imagem do profissional que atua diretamente nas atividades operacionais de coleta de lixo. O gari ainda convive com o estigma gerado pelo lixo de exclusão de um convívio harmônico na sociedade devido à relação do objeto de suas atividades com o inservível.

Esta questão dos catadores de lixo levanta dois pontos importantes, o risco de contaminação pelo lixo e a informalidade das empresas recicladoras de plástico. Este último pode inclusive ser considerado um fator limitante para o desenvolvimento do próprio setor.

Infelizmente as iniciativas de reciclagem no Brasil ainda são muito dependentes das ações governamentais, que também acabam limitando a atuação deste setor às áreas de maior interesse do Governo. Já nos países desenvolvidos a cadeia da reciclagem comporta outros atores, como a própria população e não há trabalho informal neste setor.

Este envolvimento da população na cadeia de reciclagem nos países desenvolvidos é muito positivo e possibilita o bom funcionamento de uma política de reciclagem, pois um dos fatores relevantes para o sucesso desta política é a separação dos resíduos na própria fonte geradora, evitando perda de qualidade dos materiais a serem reciclados e esta ação só é possível se houver a adesão da população.

No contexto da figura 8 e diante do que foi mencionado anteriormente, vale destacar um estudo do Programa WRAP feito em 2006 e revisado em 2010 que avaliou os potenciais impactos ambientais de diferentes destinações que os resíduos podem ter.

Os possíveis impactos trabalhados incluíram a exaustão de recursos naturais, o potencial de mudanças climáticas, a demanda energética, o consumo de água, e também a acidificação, a oxidação fotoquímica, a eutrofização e a toxicidade humana.

Os plásticos tratados no estudo foram o Polietileno, Poli(tereftalato de Etileno) ou PET, Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) e Poli(cloreto de Vanila) ou PVC.

O estudo mostrou que o processo de reciclagem mecânica foi o que apresentou menores impactos, considerando os aspectos de mudanças climáticas, demanda de energia e exaustão dos recursos naturais.

Já a reciclagem energética não se mostrou uma boa escolha porque este processo libera muitos gases do Efeito Estufa. Por último, a disposição em aterros, como era de se esperar, aparece como a pior opção ao se analisar os parâmetros propostos.

5. Os processos de degradação de polímeros

A degradação também pode ser vista como uma das etapas de um processo de reciclagem, em que os monômeros obtidos via degradação são novamente empregados para composição de novo polímero.

Degradação é qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que pode ser causada por agentes físicos e/ou por agentes químicos. A degradação causa uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciada pela deterioração progressiva destas propriedades, incluindo o aspecto visual (Agnelli, 2000). Degradação é qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que pode ser causada por agentes físicos e/ou por agentes químicos.

O autores COSTA, ALBUQUERQUE *et al.*(2015) afirmaram que o estudo da degradação de polímeros é útil e aplicável a diversas áreas:

- Ambiental: Alternativas para degradação na natureza, reciclagem de materiais plásticos e utilização de polímeros biodegradáveis na remediação de áreas impactadas por derrames de petróleo;
- Biomédica: Medicamentos encapsulados e polímeros biocompatíveis usados em implantes cirúrgicos e curativos;
- Agrícola e Veterinária: (Bio) polímeros para encapsulamento de fertilizantes e de medicamentos veterinários;
- Industrial: Recuperação de oligômeros e monômeros correspondentes, com objetivo de nova utilização na síntese de polímeros.

Atualmente, VIANA (2016) apresenta os tipos de degradação dos polímeros em relação a seus agentes:

- Agentes físicos: radiação solar e outras radiações, temperatura e atrito mecânico e intenso;
- Agentes químicos: água, ácidos, bases, solventes, outros produtos químicos, oxigênio, o ozônio, e outros poluentes atmosféricos;
- Agentes biológicos: micro-organismos, tais como fungos e bactérias; Este seria um subtipo das degradações de natureza química, sendo os micro-organismos são os atores destes ataques.

5.1. Degradação física

A degradação física pode ter diferentes formas de iniciação. Uma delas é pelo agente temperatura. As ligações químicas do polímero só podem ser quebradas se uma energia igual ou superior for fornecida ao polímero na forma de aquecimento em um período curto ou longo (DE PAOLI, 2008).

Para ilustrar a grandeza da energia necessária para quebrar uma ligação química, na tabela 7 estão listadas as energias de ligação das ligações químicas mais frequentes em polímeros comerciais.

As reações fotoquímicas também são uma forma de iniciação. Estas reações ocorrem com a participação de uma molécula em um estado eletrônico excitado. Quando a molécula está neste estado, ela pode decair para o seu estado fundamental liberando energia ou então também pode sofrer reações químicas. Uma forma de gerar este estado excitado é por meio da incidência de luz sobre o polímero. A fonte de luz mais importante para nós é a luz solar (DE PAOLI, 2008).

Outra possibilidade de iniciação é por meio das radiações de alta energia. Estas são radiações eletromagnéticas que, por possuírem altas energias, são capazes de dissociar ligações químicas.

Tabela 7 – Energias de ligação para algumas das ligações químicas mais frequentes em polímeros comerciais.

Tipo de ligação	Energia de ligação / kJ mol ⁻¹
C-H primário	432
C-H secundário	410
C-H terciário	390
C-H aromático	460
C-F	486
C-Cl	340
C-Br	285
C-I	214
C-C	348
C=C	612
C≡C	838
C≡N	893
C-O	419
O-CO	461
C=O aldeído	742
C=O cetona	746
C=O éster	750
C=O amida	750
S-S	226
O-O	138
O-H	465
N-CO	360

Fonte: DE PAOLI, 2008.

Os principais tipos de radiação de alta energia são: a radiação- γ e os raios-X, que são radiações que tem sua origem em reações nucleares rápidas.

Já a radiação- γ , os raios-X, os feixes de nêutrons e de elétrons são principalmente usados em esterilização de embalagens da indústria alimentícia, esterilização de equipamentos médicos e implantes. Esta radiação de alta energia também é muito importante para a indústria aeroespacial.

5.2. Degradação química

A degradação iniciada por agentes químicos aparentemente só poderia ocorrer em situações muito específicas onde o polímero estivesse exposto a um agente químico agressivo específico. No entanto, isso não corresponde à realidade porque todo e qualquer tipo de polímero produzido em escala industrial possui algum tipo de

contaminante que pode iniciar a degradação por ataque químico. Estes contaminantes podem ser resíduos de catalisador ou de iniciador, impurezas do monômero, aditivos, etc. Alguns destes contaminantes não são reativos em atmosfera inerte e no escuro, mas quando expostos à luz na presença de oxigênio se tornam eficientes pró-degradantes. Em outros casos o material polimérico é usado em contato com outros materiais, metais, por exemplo, que aparentemente são inertes, mas que podem ser quimicamente ativados por aquecimento. Dessa forma, a degradação química também precisa ser inicialmente classificada em duas maneiras; agentes externos de ataque químico e agentes químicos internos ao polímero. Como ressaltado acima, muitos destes contaminantes serão ativados na presença de luz e/ou de calor, por isso incluímos os termos “foto e química” e “termo e química” (DE PAOLI, 2008).

Na degradação química os principais agentes são a água, ácidos, bases, solventes, oxigênio e ozônio. Genericamente, os agentes de baixa massa molar tendem a ser mais eficientes, pois possuem maior facilidade para penetrar entre as moléculas dos polímeros (VIANA, 2016).

Entretanto, apenas a massa molar não é suficiente para definir a agressividade do agente. É importante avaliar também a compatibilidade química entre o polímero e o agente. Uma forma de medir esta compatibilidade é pelo parâmetro de solubilidade.

5.3. Biodegradação

A biodegradação de um determinado material ocorre quando ele é usado como nutriente por um determinado conjunto de microorganismos (bactérias, fungos ou algas) que existe no meio ambiente onde o material vai ser degradado (AL SAIDI, MORTENSEN *et al.*, 2003 apud DE PAOLI, 2008).

Para que essa colônia de microorganismos cresça usando o material como nutriente é necessário que eles produzam as enzimas adequadas para quebrar alguma das ligações químicas da cadeia principal do polímero. Além disso, é necessário ter as condições adequadas de temperatura, umidade, pH e disponibilidade de oxigênio. A velocidade de crescimento da colônia de microorganismos vai determinar a velocidade com a qual o material está sendo biodegradado (DE PAOLI, 2008).

Desta forma, quando se fala em degradação biológica de polímeros, fala-se em degradação enzimática de polímeros, pois de fato, o polímero é catalisado pela ação das enzimas excretadas pelos microrganismos.

As enzimas são proteínas de alta especialização e podem favorecer as reações químicas com grande eficiência catalítica e elevado grau de especificidade por seus substratos.

Há três elementos essenciais para o processo de biodegradação de polímeros:

- Organismos: Desempenham ações metabólicas específicas para a síntese de enzimas que possibilitam o início do processo de despolimerização e mineralizam os monômeros e oligômeros formados por este processo. Vale mencionar que as características estruturais e cinéticas da própria enzima também são bastante relevantes;
- Ambiente: Temperatura, PH, presença de ativadores ou inibidores no meio, sais e umidade, sendo este último o mais importante;
- Substrato: Estrutura do polímero. Este fator inclui os tipos de ligação química, níveis de ramificação e de polimerização, distribuição de massa molar, cristalinidade, área superficial e outros aspectos morfológicos dos polímeros.

O processo da biodegradação acontece em duas fases, a despolimerização do plástico e a mineralização. A primeira envolve a quebra das ligações poliméricas, gerando a fragmentação do material, chamada de oligômeros. Em seguida, começa a decomposição das macromoléculas em cadeias menores, chegando aos monômeros (REVISTA PLÁSTICO MODERNO, 2016).

A segunda etapa, a mineralização, ocorre quando os fragmentos são suficientemente pequenos para serem transportados pelo interior dos organismos onde eles são transformados em biomassa e, então, mineralizados. Este processo de mineralização produz água, sais minerais, novas biomassas e alguns gases como CO₂, CH₄, N₂ e H₂.

Sabe-se que o processo de hidrólise é o mais importante para iniciar a biodegradação de polímeros sintéticos, com destaque para os poliésteres e que ele normalmente acontece por meio da atuação de enzimas da classe das hidrolases. Além disso, acredita-se que este processo seja especialmente relevante para degradação de polímeros como o PET (SHAH, KATO *et al.*, 2014 apud COSTA, ALBUQUERQUE, RIBEIRO, *et al.*, 2014)

Na figura 10 é possível visualizar como ocorre o processo de biodegração de um polímero.

A biodegradação dos plásticos é, geralmente, um processo heterogêneo devido a insolubilidade da água e do tamanho das moléculas do polímero (MUELLER, 2006).

Além disso, a degradação enzimática dos polímeros é influenciada por vários fatores, como a interação com a cadeia da macromolécula (difusão ou adsorção da enzima na superfície do polímero), propriedades físico-químicas do substrato (massa molar, área superficial), características da enzima (estrutural, cinética), fatores ambientais (pH, temperatura) e presença de ativadores ou inibidores no meio (MARIN, BRICEÑO *et al.*, 2013 apud CASTRO, VALONI, 2015).



Figura 10 – Processo de biodegradação de Polímero.
Fonte: Plástico Biodegradável, 2010.

Um dos fatores de maior importância nos processos de degradação enzimática de polímeros é a concentração da enzima na reação de hidrólise. A faixa de atividade enzimática aplicada aos sistemas reacionais depende do tipo de polímero a ser degradado e da fonte da enzima, dentre outros fatores (Costa *et al.*, 2015). Foi observado que em muitos estudos de decomposição de poliésteres, a concentração da enzima fica em torno de 50 U/mL, porém em alguns casos observou-se aplicação de enzimas com carga enzimática de até 100 U/mL (WALTER, AUGUSTA *et al.*, 1995).

Há polímeros naturais que são intrinsecamente biodegradáveis, polímeros naturais que levam séculos para biodegradar, polímeros sintéticos biodegradáveis, os polímeros que são formulados com catalisadores, aditivos ou cargas biodegradáveis e os polímeros bio absorvíveis. Existem também polímeros sintéticos que não sofrem biodegradação em uma escala de tempo mensurável (DE PAOLI, 2008).

5.4. Biodegradação: tecnologia alternativa e promissora

A preocupação mundial sobre a necessidade de preservação dos recursos naturais fez com que os pesquisadores buscassem processos industriais menos agressivos ao Meio Ambiente. Neste contexto, a área da Biotecnologia tem se destacado nos últimos anos por meio utilizar fontes renováveis e consumir menos energia em seus processos. Estes processos têm sido apresentados como alternativos aos processos químicos tradicionais.

Uma das áreas da biotecnologia que vem se destacando nos últimos anos é a biocatálise, na qual enzimas são utilizadas como uma alternativa verde à síntese orgânica tradicional, apresentando algumas vantagens frente aos processos químicos tradicionais, como por exemplo, atuação sob condições de operação mais brandas, aplicabilidade sobre moléculas térmica e quimicamente instáveis a altas temperaturas, elevado controle estérico, químico, e regioseletivo e reduzida geração de subprodutos (RIBEIRO, CASTRO *et al.*, 2011).

Assim, como a biodegradação de polímeros é de fato feita pelas enzimas excretadas dos organismos, pode-se considerar que o termo biocatálise citado acima é um sinônimo para o processo de biodegradação. Apesar das vantagens da biodegradação sobre a degradação química, apontadas acima, há pontos que precisam de melhoria como, por exemplo, a perda de atividade catalítica no decorrer do tempo, taxas de conversão mais baixas e alto tempo de reação.

Nas últimas décadas, o interesse no uso de processos mediados por enzimas cresceu bastante em razão da necessidade de reduzir a produção de resíduos poluentes ao meio ambiente e também a otimização de inúmeros processos físicos e químicos.

Contudo, a bioconversão dos resíduos tem sido dificultada pelo alto custo de produção estas enzimas. Desta forma, o estudo de microrganismos produtores de enzimas lignocelulolíticas e da otimização de sua produção estão sendo realizados mundialmente.

Em 2014 foram produzidos cerca de 311 milhões de toneladas de plásticos em todo o mundo. Este volume é responsável pelo consumo de aproximadamente 6% de todo petróleo produzido no mesmo período. A expectativa para 2050 é que este percentual suba para cerca de 20%, caso os plásticos continuem sendo tratados como hoje, ou seja, com baixa taxa de reciclagem (WORLD ECONOMIC FORUM, 2016).

Dentre os plásticos de maior destaque, encontra-se o PET com produção anual estimada em mais de 50 milhões de toneladas (BORNSCHEUER, 2016).

Ainda segundo o referido relatório, diante deste panorama, torna-se extremamente necessário repensar a forma de utilizar os plásticos e neste contexto, os processos de reciclagem estão dentre as tecnologias listadas como prioritárias neste cenário.

Com esta previsão de aumento de consumo de 20% de todo petróleo produzido para a produção de plásticos, entende-se que o ideal é investir nas rotas disponíveis para a despolimerização, pois assim seria possível o reaproveitamento de matéria prima para a mesma aplicação, consequentemente reduzindo o consumo de combustível de origem fóssil.

As rotas disponíveis para a despolimerização são a rota química e a biológica.

Conforme mencionado anteriormente, a reciclagem biotecnológica vem recebendo destaques no meio científico. Este processo emprega enzimas como biocatalisadores para a quebra das ligações do polímero, e consequente liberação de seus monômeros.

Com relação aos parâmetros adotados nas reações de rota biológica, sua reação de decomposição é bem mais lenta, levando longos tempos. Geralmente, esses testes ocorrem ao longo de semanas. Já as reações de rota química acontecem em tempos mais curtos.

Mas, em compensação, a degradação biotecnológica de polímeros além de ocorrer em pressão ambiente, suas temperaturas são mais brandas e seus pH mais brandos do que as decomposições químicas, evitando assim a presença de compostos corrosivos no meio.

Desta forma, a rota biológica, tem se mostrado mais atrativa, ao utilizar catalisadores mais verdes.

Corroborando esta ideia, em 2008 os Estados Membros da Europa se comprometeram a aumentar em 50% seu percentual de reciclagem até 2020. E para isso criaram um consórcio baseado em rota biotecnológica. Cinco países já alcançaram suas metas, são eles Áustria, Bélgica, Alemanha, Suíça e Holanda.

A degradação do PET por via biológica é relativamente recente e ainda um pouco restrita ao ambiente acadêmico, universidades ou centros de pesquisa. Contudo, observa-se que algumas empresas e instituições públicas já começaram a se interessar pelo assunto.

Por meio por meio de buscas em bancos de artigos e de patentes, é possível observar que estudos sobre este assunto já vem sido conduzidos em diversos países, como Alemanha, China, Japão, Áustria, Itália, Polônia, Portugal, Coréia do Sul, Espanha, Reino Unido, Suíça, Bélgica, Finlândia, França, República Tcheca, EUA, Brasil, dentre outros.

A seguir serão relatados alguns destes estudos realizados sobre biodegradação do resíduo plástico PET para ilustrar como a rota biológica vem sendo aplicada no mundo.

6. Experiências de biodegradação de PET

6.1. Projeto de biodegradação de PET por fungos – Universidade de Campinas (Unicamp), SP.

No trabalho de Biodegradação de Polietileno Tereftalato (PET) por fungos Ligninolíticos realizado por SILVA, estudou-se a biodegradabilidade de polímeros sintéticos por ação de fungos cultivados em resíduos agroindustriais.

Observar a degradação de um polímero é de extrema dificuldade, pois este fenômeno pode ocorrer sem que haja necessariamente a perda de massa do polímero, mas alterações na molécula do polímero podem ser observadas (SCHNABEL, 1981, SCOTT, GILEAD, 1995 apud SOARES, 2012).

As linhagens de fungos lignocelulolíticos utilizados no referido estudo mostraram ter a capacidade de se desenvolverem em meios contendo fonte de carbono sintético e de difícil degradação, apresentando graus variáveis de crescimento. Também apresentaram um grande potencial na produção de enzimas lignocelulolíticas.

Neste estudo comprovou-se que estes microrganismos podem proporcionar um grande progresso na degradação de materiais sintéticos. Adicionalmente, verificou-se a importância de estudar as condições ótimas de crescimento destes microrganismos e sugere-se o uso do consórcio de microrganismos e/ou de polímeros para observar se nestas condições os resultados são mais satisfatórios (SILVA, 2009).

Neste estudo ficou provada a eficácia do uso de microorganismos para degradar embalagens plásticas utilizadas nos mais diversos setores.

O diferencial desta pesquisa foi que ela utilizou o método de planejamento experimental, usado pela primeira vez em laboratório para este fim. Este método

permite avaliar a interferência de várias variáveis no processo de biodegradação, como por exemplo, os níveis de fermentação, tempo de reação e temperatura ideal, permitindo as melhores condições para a biodegradação do PET (SILVA, 2009).

Os resultados desta pesquisa apresentam nova contribuição para problemas envolvendo o PET, pois sua reciclagem demanda grande consumo de água e energia, além de promover a geração de resíduos sólidos, emissões atmosféricas, efluentes líquidos.

6.2. Projeto de biodegradação de PET por larvas – Universidade de Stanford, EUA

A equipe formada por cientistas YANG, YANG *et al.* da Universidade de Stanford, na Califórnia, apresentou em 2015 um estudo sobre uma pequena larva de besouro conhecida como bicho-da-farinha (*Tenebrio molitor*) que seria capaz de se alimentar de isopor, um plástico não biodegradável. Esta larva pode ser vista na figura 11.



Figura 11 – Larva de besouro, conhecida como bicho-da-farinha.
Fonte: Revista Galileu, 2015.

Os pesquisadores mostraram que estes insetos transformam metade do isopor consumido em dióxido de carbono e a outra metade em excremento como fragmentos decompostos.

Além disso, comprovaram que o consumo de plástico não afeta a saúde das larvas, as transformando em uma grande possibilidade para a reciclagem de resíduos plásticos.

O segredo destas larvas estaria nas bactérias que elas têm em seus sistemas digestivos. Estas teriam capacidade de decompor o plástico.

Segundo um dos pesquisadores, as bactérias em seus estômagos tornam possível essa degradação e poderiam ser capazes de degradar outros plásticos. Eles estão estudando uma maneira de extrair essas bactérias e utilizá-las diretamente para tratar o plástico.

Neste estudo, foi demonstrado que o bicho-da-farinha é capaz de converter 50% do plástico que consome em CO₂. No momento o grupo pesquisa outros tipos de plástico que poderiam ser decompostos por estas larvas e também uma maneira de extrair essas bactérias das larvas e utilizá-las diretamente para tratar o plástico. Ainda segundo um dos integrantes, os pesquisadores estão certos de que há na natureza outros insetos com habilidade similar à do bicho-da-farinha.

6.3. Projeto de biodegradação de PET por bactérias – Universidade de Yokohama, Japão

Em março de 2016 foi divulgado pela revista americana Science um estudo feito pelos pesquisadores japoneses YOSHIDA , HIRAGA *et al.* em que eles haviam identificado uma bactéria que conseguiria digerir plásticos PET, transformando o material em dióxido de carbono e água. Este estudo teve uma repercussão enorme mundialmente.

Nesta pesquisa, a quebra das moléculas do polímero PET seria feita por duas enzimas da bactéria identificada. Estas enzimas foram batizadas de Petase e Metase. Caso realmente estas enzimas possam ser produzidas em laboratório, seria um grande avanço para a reciclagem química das milhões de garrafas PET que poluem diversas partes do mundo.

O primeiro passo da pesquisa foi a coleta de 250 exemplares de plástico em um centro de reciclagem. O objetivo era tentar encontrar algum ser vivo que tivesse o PET como principal fonte de carbono para o crescimento.

Nesta amostra, foi localizada uma bactéria, a *Ideonella sakaiensis*, que seria capaz de degradar quase completamente um fino filme de PET após seis semanas a uma temperatura de 30°. Devido ao seu alto grau de resistência, as garrafas PET, como as de água e refrigerante, podem permanecer na natureza por até 800 anos.

Segundo um dos autores da pesquisa, MIYAMOTO, o grupo teria encontrado um consórcio microbiano que poderia degradar completamente o PET amorfo em dióxido de carbono e água.

Investigações posteriores identificaram a enzima ISF6_4831, que usa água para quebrar as moléculas do polímero em substâncias intermediárias. Essas substâncias são definitivamente quebradas pela ação de uma segunda enzima, a ISF6_0224.

Segundo o pesquisador citado, as enzimas poderiam ser produzidas em laboratório por meio do sistema de expressão de *E. Coli* (*Escherichia coli*, bactéria utilizada para a produção de proteínas em laboratório).

Ainda segundo MIYAMOTO, os sistemas de reciclagem química têm sido bastante desenvolvidos, porém, ainda há algumas dificuldades nestas tecnologias. O objetivo deste estudo segundo ele era tentar algo novo, que fosse benéfico ao meio ambiente.

6.4. Projeto de biodegradação do PET – Petrobras, Brasil

Neste contexto de destaque da reciclagem biotecnológica, a Petrobras também possui uma linha de pesquisa no tema de biodegradação de PET em seu Centro de Pesquisa (CENPES).

A referida empresa já desenvolveu uma pesquisa onde foi avaliado o potencial de degradação de PET de alguns biocatalisadores microbianos e enzimáticos. Neste estudo, a maior conversão do polímero em ácidos livres foi verificada quando uma enzima de origem vegetal foi usada no experimento com PET.

Já a maior formação do ácido tereftálico foi verificada quando se utilizou as células de uma levedura. Posteriormente aplicou-se a enzima em amostras de PET de outros tipos para observar o grau de conversão do PET em ácidos livres.

Atualmente, o CENPES possui mais uma linha de pesquisa no tema de biodegradação do PET. Há três iniciativas ligadas a este projeto, mais especificamente relacionadas ao tipo das enzimas usadas no processo.

Na primeira delas as enzimas são compradas de outras empresas produtoras de enzimas. Como este recurso é crítico e de alto custo, surgiram as duas outras iniciativas, baseadas na ideia da Petrobras produzir as próprias enzimas.

Em uma delas, esta enzima seria produzida por fungos. Já na outra, a enzima seria produzida por uma semente vegetal e ela envolve um processo auxiliar de manipulação genética e clonagem.

O gene desta semente responsável pela produção da enzima seria clonado e implantado em um ser vivo. Desta forma, esta enzima poderia ser produzida em alta escala de maneira economicamente viável.

O polímero do PET é uma cadeia longa formada por várias moléculas do composto Bis (Hidroxietil teriftalato) (BHET). Devido ao comprimento da cadeia do PET, seu processo de degradação acaba sendo demorado. Assim, com o objetivo de reproduzir o processo de biodegradação do PET, mas ao mesmo tempo reduzindo o tempo dos experimentos, optou-se por estudar o processo de biodegradação do BHET.

Este consiste em duas etapas. Na primeira a enzima Lipase quebra as ligações do BHET e produz o composto Mono (Hidroxietil tereftalato) (MHET) e o Mono Etilenogicol (MEG). Na segunda etapa, a mesma enzima Lipase quebra as ligações do MHET e produz o Ácido Tereftálico (PTA) e mais uma molécula de MEG.

Nas primeiras etapas deste estudo, foram avaliadas 19 enzimas comerciais quanto à sua capacidade de catalisar a hidrólise de BHET (bis(hidroxietil tereftalato)) ao intermediário MHET (mono(hidroxietil tereftalato)) e ao produto final TPA (ácido tereftálico).

A enzima A catalisou com muita eficiência a primeira etapa da reação (hidrólise de BHET a MHET), porém converteu lentamente o MHET a TPA. Ao fim de 24 horas de experimento, houve 91,3% de conversão de BHET a MHET e 8,4% de TPA.

Já a enzima B se mostrou muito eficiente em catalisar ambas as etapas da reação (hidrólise de BHET a MHET e hidrólise de MHET a TPA), chegando a uma fração molar de TPA de 99,4% ao fim das 24 horas de experimento.

Os resultados demonstram que estas enzimas possuem especificidades distintas quanto às etapas de hidrólise de BHET. No parâmetro de favorabilidade de conversão de BHET a TPA, a enzima B se mostrou mais eficiente que a enzima A.

No entanto, há outra variável essencial para interpretar quais dos biocatalisadores testados foram os mais promissores para degradação de BHET e, possivelmente, de PET. Esta variável é a normalização da formação de TPA total pela concentração de proteínas presente em cada solução enzimática. Sob este aspecto, a

enzima B continua sendo a de maior destaque, mas a enzima A não estaria mais na segunda posição. Algumas outras enzimas tiveram desempenho melhor sob esta ótica.

Os resultados apresentados neste estudo permitirão uma base para um novo estudo mais aprofundado de despolimerização do PET. Eles foram bastante reveladores quanto ao perfil de atividade de cada enzima estudada, possibilitando a formulação de coquetéis enzimáticos para a completa hidrólise do polímero, até seus monômeros finais.

6.5. Considerações sobre as pesquisas

Conforme apresentado ao longo desta dissertação, os processos químicos têm sido bastante desenvolvidos, porém, ainda há algumas dificuldades nestas tecnologias.

Desta forma, os projetos apresentados são tentativas de experimentar algo novo, que fosse benéfico ao meio ambiente. Estes processos têm sido vistos com uma alternativa aos processos químicos tradicionais, pois utilizam fontes renováveis e consomem menor energia.

Infelizmente não é possível avaliar qual método de biodegradação é o mais eficiente no contexto tecnológico, porque não há um parâmetro de comparação entre os estudos apresentados. Por serem processos em desenvolvimento, seus dados de pesquisa ainda possuem carácter sigiloso.

Os resultados destas pesquisas apresentam nova contribuição para problemas envolvendo o PET, pois sua reciclagem demanda grande consumo de água e energia, além de promover a geração de resíduos sólidos, emissões atmosféricas, efluentes líquidos.

Os projetos analisados mostram que os microrganismos são capazes de proporcionar um grande progresso na degradação de materiais sintéticos. Os casos relatados são de degradação de PET, porém é possível observar na Literatura casos de sucesso com polipropileno, poliestireno, policloreto de vinila e poliuretano.

Adicionalmente, verificou-se a importância de estudar as condições ótimas de crescimento destes microrganismos e sugere-se o uso do consórcio de microrganismos e/ou de polímeros para observar se nestas condições os resultados são mais satisfatórios.

Apesar do processo de biodegradação de resíduos do PET estar sendo estudado por diferentes grupos pelo mundo e já apresentar resultados bastante promissores, ainda há um aspecto importante a ser equacionado, que é o alto custo das enzimas comerciais. Esta questão foi explicitada no último projeto relatado.

Desta maneira, tem-se buscado alternativas para a produção das próprias enzimas. Espera-se assim o amplo desenvolvimento e redução dos custos deste processo nos próximos anos, possibilitando uma maior viabilidade econômica.

7. Conclusões e recomendações

A produção de plásticos teve um crescimento bastante expressivo nos últimos 50 anos. Somente a China é responsável por 25% da produção mundial de plásticos, já a Europa ocupa a posição de segundo lugar. Dentro da Europa, a Alemanha é o país de destaque na produção de plásticos.

A expectativa é que até 2050 a produção mundial de plásticos chegue a 1.124 milhões de toneladas e que setor de plásticos passe a ser responsável por 20% do consumo total de petróleo.

O crescimento da indústria de plásticos tem efeito em vários setores da economia como o de saúde, de geração de energia, aeroespacial, automotivo, marítimo, eletrônico, construção civil, têxtil e de embalagens.

Nenhum deles seria capaz de crescer ou produzir inovações sem os materiais plásticos e suas soluções. Os setores de maior destaque da aplicação do plástico são os de embalagens, construção civil e automóveis e peças.

O plástico apresenta muitas vantagens quando comparado aos demais materiais em vários tipos de aplicações diferentes, contudo, como os plásticos são feitos a partir de misturas de polímeros e alguns aditivos, estes podem conter substâncias impuras e contaminantes, trazendo riscos à saúde do homem, aos animais e às plantas.

Os plásticos são divididos em alguns grupos ou categorias com características e aplicações específicas. Neste contexto, o PET tem merecido muito destaque, pois tem sido considerado o melhor e mais resistente plástico para fabricação de garrafas, frascos e embalagens em geral.

O PET suporta contato com agentes agressivos e possui excelente barreira para gases e odores. Além de reduzir custos de transporte e produção, evitando

desperdícios em todas as fases de produção e distribuição. No Brasil ele é o plástico mais reciclado.

A demanda crescente por PET e plásticos em geral resulta no significativo aumento de geração de resíduos plásticos. Hoje a produção mundial de resíduos sólidos é de aproximadamente 1,3 bilhões de toneladas por ano e a expectativa é que até 2025 este valor atinja 2,2 bilhões de toneladas por ano.

A prioridade na gestão destes resíduos sólidos deve ser a minimização da geração desses resíduos, por meio de mudanças de hábitos de consumo, da produção de produtos com menor quantidade de material ou feitos de material reciclável.

As disposições e tratamentos mais adequados são o reuso, redução, reciclagem, incineração e, por último, aterros. Entretanto, sem que haja uma gestão adequada, a maioria desses resíduos é enviada para aterros ou lixões, ou dispostos irregularmente no ambiente, prejudicando a vida e a saúde de animais e dos seres humanos.

Um excelente exemplo no Brasil de uma ação voltada à equação da questão dos resíduos de embalagens é o acordo assinado em 25 de novembro de 2015 por empresas de diversos setores industriais brasileiros para a implantação do Sistema de Logística Reversa de Embalagens em Geral com o objetivo de garantir a destinação final ambientalmente adequada das embalagens.

Por meio deste acordo, fabricantes, importadores, comerciantes e distribuidores de embalagens e de produtos comercializados em embalagens se comprometeram a trabalhar em conjunto visando garantir a destinação final ambientalmente adequada das embalagens que os mesmos colocam no mercado.

O acordo contempla apoio a cooperativas de catadores de materiais recicláveis e parcerias com o comércio para a instalação de pontos de entrega voluntária. Este documento também permite a celebração de acordos entre os serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos municipais e as entidades signatárias.

Esta iniciativa visa atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos (12.305/2010), assim como ao seu decreto regulamentador do mesmo ano.

Entende-se que, por a questão dos resíduos sólidos ser um assunto de enorme abrangência, é estritamente necessária a ação de todos os agentes, por meio do desenvolvimento de um gerenciamento integrado de resíduos.

Para que este gerenciamento tenha êxito, é necessário que:

- A população participe ativamente na separação e acondicionamento diferenciado dos materiais recicláveis em casa, além de participar da remuneração e fiscalização dos serviços;
- Os geradores de resíduos sejam responsáveis pelos próprios rejeitos;
- Os catadores sejam capazes de atender à coleta de recicláveis oferecidos pela população e comercializá-los junto às fontes de beneficiamento;
- Os estabelecimentos da área de saúde tornem os resíduos inertes;
- A prefeitura, por meio de seus agentes, instituições e empresas contratadas, exerça o papel protagonista no gerenciamento integrado de todo o sistema, incluindo as fiscalizações necessárias.

A gestão de resíduos plásticos é uma preocupação mundial, justificada por evidências documentadas de que estes resíduos apresentam desafios ambientais significativos no cenário global (THOMPSON, SWAN et al,2009).

Na União Europeia, uma das metas é que, até 2020, 15% de materiais plásticos disponíveis no mercado sejam reciclados (European Commission DG ENV, 2011). Porém, iniciativas como esta não tem sido vista em países em desenvolvimento e ao mesmo tempo são escassas as informações de como lidar com resíduos plásticos.

Hoje, o panorama global da reciclagem aponta vários benefícios ambientais, econômicos e sociais, contudo, ele ainda é bastante desigual entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Como mostra a Literatura, há muita atividade técnica no ramo de reciclagem sendo desenvolvida em universidades, empresas e centros de pesquisa. Desta forma, o cenário mundial da reciclagem deve mudar bastante nos próximos anos. Principalmente nos quesitos de viabilidade econômica e de redução de problemas operacionais.

Outra questão específica neste contexto são os produtos alimentícios embalados em plásticos reciclados. Nos países desenvolvidos há a preocupação de alertar a população acerca dos riscos à saúde envolvidos na utilização de plásticos recicláveis nas embalagens deste tipo de produto.

Já em muitos países em desenvolvimento estes produtos podem circular livremente sem nenhuma identificação. A China é um destes países que levanta dúvidas a respeito da qualidade dos processos de reciclagem realizados. Neste cenário, os produtos alimentícios importados de países em desenvolvimento e embalados em plásticos reciclados podem ser menos competitivos no cenário mundial.

Em pesquisas feitas nos EUA, a população tem se mostrado interessada em reciclar e até mesmo apoia iniciativas nesta área, mas ainda não está muito disposta a pagar mais caro pelos produtos reciclados. Já pelas embalagens ecologicamente responsáveis eles estariam dispostos a pagar cerca de até 15% mais caro, porém o preço adicional oferecido hoje pelo mercado está acima deste percentual aceitável.

Neste contexto de gerenciamento integrado de resíduos, tornou-se necessário repensar como utilizar os plásticos e os processos de reciclagem também precisam ser reavaliados, buscando soluções menos agressivas ao Meio ambiente.

Considerando a previsão de aumento de consumo de 20% de todo petróleo produzido para produção de plásticos, o ideal é investir em rotas de despolimerização, pois assim seria possível reaproveitar a matéria prima para a mesma aplicação, e conseqüentemente reduzir o consumo de combustível de origem fóssil.

As rotas disponíveis para a despolimerização são a rota química e a biológica, porém conforme evidenciado nesta dissertação, os processos biotecnológicos efetivamente analisados têm se apresentado melhores que os tradicionais, pois podem ocorrer sob condições de operação mais brandas, são aplicáveis sobre moléculas térmica e quimicamente instáveis a altas temperaturas, possuem elevado controle estereo, quimio, e regioseletivo e geram poucos de subprodutos. Desta forma, são mais benéficos ao meio ambiente.

Como se pode observar nas experiências acima, a biodegradação de resíduos plásticos, mais especificamente o PET, vem sendo estudada por diferentes grupos pelo mundo e já apresenta resultados bastante promissores. Estes projetos mostram que os microorganismos são capazes de proporcionar grande avanço na degradação de PET.

Contudo, ainda há um aspecto importante a ser equacionado, que é o alto custo das enzimas comerciais. Visando resolver esta questão, propõem-se projetos para o desenvolvimento de enzimas próprias, visando à redução dos custos deste processo.

Foram encontradas algumas dificuldades durante a elaboração deste trabalho. A de maior destaque está relacionada aos dados de produção e demanda de PET no Brasil e no mundo. Infelizmente estes dados ainda são bastante dispersos na literatura. Além disso, um maior acesso a estas informações também poderia auxiliar na escolha por melhores opções de descarte dos resíduos pós-consumo.

Sendo assim, recomendam-se levantamentos mais robustos e frequentes sobre o PET e os plásticos em geral e a disponibilização destes dados. Sugere-se também a consideração sobre o ciclo de vida dos plásticos aplicados em outras cadeias.

Conforme mencionado, a degradação do PET por via biológica é relativamente recente e ainda um pouco restrita ao ambiente acadêmico ou centros de pesquisa. Desta forma, recomenda-se um maior envolvimento de instituições públicas e privadas no assunto, assim como uma ampla divulgação dos dados gerados.

Referência Bibliográfica

Associação Brasileira de Embalagens (ABRE). *Dados do mercado*, 2015. Disponível em: <http://www.abre.org.br>. Acesso em 02 de Novembro de 2015, 14:11:21.

Associação Brasileira de Embalagens (ABRE). *Anuário 2015*, 2015. Disponível em: <http://www.abre.org.br/anuario/>. Acesso em 27 de Novembro de 2015, 8:00:00.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br> Acesso em 12 de Dezembro de 2015, 15:52:14

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014*, 2015. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso: em 16 de Maio de 2016, 10:30:15.

Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABETRE), 2016. Disponível em: <http://www.abetre.org.br/a-abetre/opiniao/a-importancia-da-infraestrutura-de-destinacao-de-residuos-solidos>. Acesso em: 30 de Junho de 2016, 11:30:00.

Associação da indústria do PET (ABIPET), 2016. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html>. Acesso em: 03 de Maio de 2016, 9:15:16.

Associação da indústria do PET (ABIPET), 2012. *Nono censo da reciclagem de PET – Brasil – O ano de 2012*. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: 26 de Julho de 2016, 10:13:23.

Associação Brasileira da Indústria do Petróleo (ABIPLAST), 2016. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/site/os-plasticos>. Acesso em: 10 de Outubro de 2015, 9:00:00.

Associação Brasileira da Indústria do Petróleo (ABIPLAST). *PERFIL 2014*, 2015. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil_abiplast_2014_web.pdf. Acesso em: 12 de Maio de 2016, 10:13:31.

Associação Brasileira da Indústria do Petróleo (ABIPLAST). *PERFIL 2015*, 2016. ABIPLAST. Disponível em:

http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf. Acesso em: 01 de Agosto 2016, 11:12:12.

Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), 2016. Disponível em: http://canais.abiquim.org.br/braz_new/. Acesso em: 22 de Fevereiro de 2016, 13:56:45.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2004. *ABNT NBR 10004:2004: Resíduos sólidos - Classificação*. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=936>. Acesso em 13 de Maio de 2016, 11:34:56.

AGNELLI, J. A. M., 2000, *Degradação, Estabilização e Envelhecimento de Polímeros*. Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais- CCDM-UFSCar/UNESP, São Carlos.

ALBUQUERQUE, M. C. C., RIBEIRO, C. M. S., RABELO, C. R. K., *et al.*, *Aplicações de enzimas na síntese e na modificação de polímeros*, 2014. Disponível em: http://quimicanova.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=81. Acesso em: 10 de Janeiro de 2016, 11:31:20.

AL-SALEM, S. M., LETTIERI, P., BAEYENS, J., *The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals, Progress in Energy and Combustion Science*, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000446>. Acesso em: 29 de Junho de 2016, 15:00:00.

ALVAREZ-CHAVES, C.R., EDWARDS, S., MOURE-ERASO, R., *et al.* *Sustainability of Bio-Based Plastics: General Comparative Analysis*, 2011. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.666.5941&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 20 de Junho de 2016, 12:10:00.

American Chemistry Council (ACC). Disponível em <http://www.packaginggraphics.net/plasticResinInformation/Plastics-Report.pdf>. Acesso em: 05 de Agosto de 2016, 10:14:16.

BARNES, D.K.A., GALGANI, F., THOMPSON, R. C., *et al.* *Accumulation and Fragmentation of Plastics Debris in Global Environments*. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2009. Disponível em: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1526/1985>. Acesso em: 09 de Setembro de 2016, 10:52:00.

British Broadcasting Corporation (BBC) Brasil. Disponível em: http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/10/151026_larva_poluicao_lab. Acesso em: 11 de Março de 2016, 15:31:00.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). *Resina PET para recipientes*. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/repet8.pdf. Acesso em 27 de Fevereiro de 2016, 11:15:00.

BORNSCHEUER, U.T. *Feeding on plastic – A bacterium completely degrades poly(ethylene terephthalate)*. Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/351/6278/1154>. Acesso em 27 de Maio de 2016, 10:17:00.

BRASIL. Resolução nº 17 de 17 de Março de 2008. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Disponível em: <https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibelink.php?numlink=1-9-34-2008-03-17-17>. Acesso em: 26 de Fevereiro de 2016, 12:00:00.

BRASIL. Lei Nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=313>. Acesso em: 13 de Maio de 2016, 10:00:00.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 04 de Abril de 2016, 10:00:00.

BROWN, David T., “The Legacy of the Landfill: Perspectives on the Solid Waste Crisis”. in: Mustafa, Nabil (ed.), *Plastics Waste Management: Disposal, Recycling, and Reuse*, 1ed., chapter 1 (pp. 1 - 36). New York, NY, USA, Marcel Dekker, Inc., 1993.

CANN, M. C. *Green Chemistry*. Disponível em: <http://www.scranton.edu/faculty/cannm/greenchemistry/portuguese/industrialchemistry/module.shtml>. Acesso em: 15 de Agosto de 2016, 21:09:00.

CASTRO, A. M., 2016. *Relatório parcial de Avaliação de enzimas comerciais na hidrólise de Bis(Hidroxi-etil Tereftalato) (BHET), como sendo um indicativo de seu potencial para hidrólise de PET*. CENPES, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CASTRO, A. M. e VALONI, E. A., 2015. *Relatório parcial de avaliação da atividade hidrolítica de lipases comerciais para aplicação na despolimerização enzimática de PET*. CENPES, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE). Disponível em: <http://cempre.org.br/servico/mercado>. Acesso em: 25 de Novembro de 2015, 15:00:00.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Disponível em: <https://www.cgEE.org.br/>. Acesso em: 02 de Outubro de 2015, 9:15:30.

Chemical Market Associates, Inc.(CMAI). World terephthalates & polyester analysis, 2012. Disponível em: <http://www.businesswire.com/news/home/20111010005868/en/CMAI-Releases-2012-World-Terephthalates-Polyester-Analysis>. Acesso em: 20 de Abril de 2016, 14:00:00.

COSTA, C.Z., ALBUQUERQUE, M.C.C., BRUM, M.C., *et al.* *Degradação Microbiológica e Enzimática de Polímeros: uma revisão*. Quim. Nova, 2014. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=6138. Acesso em: 01 de Maio de 2016, 7:35:00.

DEMAJOROVIC, J. *Da política tradicional de tratamento de lixo à política de gestão de resíduos sólidos. As novas prioridades*. Revista de Administração de empresas. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rae/v35n3/a10v35n3>. Acesso em 24 de Maio de 2016, 08:03:03.

DE PAOLI, M. A. *Degradação e estabilização de polímeros*, 2008. Disponível em: <http://www.chemkeys.com/blog/wp-content/uploads/2008/09/polimeros.pdf>. Acesso em: 14 de Agosto de 2016, 10:15:00.

European Commission DG ENV. *Plastic Waste in the Environment – Final Report, 2011*. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/plastics.pdf> Acesso em 27 de Janeiro de 2016, 15:30:54.

FOGAÇA, J. R. V. *Polímeros: Poluição e Lixo*. Disponível em: <http://alunosonline.uol.com.br/quimica/polimeros-poluicao-lixo.html>. Acesso em: 30 de Março de 2016, 15:15:00.

GREGORY, M.R.; ANDRADY, A.L. “Plastics in the Marine Environment”. In: ANDRADY, A.L.(ed), *Plastics and the Environment*. Chapter 10, p.379-402. New York, Wiley, 2003.

HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E. *Plastics Recycling: Challenges and Opportunities*. Disponível em: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1526/2115>. Acesso em 04 de Janeiro de 2016, 7:45:00.

Instituto do PVC. Disponível em: <http://www.institutodopvc.org/reciclagem/base5.htm>. Acesso em 20 de Junho de 2016, 11:36:24.

Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias. Disponível em: <http://www.inpev.org.br/index>. Acessado em 04 de Maio de 2016, 13:14:00.

Jornal O Globo. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/sociedade/sustentabilidade/brasil-tem-maior-aumento-na-producao-de-lixo-em-10-anos-13478594>. Acesso em: 24 de Novembro de 2015, 16:14:10.

KAPLAN, A., 1998. *Modern Plastics Encyclopedia* 99. 1 ed. Highstown, McGraw-Hill Book Company.

KLEMCHUK, P.P. *Degradable Plastics: A Critical Review*. Polymer Degradation and Stability, 1990. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223284742_Degradable_plastics_A_critical_review. Acesso em: 15 de Dezembro de 2015, 15:10:16.

MAGRINI, A., MELO, C.K., CASTOR, C.A. *et al.* 2012, *Impactos ambientais causados pelos plásticos. Uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, E-papers.

MARTINS, C.L., 2003. *Comportamento de reator de leito fluidizado trifásico aeróbio utilizando diferentes materiais de suporte*. Dissertação de MSc., Faculdade de Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

Ministério do Meio Ambiente, 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/saco-e-um-saco/saiba-mais>. Acesso em: 30 de Agosto de 2016, 14:00:00.

Ministério do Meio Ambiente, 2016. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/web/guest/embalagens-em-geral>. Acesso em: 03 de Novembro, 14:50.

MONTEJO, C., COSTA, C., RAMOS, P. et al. *Analysis and Comparison of Municipal Solid Waste and Reject Fraction as Fuels for Incineration Plants. Applied Thermal Engineering*, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431111001992>. Acesso em: 02 de Setembro de 2016, 12:30:21.

MOORE, C.J., *Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat*, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393510800159X>. Acesso em: 09 de Setembro de 2016, 9:32:00.

MUELLER, R.J. *Biological degradation of synthetic polyesters—Enzymes as potential catalysts for polyester recycling*, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511306002200>. Acesso em: 12 de Setembro de 2016, 15:00:14.

Ocean Conservancy and McKinsey Center for Business and Environment, *Stemming the Tide: Land-based strategies for a plastic-free ocean*, 2015. Disponível em: <http://www.oceanconservancy.org/our-work/marine-debris/mckinsey-report-files/full-report-stemming-the.pdf>. Acesso em: 05 de Agosto de 2015.

OLIVEIRA, M. C. B. R., 2012. *Gestão de resíduos plásticos pós consumo: Perspectivas para a reciclagem no Brasil*. Dissertação MSc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PARENTE, R. A., 2006. *Elementos estruturais de plástico reciclado*, Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil.

Planeta Sustentável. Disponível em: <http://viajeaquibril.com.br/materias/verniz-pode-ser-produzido-com-garrafas-pet>. Acesso em: 14 de Março de 2016, 9:13:20.

Plastic Industry. *Global Business Trends*, 2015. Disponível em: <http://www.plasticsindustry.org/files/Global%20Trends%202015.pdf>. Acesso em: 09 de Agosto de 2016, 16:13:10.

Plastics Europe. *Compelling facts about plastics. An analysis of european plastics production, Demand and recover for 2009, 2010*. Disponível em: http://www.plasticseurope.org/documents/document/20101006091310-final_plasticsthefacts_28092010_lr.pdf. Acesso em: 15 de Julho de 2016, 21:30:00.

Plastics Europe. *Plastics – the Facts 2014/2015- An analysis of European plastics production, demand and waste data, 2015*. Disponível em: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151216062602-plastics the facts 2015 final 30pages 14122015.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151216062602-plastics%20the%20facts%202015%20final%2030pages%2014122015.pdf). Acesso em: 29 de Julho de 2016, 9:13:00.

Plastivida. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/pt/>. Acesso em: 03 de Janeiro de 2016, 9:00:14.

Polyester Analysis Ltda. Disponível em: <https://www.ihs.com/products/world-petro-chemical-analysis-terephthalates-polyester.html>. Acesso em: 03 de Agosto de 2016, 10:00:00.

Projeto Tamar. Disponível em: <http://www.tamar.org.br/>. Acesso em: 27 de Fevereiro de 2016, 15:14:00.

Research and Markets. Disponível em: <http://www.researchandmarkets.com/research/jx6lxx/polyethylene>. Acesso em 10 de Junho de 2016, 10:15:20.

Revista Galileu. *Larvas que se alimentam de isopor podem ajudar a preservar o meio ambiente*. Disponível em: <http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2015/10/larvas-que-se-alimentam-de-isopor-podem-ajudar-preservar-o-meio-ambiente.html>. Acesso em: 14 de Março de 2016, 14:10:10.

Revista A Lavoura. 2012. Disponível em: http://sna.agr.br/wp-content/uploads/alav690_biopolimeros.pdf. Acesso em: 19 de Maio de 2016, 11:15:14.

Revista Plástico Moderno. Disponível em: <http://www.plastico.com.br/>. Acesso em: 5 de Julho de 2016, 16:13:00.

RIBEIRO, B. D.; CASTRO, A. M.; COELHO, *et al.* *Production and use of lipases in bioenergy: A review from the feedstocks to biodiesel production*. *Enzyme Research*. 2011. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/er/2011/615803/abs/>. Acesso em: 10 de Setembro de 2016, 20:00:14.

ROLIM, M. A., 2000, *A reciclagem de resíduos sólidos pós-consumo em oito empresas do Rio Grande do Sul*, Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

SCOTT, G. *Polymers and the Environment*, 1999. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=uvCumlrOnfMC&pg=PA53&lpq=PA53&dq=Polymers+and+the+Environment+scott&source=bl&ots=s-4T87oYrN&sig=pkLABwNNc2KGmGAv5eIl2yxQOXg&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiY67eWqYzPAhXBCpAKHRMJBIYQ6AEIPjAE#v=onepage&q=Polymers%20and%20the%20Environment%20scott&f=false>. Acesso em: 8 de Setembro de 2016, 14:10:00.

ILVA, G.A. *A descoberta do plástico e uma imersão no PET*, 2010. Disponível em: http://www.viannajr.edu.br/files/uploads/20141211_112840.pdf. Acesso em: 26 de Fevereiro de 2016, 7:15:15.

SILVA, K.R.I. *Biodegradação de Polietileno Tereftalato (PET) por fungos ligninolíticos*, 2009. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000435933>. Acesso em: 15 de Abril de 2016, 21:00:15.

SIQUIM/EQ/UFRJ, *Prospectiva tecnológica da cadeia produtiva de transformados plásticos*, 2003. Disponível em: http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1196944561.pdf. Acesso em: 17 de maio de 2016, 16:15:15.

SOARES, E.P., 2012, *Fungos amanzônicos com potencial para degradação de polietileno tereftalato (PET.)* Dissertação de MSc., Escola Superior de Ciências da Saúde, Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, Amazonas, Brasil.

SPINACE, M.A.S; DE PAOLI, M.A. *A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros*, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000100014. Acesso em: 10 de Abril de 2016, 12:00:10.

THOMPSON, R. C; SWAN, S.H; MOORE, C.J *et al. Our plastic age. Philosophical Transactions of the. Royal Society B: Biological Sciences*, 2009. Disponível em: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1526/1973>. Acesso: em 01 de Setembro de 2016, 15:07:05.

United Nations Environment Programme (UNEP). *Global waste management outlook, 2015*. Disponível em: http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste%20Management/GWMO%20report/GWMO_report.pdf. Acesso em: 20 de Junho de 2016, 18:15:00.

United Nations Environment Programme (UNEP). *Valuing Plastic: The Business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry*, 2014. Disponível em: www.unep.org/pdf/ValuingPlastic/. Acesso em 01 de Setembro de 2016, 11:30:30.

VALT, R.B.G., 2007, *Ciclo de vida de embalagens para bebidas no Brasil*. 1ed. Brasília, Distrito Federal, Brasil, Ed. Thesaurus.

VIANA, H., ANTUNES, R. A. Degradação de polímeros e corrosão, 2016. Disponível em: http://www3.fsa.br/materiais/deg_intro.pdf. Acesso em: 20 de Junho de 2016, 15:00:00.

WALTER, T., AUGUSTA, J., MUELLER, R.J., *et al. Enzymatic degradation of a model polyester by lipase from Rhizopus delemar*, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014102299400007E>. Acesso em: 12 de Setembro de 2015, 15:00:00.

World Bank. *A Global Review of Solid Waste Management*, 2012. Disponível em: http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf. Acesso em: 13 de Junho de 2016, 11:13:00.

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). *The New Plastics Economy – Rethinking the Future of Plastics*. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf. Acesso em 06 de Abril de 2016, 12:00:00.

Waste and Resources Action Programme (WRAP). *Environmental Benefits of Recycling, Bio Intelligence Service and Copenhagen Resource Institute*, 2010. Disponível em: <http://www.wrap.org.uk/>. Acesso em: 13 de Janeiro de 2016, 17:00:20.

YANG, Y.; YANG, J.; WU, W.; *et al. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests*. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b02661?journalCode=esthag&>. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2016, 10:00:00.

YOSHIDA, S.; HIRAGA, K.; TAKEHANA, T.; *et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)*. Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/351/6278/1196>. Acesso em: 5 de Julho de 2016, às 14:00:00.