

UNIVERSIDADE SANTO AMARO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CINTHIA CRAVEIRO DA SILVA

**A INFLUÊNCIA FÍSICO-QUÍMICA NAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO
(CO₂) LIBERADAS DO PROCESSO DE REGRANULAÇÃO DOS RESÍDUOS
PLÁSTICOS**

SÃO PAULO
2020

CINTHIA CRAVEIRO DA SILVA

**A INFLUÊNCIA FÍSICO-QUÍMICA NAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO
(CO₂) LIBERADAS DO PROCESSO DE REGRANULAÇÃO DOS RESÍDUOS
PLÁSTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Universidade Santo Amaro
(UNISA), como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química. Orientadores:
Professor Mestre Claudio Monico
Innocencio e Professora Doutora Cristina
Aparecida Vilas Boas de Sales Oliveira.

SÃO PAULO

2020

S579i Silva, Cinthia Craveiro da

A influência físico-química nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) liberadas no processo de regranulação dos resíduos plásticos / Cinthia Craveiro da Silva. – São Paulo, 2020.

93 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química)
Universidade Santo Amaro, 2020.

Orientador (a): Prof. Me. Claudio Monico Innocencio

Coorientador (a): Prof^a. Dra. Cristina Aparecida Vilas Bôas de Sales Oliveira

1. Regranulação mecânica. 2. Redução das emissões de CO₂. 3. Beneficiamento ambiental. I. Innocencio, Claudio Monico, orient. II. Universidade Santo Amaro. III. Título.

Elaborado por Ricardo Pereira de Souza – CRB 8 / 9485

CINTHIA CRAVEIRO DA SILVA

**A INFLUÊNCIA FÍSICO-QUÍMICA NAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO
(CO₂) LIBERADAS DO PROCESSO DE REGRANULAÇÃO DOS RESÍDUOS
PLÁSTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Santo Amaro (UNISA), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadores: Professor Mestre Claudio Monico Innocencio e Professora Doutora Cristina Aparecida Vilas Boas de Sales Oliveira.

São Paulo, 27 de Novembro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Professor(a): _____

Professor(a): _____

Professor(a): _____

Conceito Final: _____

Acima de tudo, agradeço a Deus pela concretização deste trabalho acadêmico. Todavia, esta monografia dedico aos meus familiares, orientadores e em especial meu esposo por ter me dado todo o apoio necessário.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me motivado com determinação e disciplina para a concretização

deste propósito estabelecido em minha vida.

Ao meu esposo Carlos Santos Rodrigues, pelo amor, carinho, paciência, confiança e inclusive, por acrescentar novos aprendizados ao longo deste período acadêmico que serviram de base para a minha carreira profissional. Sem ele, o sonho da faculdade não teria se tornado realidade, pois incessantemente não mediu esforços para que eu prosseguisse com meus estudos até o fim.

Aos meus orientadores: Professor Mestre Claudio Monico Innocencio e Professora Doutora Cristina Aparecida Vilas Boas de Sales Oliveira, pela constante ajuda, orientação e contribuição fundamental na minha formação que prezo dar continuidade.

Agradeço aos demais professores, que contribuíram, involuntariamente com algumas informações relevantes e que agregaram muito na reprodução deste trabalho.

Aos colegas da faculdade, pela colaboração nos trabalhos e apresentações do curso, principalmente aqueles que estiveram presentes desde o início da graduação, embora lamento aos outros que não prosseguiram devido às questões pessoais e, principalmente, por parte financeira. Mas, de algum modo especial marcaram presença em alguns semestres.

Por fim, sou grata a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, participaram deste projeto.

“A grande finalidade do conhecimento não é só conhecer, mas agir”
(Thomas Huxley)

RESUMO

Atualmente, o rápido descarte e obsolescência do plástico sintético no mundo tem sido um dos principais problemas ambientais, devido à grande quantidade de resíduos dispensados de forma irregular e acumulativa, que por muitas vezes não tem garantido uma disposição final adequada. Além disso, as atividades antropogênicas e processos industriais contribuem negativamente para o aumento de Gases do Efeito Estufa (GEE), intensificando o impacto ambiental. Assim, as cooperativas surgem para cumprir um papel primordial nos processos de captação, classificação, limpeza, armazenagem, distribuição, reutilização e na reciclagem dos resíduos pós-consumo. Todo plástico tem potencial para ser reciclado, mas para a maioria dos países, este é um grande desafio. Todavia, a destinação final desses resíduos poderia tomar um rumo mais nobre do que a atual incineração, como no caso da reutilização pós-reciclagem, transformando os resíduos plásticos em grãos para a confecção de novos produtos acabados. O presente estudo teve como objetivo identificar as influências físico-químicas nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) liberadas do processo de regranulação dos resíduos plásticos para a manufatura, bem como destacar a sua importância no cenário atual. A liberação desse gás pelo processo de regranulação mecânica é diversificada em função da natureza estrutural e química dos polímeros, destacando-se o resíduo de Poliestireno (PS) como o que emite mais toneladas de CO_2 (12,73 tCO_2), enquanto o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) emite um menor volume (4,64 tCO_2). Ao invés de descartar as embalagens no meio ambiente em forma de lixo, a reciclagem visa um beneficiamento ambiental, que é promovido pela redução da matéria-prima virgem extraída. Assim, há preservação dos recursos naturais, a redução no consumo de energia nos equipamentos utilizados e nas emissões de GEE's, com redução média de 69,4% do valor total das emissões pertinentes ao processo de fabricação plástica.

Palavras-chaves: Regranulação Mecânica; Redução das Emissões de CO_2 ; Beneficiamento Ambiental.

ABSTRACT

Currently, the rapid disposal and obsolescence of synthetic plastic in the world has been one of the main environmental problems, due to the large amount of waste disposed of irregularly and cumulatively, which on many occasions has not guaranteed an adequate final disposal. In addition, anthropogenic activities and industrial processes contribute negatively to the increase in Greenhouse Gases (GHG), intensifying the environmental impact. Thus, cooperatives seem to play a key role in the processes of capture, classification, cleaning, storage, distribution, reuse and recycling of post-consumer waste. All plastic has the potential to be recycled, but for most countries, this is a huge challenge. However, the final destination of this waste could take a nobler course than current incineration, as in the case of post-recycling reuse, transforming plastic waste into grains for the manufacture of new finished products. The objective of this study was to identify the physico-chemical influences on carbon dioxide emissions (CO_2) released by the regranulation process of plastic waste for manufacturing, as well as highlighting their importance in the scenario current . The release of this gas by the mechanical regranulation process is diversified due to the structural and chemical nature of the polymers, being the Polystyrene (PS) residue the one that produces more tons of CO_2 (12, 73 t CO_2), while low-density polyethylene (LDPE) emits a lower volume (4.64 t CO_2). Instead of disposing of packaging to the environment in the form of garbage, recycling aims at an environmental improvement, which is promoted by reducing the extracted virgin raw material, thus the preservation of natural resources, corresponding to the reduction of energy consumption in the equipment used. and GHG emissions, with an average reduction of 69.4% of the total value of emissions related to the plastics manufacturing process.

Keywords: Mechanical Regranulation; Reduction of Emissions of t CO_2 ; Environmental Improvement.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Simbologia Técnica Brasileira para identificação dos plásticos	26
FIGURA 2 - Mecanismo simplificado do processo de desidrocloreção do PVC.	27
FIGURA 3 - Porcentagem sobre a produção do lixo plástico no Brasil	28
FIGURA 4 - Classificação das diferentes resinas termoplásticas	30
FIGURA 5 - Variação da propriedade físico-química nos polímeros	32
FIGURA 6 - Representação de um polímero e seu respectivo monômero	33
FIGURA 7 - Representação da cadeia macromolecular de um homopolímero	34
FIGURA 8 - Representação da cadeia macromolecular de um Copolímero	35
FIGURA 9 - Representação da cadeia macromolecular de um Terpolímero	35
FIGURA 10 - Representação dos arranjos espaciais constituintes no polímero	37
FIGURA 11 - Estrutura química dos materiais plástico	39
FIGURA 12 - Sistema Hidráulico da Máquina Injetora	44
FIGURA 13 - Borrás plásticas injetadas classificadas por análise visual	47
FIGURA 14 - Esquema de separação dos polímeros por diferença de densidade ..	49
FIGURA 15 - Sistema integrado para a reciclagem de termoplásticos	54
FIGURA 16 - Curva de tensão x deformação em tração para o PEAD e PEBD	57
FIGURA 17 - Resíduo pós-consumo de material plástico industrial	67
FIGURA 18 - Triagem realizada por tipo de resina	68
FIGURE 19 - Resíduos pós-industriais limpos e enfardados	69
FIGURA 20 - Delimitação da Logística Reversa por etapas	70
FIGURA 21 - Hipótese do trajeto percorrido pelo caminhão toco	71
FIGURA 22 - Etapa de moagem com moinho de facas	73
FIGURE 23 - Tanque de Lavagem dos materiais	73
FIGURA 24 - Estufagem nas resinas plásticas	74
FIGURA 25 - Representação do Aglutinador	75
FIGURA 26 - Equipamento de extrusão	75
FIGURA 27 - Granulação por “Corte na Cabeça”	76
FIGURA 28 - Granulador com Rotor e Contra – Facas	77
FIGURA 29 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica dos plásticos	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Destino dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Industriais.....	29
TABELA 2 - Energia absorvida entre as ligações covalentes	38
TABELA 3 - Propriedades Mecânicas dos Polímeros	41
TABELA 4 - Consumo Energético utilizando PEAD.....	52
TABELA 5 - Propriedades das principais resinas termoplásticas.	55
TABELA 6 - Propriedades do PEAD em embalagens Tetra Pak.	56
TABELA 7 - Emissões das fontes móveis por categoria de combustível.	60
TABELA 8 - Fator médio de emissão do CO ₂	61
TABELA 9 - Energia elétrica consumida pela indústria de transformação.....	62
TABELA 10 - Especificação de caminhões para transporte de cargas.	64
TABELA 11 - Categorização da frota.	66
TABELA 12 - Trajetos das resinas pós-consumo.	71
TABELA 13 - Tabela base para a conversão entre as resinas.	80
TABELA 14 - Consumo energético dos equipamentos de regranulação	81
TABELA 15 - Consumo de energia elétrica total dos materiais	84
TABELA 16 - Toneladas de dióxido de carbono pelo consumo energético.	85
TABELA 17 - Emissão em tCO ₂ convertida em percurso	86

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABEN	Associação Brasileira de Enfermagem
ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
ABS	Acrilonitrila /butadieno estireno
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASMTs	Sociedade Americana de Ensaio de Materiais
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CEPIS	Centro de Produção Industrial Sustentável
CMS	Cavalo Mecânico Simples
CMT	Cavalo Mecânico Trucado
EUA	Estados Unidos
EVA	Acetato de Vinila
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FMM	Fator Médio Mensal
GEE	Gases do Efeito Estufa
GPPS	Poliestireno de Propósito Geral
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
IBF	Instituto Brasileiro de Florestas
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MME	Ministério de Minas e Energia
NP	<i>New Plastics</i>
OPS	Poliestireno Orientado
PBT	Peso Bruto Total
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade

PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PET	Poli(tereftalato) de Etileno
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SRR	Semirreboque
UV	Ultravioleta
VUC	Veículo Urbano de Carga
WWF	<i>Worldwide Fund for Nature</i> (Banco Mundial)

LISTA DE SIMBOLOS

%	Porcentagem
$C_6H_5CH=CH_2$	Monômero de Estireno
CO ₂ eq.	Dióxido de Carbono equivalente
CO ₂	Dióxido de Carbono
g/cm ³	Gramas por Centímetro Cúbico
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Gás Oxigênio
SO ₂	Dióxido de Enxofre
tCO ₂	Toneladas de Dióxido de Carbono
tCO ₂ /ha/ano	Toneladas de Dióxido de Carbono por hectare por ano
C	Carbono
C ₃ H ₆	Propileno
Cl	Cloro
CO	Monóxido de Carbono
F	Flúor
H	Hidrogênio
h	Hora
h/mês	Hora por mês
HC	Hidrocarboneto
HCl	Cloreto de Hidrogênio
Kcal/mol	Quilocaloria por mol
Kg	Quilograma
KgCO ₂ / Litro	Quilograma de Gás Carbônico por Litro
kJ/mol	Quilojoule por mol
Km/L	Quilômetro por Litro
m	Metro
Mn	Numérica Média
MP	Material Particulado

Mpa	Mega Pascal
MWh	Megawatts Hora
MWh/ton.	Megawatts Hora por tonelada
N	Nitrogênio
nm	Nanômetro
O	Oxigênio
Si	Silício
Tg/°C	Transição Vítrea em graus Celsius
Tm/°C	Fusão Cristalina em graus Celsius
ton.	Tonelada
v/v	Volume por volume
W	Unidade de Potência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 JUSTIFICATIVA.....	20
3 OBJETIVOS.....	21
3.1 Objetivo Geral.....	21
3.2 Objetivos Específicos.....	21
4 METODOLOGIA	22
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
5.1 Contextualização histórica das embalagens plásticas	23
5.1.1 Definição, função e requisitos.....	24
5.1.2 Simbologia dos Polímeros	25
5.1.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	28
5.2 Estrutura química dos plásticos sintéticos	31
5.2.1 Monômeros.....	31
5.2.2 Homopolímeros.....	33
5.2.3 Copolímeros	34
5.2.4 Terpolímeros.....	35
5.2.5 Características de fusibilidade em termoplásticos e termofixo	36
5.2.6 Comportamento mecânico e aplicações dos polímeros.....	40
5.3 Processo de injeção de materiais plásticos	42
5.3.1 Conformação do material acabado	44
5.3.2 Sistema de limpeza (purga) no equipamento de injeção plástica	45
5.3.3 Resíduo industrial do processo de purga.....	46
5.4 O sistema de reciclagem	48
5.4.1 Gestão ambiental dos resíduos recicláveis.....	49
5.4.2 Reciclagem primária, secundária e terciária	50
5.4.3 Reciclagem Mecânica.....	51
5.4.4 Regranulação dos resíduos termoplásticos	53
5.4.5 A influência do processamento sobre as propriedades dos polímeros	55
5.4.6 Degradação	58
5.5 Método Simplificado de <i>Bottom-up</i>	59
5.5.1 Fatores de Emissão Fixa e Móvel.....	60
5.5.2 Consumo de Energia e Emissões.....	61

5.5.3 Fontes Móveis e Operacional	63
6 ESTUDO DE CASO	67
6.1 Implantação da Logística Reversa na indústria Magonel.....	67
7.2 A subcontratação da empresa New Plastics.....	69
7.3 Distância entre a Indústria Magonel e a NP.....	70
6.4 Etapas da reciclagem	72
6.4.1 Etapa 1: Tratamento preliminar	72
6.4.2 Etapa 2: Redução térmica	74
6.4.3 Etapa 3: Fragmentação	76
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
7.1 Base de Cálculo.....	78
7.2 Absorção de energia no processo de reciclagem	80
7.3 Emissões de CO ₂ nos equipamentos e no transporte rodoviário.....	84
7.3.1 Análise das emissão sobre os equipamentos.....	84
7.3.2 Analise das emissões geradas pelo transporte rodoviário	86
8 CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Muitas empresas são responsáveis por contabilizar as emissões de gases do efeito estufa (GEE), avaliando o impacto ambiental que pode ser causado pelas suas atividades. Um conceito muito utilizado neste seguimento refere-se à pegada de carbono, que permite analisar as emissões diretas e indiretas dos gases do efeito estufa produzidas durante o ciclo de uma atividade ou acumuladas ao longo da vida útil de um produto. Todas as atividades e processos geram emissões atmosféricas de GEE que podem ser convertidos pelas quantidades de gases liberados em dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq), resultando na obtenção da pegada de carbono (ECYCLE, 2020).

A pegada de carbono incorpora-se ao termo da pegada ecológica, que mensura os impactos da ação humana sobre a natureza, avaliando a quantidade de áreas necessárias para suprir a demanda pelos recursos naturais e a capacidade de absorção do CO_2 . Representado na forma de porcentagem, a quantidade de dióxido de carbono liberada corresponde a mais que 50% da pegada ecológica, sendo um fator agravante desde a década de 70. Para a neutralizar essas emissões geradas, um modelo do Instituto Brasileiro de Florestas (IBF) pode quantificar o número de árvores a serem plantadas em relação a pegada de carbono (ECYCLE, 2020).

Em particular, os resíduos poliméricos têm se destacado pelo crescente consumo, com ênfase nas embalagens não degradáveis que apresentam ciclo de vida muito curto, e por efeito de intensidade ambiental. Quanto ao acúmulo de resíduos no solo, estes devem ser avaliados com mais cautela sobre a incidência dos gases de alta concentração na atmosfera. A produção, a utilização e a eliminação dos seus rejeitos emitem o dióxido de carbono quando exposto à elevadas temperaturas ou deterioração em razão da exposição desse material na superfície (ECYCLE, 2020).

Os gases poluentes que são expelidos para a atmosfera atuam conjuntamente com outros flatos geradores do efeito estufa que intensificam o desequilíbrio ambiental, promovendo assim as alterações no clima e acelerando o aquecimento global (HOPEWELL et al, 2009). Os danos causados pelo inadequado manejo desses resíduos, podem afetar os ecossistemas em todo o planeta terra. Uma das alternativas viáveis para lidar com os resíduos sólidos, permite: a redução do volume acumulado em aterros; a diminuição dos impactos ambientais; a economia de

recursos naturais da fonte geradora; a geração de novos produtos; e a consumir menos matéria-prima da segunda geração petroquímica, que por sua vez pode ser mais adequada ao conceito da reciclagem dos materiais pós- consumo.

O fator preponderante do aumento da reciclagem de um certo tipo de material está ligado diretamente com o mercado. Desta forma, alguns materiais - como alumínio e poli(tereftalato) de etileno (PET) - possuem maior valor comercial, apresentam maiores índices de reciclagem, enquanto outros tipos de materiais podem se tornar um desafio para a reciclagem por serem baratos, incorporarem impurezas ou serem combinados com outras resinas (FORMIGONI, 2007).

Com o aperfeiçoamento da reciclagem de polímeros nas indústrias, há agregação de valores comerciais aos produtos pós-consumo e a aplicação no ciclo contínuo (reverso) do processamento relacionado ao custo/benefício, promovendo o aumento da viabilidade da reciclagem. Apesar da reciclagem mecânica ser uma alternativa válida em muitos casos, pode ser uma opção custosa e limitada, dado que alguns polímeros são incompatíveis (SUBRAMANIAN, 2000), embora sejam influenciados pela degradação parcial dos materiais quando inseridos novamente na linha de produção.

Na reciclagem química, destaca a reação de decomposição, denominada de pirólise. É um processo termoquímico, onde os plásticos são aquecidos em uma atmosfera livre de oxigênio sob altas temperaturas, visando o retorno dos materiais descartados à cadeia química dos seus componentes de origem (LÓPEZ, 2010).

2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento deste trabalho é de suma importância para a sociedade no que se refere a reciclagem, pois com o aumento da população, uma grande quantidade de material reciclável é desperdiçada no meio ambiente em função do volume dos resíduos que são desprezados na superfície terrestre, trazendo a preocupação sobre o seu destino e a preservação da natureza. Portanto, promover a reciclagem e o reaproveitamento, reduzirá as dimensões do impacto ambiental e químico.

Com base nessa premissa, aplicou-se um modelo de logística reversa para os cinco tipos de resíduos sólidos predominantes num processo de injeção termoplástica, que serão reintegrados gradualmente na linha produtiva dos seguintes materiais utilizados a seguir, como: Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Poli(tereftalato) de etileno (PET), Polietileno (PE) que é baseado em seus derivados como, o Polietileno de alta densidade (PEAD) e o Polietileno de baixa densidade (PEBD). Como a reciclagem mecânica necessita de um alto desempenho energético para a caracterização dessas resinas, o impacto pode ser maior com relação, às estruturas das cadeias carbônicas que emitem diferentes quantidades do gás de CO₂ eq.

A propriedade físico-química no resíduo plástico, dificulta a decomposição natural no meio ambiente, sendo necessária a disposição de grandes áreas para a destinação final desses rejeitos em aterros sanitários, que afeta diretamente nos processos de compostagem e estabilização biológica. Sobretudo, o controle das emissões pode ser eficaz ao setor produtivo e evitar o lançamento de GEE a céu aberto que são liberadas pelas atividades do próprio fabricante.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Identificar a influência físico-química nas emissões de CO₂ liberadas do processo de regranulação dos resíduos plásticos para a confecção de novos produtos acabados e deste modo estabelecer o beneficiamento ambiental.

3.2 Objetivos Específicos

A) Levantar um aspecto físico-químico que interfere no processo de decomposição (termólise) do material, que potencializa a cisão (quebra) das ligações na cadeia principal ou em grupos laterais nos polímeros;

B) Determinar as emissões de CO₂ eq. para todos os plásticos analisados, através dos dados do consumo energético nos equipamentos por rede elétrica (em MWh/ mês) e no transportador de resíduos que emite o gás pelo processo de combustão, aplicando a metodologia simplificada de *Bottom-up*;

C) Obter um valor de eficiência média na redução das emissões de CO₂ eq., contabilizando o processo com a matéria-prima virgem e a reutilização do resíduo a ser regranulado para a confecção de novos produtos acabados.

4 METODOLOGIA

Realizada por pesquisa quali-quantitativa envolvendo referências bibliográficas de livros, sites oficiais, artigos, endereços eletrônicos e monografias disponibilizadas pelo *Google* acadêmico. Para comprovar os resultados das emissões CO₂ eq. pelo setor industrial e automotivo, fez-se uma estimativa de redução deste gás, que é liberado pelo processo de regranulação e confecção dos cinco materiais plásticos analisados (PS, PET, PEBD, PEAD e PP), utilizando uma metodologia paralela denominada de *Bottom-up*.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Contextualização histórica das embalagens plásticas

Segundo Evangelista (2001), na pré-história, o conceito de embalagens está sobre o modo de vida social, desde os primórdios até os tempos remotos. Houve uma necessidade em reproduzir recipientes com o objetivo de transportar os alimentos e água de um lugar para outro, em virtude da caça, exploração e procura de novos abrigos. Nesta época, as famílias não se preocupavam em armazenar comida, embora tudo o que se obtinha na natureza era preparado e consumido para a sua subsistência.

Os recursos neste período dependiam das habilidades, utilizando-se meios naturais, como cascas de coco ou conchas do mar – ditas as primeiras “embalagens” - que serviam como simples recipientes para beber ou estocar, tendo como conhecimento destas primeiras “embalagens”. (BENZI, 1993). A natureza criava vínculos com essa sociedade primitiva, promovendo ensinamentos quanto a conservação dos alimentos que quando observada, conclui-se que existe um revestimento pelicular tido como proteção *in natura* do reino animal ou vegetal. (EVANGELISTA, 2001).

As técnicas de produção das “embalagens”, como conhecidas no contemporâneo, foram substituídas por diversos materiais. Por volta do primeiro século depois de Cristo, a primeira matéria-prima foi o vidro, utilizado na sua maior escala. No início do século XIX, surgiram as latas compostas por ferro e aço de baixo teor de carbono revestido com estanho. O alumínio surgiu devido à alta de preços do material laminado estanhado conhecido como “folha-de-flandres” (ABRE, 2004).

A dependência por acondicionar alimentos em determinados tipos de materiais tem afetado os hábitos de consumo para o armazenamento de alimentos em todo mundo. O plástico substituiu boa parte dos metais, papel (celulose) e vidro, por apresentar vantagens quanto a sua densidade (peso molecular), preço (viabilidade de custos) e facilidade de produção (em menor tempo) (IDOL e LEHMAN, 2004).

Os polímeros na engenharia química são obtidos na forma de monômeros e/ou por estruturas simples que quando combinadas provocam a reação química chamada polimerização, diversificando-se na adição de aditivos orgânicos e

inorgânicos sobre a mistura polimérica ou quanto ao tipo de estrutura simples combinada. O polímero começou a ser reaproveitado como um subproduto petroquímico na Segunda Guerra Mundial entre outros objetos que derivam do refino do petróleo (VAN WILLIGE, 2002).

As indústrias de resinas plásticas ganharam espaço no setor econômico a partir dos anos 60, embora tenha sido nos anos 70 até os dias atuais, que a indústria brasileira de embalagens vem atuando universalmente em cima das tendências do mercado: produzindo embalagens especiais; dando maior ênfase na resistência do plástico que é exposto à determinadas temperaturas; modificando a transparência plástica para a proteção contra a luz e fator calorífico; reforçando o material sem que venha perder a plasticidade, afim de que não venha evidenciar vestígios de violação no produto revestido (ABRE, 2004).

A substituição das resinas plásticas por alternativas viáveis, que promovam a rápida degradação dos resíduos pós-consumo, deve ser atualizado, pois um estudo demonstra que se não houvesse embalagens plásticas para portar os alimentos, o peso médio de recipientes mais pesados, se triplicaria. Se os plásticos fossem abandonados, o transporte e o volume total de resíduos aumentariam significativamente (LIMA, R. et al. 2001). No entanto, é bastante pertinente admitir que os materiais plásticos contribuíram e contribuem com a qualidade de vida no mundo de hoje (PINTO et al., 2012).

5.1.1 Definição, função e requisitos

De acordo com o dicionário Michaelis (2013), a definição para as embalagens é representada abaixo:

- 1) O ato ou efeito de embalar; acondicionamento.
- 2) Proteção externa da mercadoria, para a sua apresentação no mercado, podendo ser de metal, plástico, papel, tecido, papelão etc.

Segundo a Associação Brasileira de Embalagem (ABRE, 2020) define que o plástico como embalagem é uma espécie de recipiente ou envoltura que armazena produtos perecíveis ou não, temporariamente, individualmente ou agrupando

unidades, tendo como principal função de protegê-los e estendendo o seu prazo de vida, viabilizando sua distribuição, identificação e o consumo.

As embalagens têm como principais funções (FELLOWS, 2002):

- A) Conter o alimento preservado desde a produção até o momento do uso pelo consumidor final;
- B) Protegê-lo contra condições ambientais adversas por toda a cadeia de distribuição;
- C) Instruir o consumidor quanto a aplicação ou uso;
- D) Apresentar bom desempenho na linha de produção;

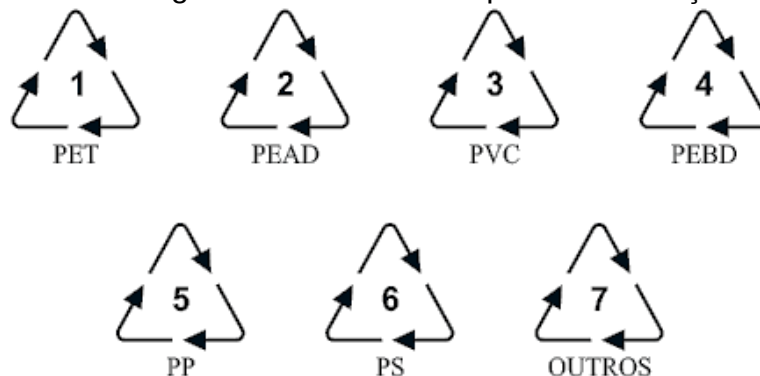
Resumidamente, deve garantir que o alimento esteja acondicionado corretamente e atendendo às necessidades do mercado consumidor (OLIVEIRA, 2006). Nota-se que o autor cita alguns requisitos básicos das embalagens, quanto a funcionalidade do material, definindo-o em três termos essenciais: Contenção, Proteção e a Comercialização.

O ato de conter o produto na embalagem plástica devidamente elaborada é aliado à facilidade do processo de envasamento e contenção, para que o produto não seja contaminado após o envase e a última selagem (lacração). Quanto à proteção oferecida pelas embalagens, devem ter uma resistência superior aos choques mecânicos, que comprometem com a modelagem e as possíveis perdas do produto revestido. O fabricante deve registrar no rótulo das embalagens as características do produto ao consumidor, garantido a fidelização dos consumidores a excelentes produtos embalados nos recipientes plásticos (INSTITUTO DE EMBALAGEM, 2009).

5.1.2 Simbologia dos Polímeros

O sistema de códigos para a identificação das resinas, segue conforme a norma da ABNT NBR 13230 (2006) que é apresentado na figura 1. Esses elementos/códigos participam do controle de qualidade e são destinados ao setor de triagem dos materiais pós-consumo, pois o processo de identificação prévia auxilia na reciclagem mecânica de embalagens plásticas, assegurando que todo o conteúdo recebido pela unidade recicladora seja o mais homogêneo possível (COLTRO, 2002).

FIGURA 1 - Simbologia Técnica Brasileira para identificação dos plásticos.

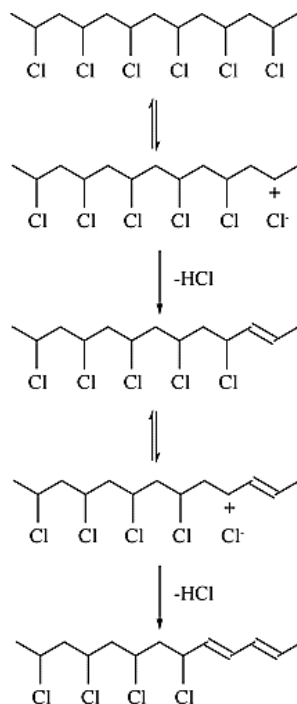


- 1 - Politereftalato de etileno
- 2 - Polietileno de alta densidade
- 3 - Policloreto de vinila
- 4 - Polietileno de baixa densidade
- 5 - Polipropileno
- 6 - Poliestireno
- 7 - Outros

Fonte: ABNT NBR 13230, 2006.

Alguns aditivos podem ser plastificantes, reduzindo a rigidez ou a fragilidade do material e quanto maiores concentrações adicionadas, maior será a resistência entre as cadeias que compõe a molécula. Em contrapartida, os estabilizantes podem melhorar o comportamento do plástico na deformação e proteger os polímeros contra a ação dos raios ultravioletas, ao calor ou ainda, à radiação gama (IDOL e LEHMAN, 2004).

O polietileno linear de baixa densidade (PELBD) adota a mesma simbologia do PEBD (número 4), sendo que os materiais podem ser misturados e reciclados em um mesmo processo. No entanto, polímeros que contêm a estrutura do PVC apresentam dificuldades técnicas para a reciclagem mecânica, devido à instabilidade térmica frente aos respectivos componentes (PLASTIC NEW ZEALAND, 2020). A exposição do polímero PVC sem a adição de estabilizantes, pode, dependendo da intensidade (concentração) e tempo de exposição, causar a liberação ácido clorídrico (HCl), acompanhado da formação de ligações cruzadas na cadeia (polienos), resultando em uma rápida degradação (desidrocloração), revelado pela variação de coloração amarelada até predominar o marrom escuro (FIGURA 2).

FIGURA 2 - Mecanismo simplificado do processo de desidrocloração do PVC.

Fonte: Adaptado de Simon, 1992.

A desidrocloração envolve uma reação progressiva de átomos de cloro e hidrogênio, com a formação de ligações duplas entre os átomos de carbono na mesma posição onde os átomos estavam ligados, dando origem a uma estrutura de cloro alílico com o próximo átomo de cloro altamente ativado na cadeia para promover a degradação, segundo o esquema apresentado. O desenvolvimento da coloração é atribuído ao conjunto de duplas ligações conjugadas formadas nesse processo (BRAUN, 1986).

Segundo Jennings e Starnes (2005), as sequências de polienos na desidrocloração conferem uma coloração indesejada ao polímero devido ao número de duplas ligações conjugadas. Estas sequências também são facilmente oxidadas, sofrem foto transformações sob efeito da radiação ultravioleta (UV), formando as ligações cruzadas e uma série de compostos aromáticos na estrutura quando a resina é aquecida, como acontece em situações de combustão.

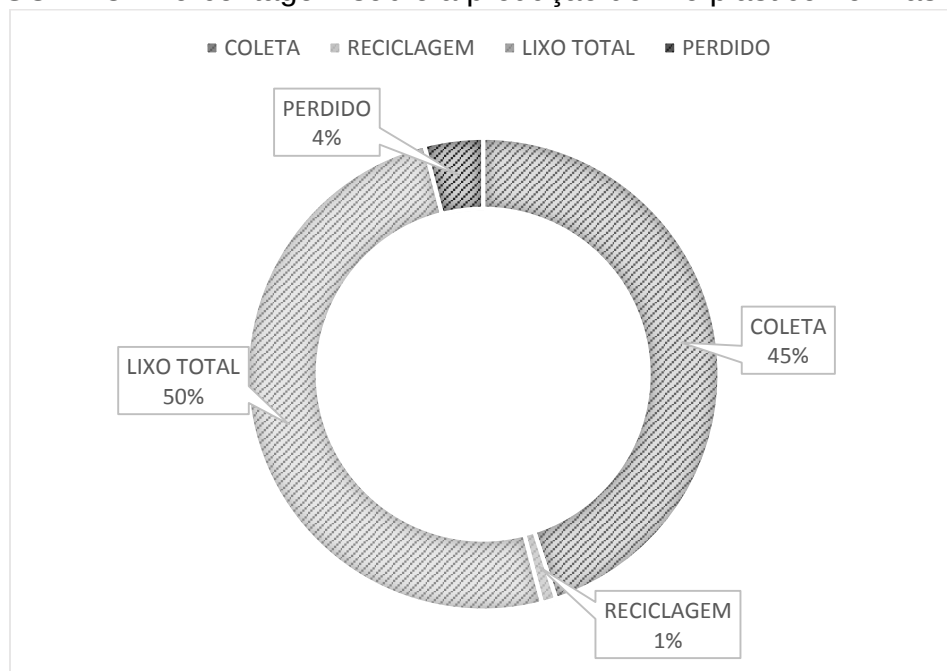
A presença de ligações cruzadas (unem os fios de polímeros) alteram profundamente as propriedades do polímero, "amarrando" as cadeias e impedindo o deslizamento de umas sobre as outras. O polímero fica mais duro e resistente, sua plasticidade diminui e ele torna-se mais insolúvel e infusível (NÓBREGA; SILVA; SILVA, 2005, p. 535).

De acordo com Nóbrega, Silva e Silva (2005), quanto maior for a quantidade dessas ligações no polímero, mais rígido, menos elástico e menos flexível será o produto. As ligações cruzadas ocorrem entre os monômeros de moléculas lineares, produzindo polímeros tridimensionais com alta massa molar.

5.1.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

A PNRS (Lei Federal 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404 de 2010) determina que a produção de lixo plástico produzido (FIGURA 3), passível de coleta pelo serviço de limpeza pública ou particular, terá uma destinação ambientalmente adequada dos rejeitos somente quando não é reaproveitado, seja por meio da reciclagem, da reutilização, da compostagem ou da geração de energia.

FIGURA 3 - Porcentagem sobre a produção do lixo plástico no Brasil



Fonte: Adaptado do Banco Mundial, 2019.

Em conformidade com os dados disponibilizados pelo Banco Mundial, no ranking de produção do lixo plástico captado anualmente, o Brasil ocupa o 4º lugar no mundo, com 11,35 milhões de toneladas de lixo, ficando atrás dos Estados Unidos (EUA), China e Índia (BANCO MUNDIAL, 2019). Desse total, em média 91% foram coletados, correspondendo a mais de 10,3 milhões de toneladas e apenas 145 mil

toneladas (1,28%) foram efetivamente recicladas, ou seja, reprocessadas na cadeia de produção como produto secundário. Em comparação mundial, o índice da pesquisa é um dos menores em relação à média global de reciclagem plástica, que é de 9% (BANCO MUNDIAL, 2019).

Os principais mercados de geração de lixo plástico que são coletados pelas unidades de lixo urbano e industrial (TABELA 1) revelam que do total gerado, parte é incinerado e/ou reciclado, em relação às formas de reciclagem aplicadas. Serão relatados alguns valores aproximados a cada país de origem, destacando o Brasil, como o que menos investe na recuperação do material e não realiza incineração do lixo capturado.

TABELA 1 - Destino dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Industriais

País	Total de lixo plástico gerado*	Total incinerado	Total reciclado	Relação produção e reciclagem
Estados Unidos	70.782.577	9.060.170	24.490.772	34,60%
China	54.740.659	11.988.226	12.000.331	21,92%
Índia	19.311.663	14.544	1.105.677	5,73%
Brasil	11.355.220	0	145.043	1,28%
Indonésia	9.885.081	0	362.070	3,66%
Rússia	8.948.132	0	320.088	3,58%
Alemanha	8.286.827	4.876.027	3.143.700	37,94%
Reino Unido	7.994.284	2.620.394	2.513.856	31,45%
Japão	7.146.514	6.642.428	405.834	5,68%
Canadá	6.696.763	207.354	1.423.139	21,25%

Fonte: Banco Mundial, 2019.

* O total de lixo plástico coletado é subdividido como resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, resíduos de construção, lixo eletrônico e resíduos agrícolas, na fabricação de produtos durante um ano.

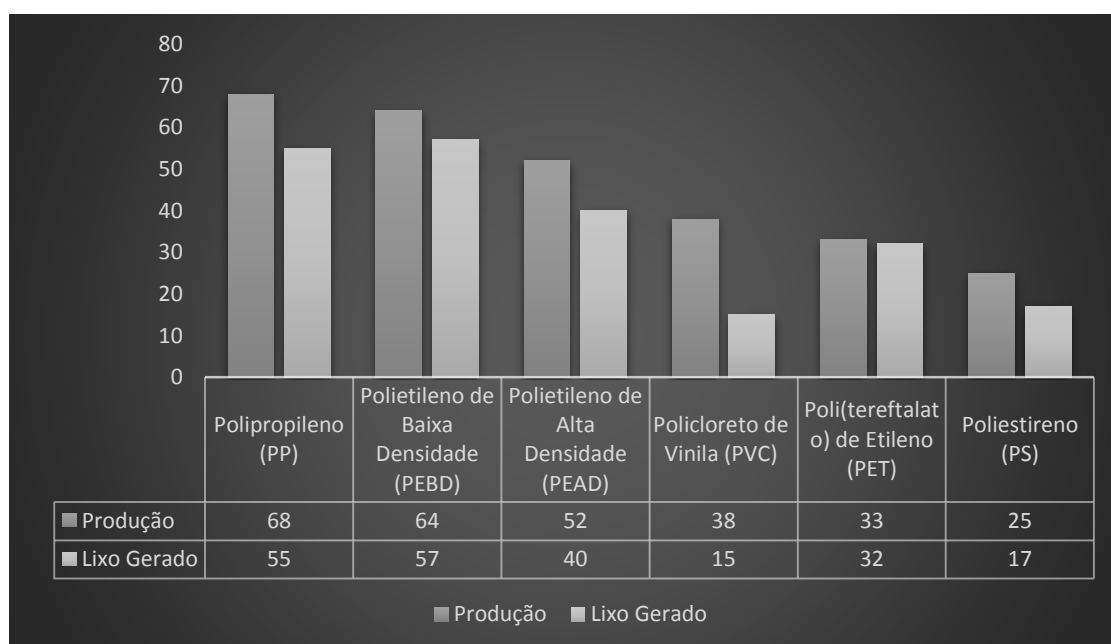
A pequena porcentagem de lixo reciclado passa por usinas de reciclagem, que mesmo fazendo a separação, há uma perda do material por conta da contaminação por multicamadas ou possuir baixo valor agregado. O estágio final desse tipo de resíduo deverá ser em Aterros Sanitários regulamentados (BANCO MUNDIAL, 2019). No relatório da WWF ou Banco Mundial (*Worldwide Fund for Nature*) “calcula-se que 7,7 milhões de toneladas de plástico são destinados corretamente, embora competem com 2,4 milhões de toneladas de lixo descartado em forma irregular, sem qualquer tipo de tratamento e que acabam em lixões a céu aberto e na formação das ilhas de

lixo em superfície dos oceanos, que contribui com 54,7% do oxigênio na atmosfera”, disse Anna Carolina Lobo, gerente do *Programa Mata Atlântica e Marinho do WWF-Brasil*

Os monômeros utilizados na fabricação de plásticos são derivados dos hidrocarbonetos fósseis, ou seja, nenhum dos plásticos é biodegradável. Por sua vez, acumulam-se ao invés de decompor nos aterros ou em ambiente natural e a única maneira de eliminar os resíduos sólidos é por métodos convencionais, aplicando o tratamento térmico destrutivo, como a combustão ou a pirólise quando estes não tiverem mais utilidade (DKA BARNES et al., 2009). Por outro lado, no processo de incineração, uma grande parte contribui na geração de gases tóxicos (SONG e HYUN, 2001).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) fez uma pesquisa de classificação das resinas termoplásticas, que faz uma relação entre a fabricação de determinados tipos de plásticos e a quantidade gerada pelo fabricante, constituída por uma parcela de resíduos sólidos industriais e outra do setor doméstico. Neste infográfico abaixo (FIGURA 4), observa-se que o polipropileno e polietileno de baixa densidade, correspondem a um alto valor de produção do material plástico e respectivamente na segunda coluna mostra os índices de todo o lixo gerado no meio ambiente.

FIGURA 4 - Classificação das diferentes resinas termoplásticas.



Fonte: Adaptado do Geyer, 2017 (FAPESP).

Aliás, essas resinas termoplásticas possuem um forte apelo para a divulgação do destino adequado e sobre a implementação de novas técnicas para revalorização dos resíduos que são dispensados no meio ambiente (PARENTE, 2000).

5.2 Estrutura química dos plásticos sintéticos

Os plásticos estabelecem estruturas químicas diferenciadas, conforme os processos petroquímicos das refinarias de petróleo. Segundo a etimologia da palavra *polímero*, tem-se a combinação do termo “meros” de origem grega, que significa “aquele que faz parte de algo” e “poli”, quer dizer, “vários ou muitos”. Então, uma parte do plástico que é constituída por átomos combinados, forma uma molécula denominada monômero e no processo de polimerização que depende do tamanho e da natureza do material. Essas cadeias só são formadas pela união de vários monômeros distribuídos ao longo de longas cadeias que resultam em uma quantidade de material com diferentes propriedades.

A forte união existente entre os átomos de uma cadeia polimerizada por monômeros, estabelece uma grande força de atração entre as moléculas que se unem para a formação das cadeias moleculares, geralmente por meio de ligações triplas ou duplas, que podem ser corrompidas pela alteração de fatores, como: temperatura, pressão, concentração, dentre outros. Os polímeros são macromoléculas compostas por unidades de repetição (monômeros), moléculas com massa molecular baixa ligadas entre si, predominantemente por ligações covalentes (JÚNIOR, 1998; PITT et al., 2011).

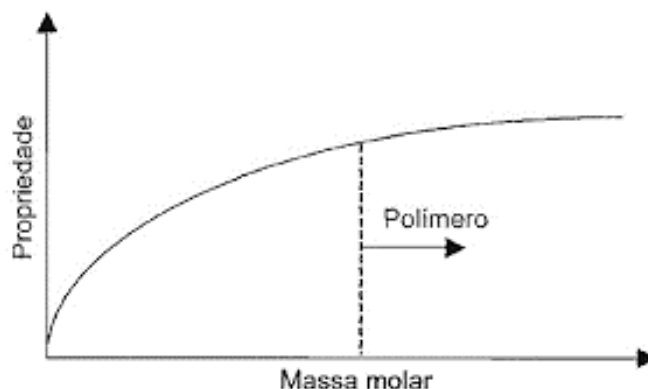
5.2.1 Monômeros

Quanto às propriedades mecânicas nos polímeros, estes possuem alguns aspectos físico-químicos, tais como: ter resistência aos impactos ou ser quebradiço; coloração transparente ou incolor; flexibilidade ou rigidez; inflamabilidade ou resistência ao fogo; ter características de isolantes elétricos ou condutores de eletricidade; além de outras propriedades fundamentais para a sua especificação. (FELTRE, 2004).

Canevarolo (2006) diz que a massa molar dessas cadeias poliméricas atua de forma significativa quanto a alteração das propriedades físicas do material, mesmo

que tenha pouca variação no tamanho das moléculas desses polímeros. Graficamente, conforme ilustra a figura 5, a relação dessas variações quanto a propriedades físico-químicas dos polímeros pode variar em função da massa molar.

FIGURA 5 - Variação da propriedade físico-química nos polímeros.



Fonte: Canevarolo, 2006.

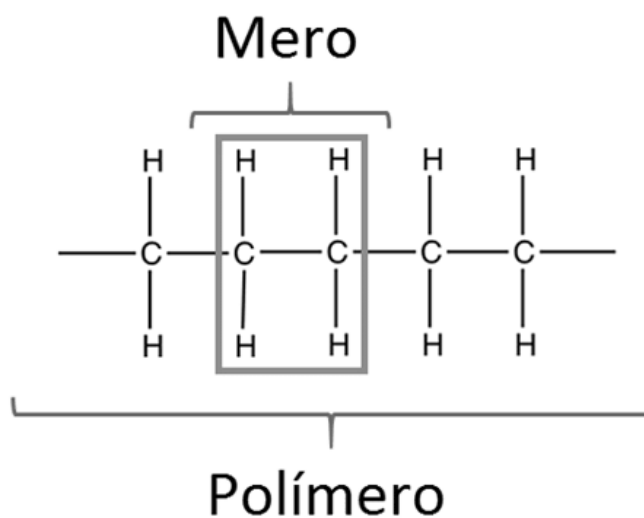
É possível verificar que quanto maior for a massa molar do polímero, menor será a propriedade física de mudanças, que é diminuída com o aumento do tamanho da molécula. Caso o polímero apresente uma baixa massa molar, automaticamente apresentará uma propriedade física alta, sujeita a alterações quanto a processabilidade do mesmo (CANEVAROLO, 2006).

Todos os polímeros de alta massa molar possuem cadeias longas ou monômeros interligados entre si por ligações polares, onde uma força de atração promovida sobre as cadeias polimerizadas terá maior intensidade. Isso permite algumas condições em comum nesses materiais chamados de polímeros cristalinos (estrutura definida), por apresentar alta temperatura de fusão, maior resistência física, baixo ponto de ruptura (quebradiços) e resistência ao calor (NÓBREGA; SILVA; SILVA, 2005).

Nas moléculas de monômeros apolares, a força de atração será fraca pela formação de um polímero amorfo que não possui estrutura atômica definida (oposto da estrutura cristalina). Este apresenta as seguintes características: Baixo ponto de fusão, maleabilidade, elasticidade e permeabilidade (PITT ET AL., 2011), como por exemplo os hidrocarbonetos derivados do petróleo com ligações simples e duplas (respectivamente, alcanos e alcenos), levando em consideração o estireno, etileno, propileno ou cloreto de vinila, entre outros.

As estruturas dos monômeros são representadas entre “chaves” na forma molecular e na parte externa, será inserida uma letra “n” para sinalizar o grau de repetição do mero. A figura 6 é a representação gráfica dessas repetições formando o polímero, com um monômero do etileno para ser polimerizado e formar o polietileno.

FIGURA 6 - Representação de um polímero e seu respectivo monômero.

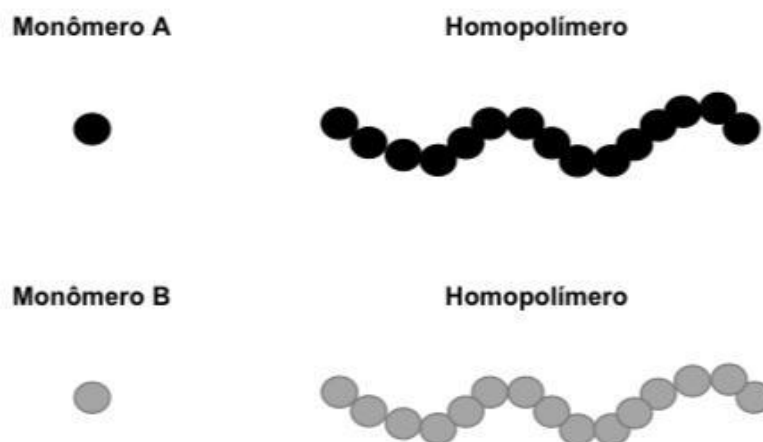


Fonte: Silva, K.V., 2017.

5.2.2 Homopolímeros

Os homopolímeros possuem uma estrutura interligada por monômeros numa mesma espécie polimérica, ou seja, um plástico resultante da polimerização de um único tipo de monômero. Como exemplos têm-se o poliestireno, polietileno, polipropileno ou cloreto de polivinila (FELTRE, 2004). A estrutura da cadeia macromolecular aparece representada na figura 7 em coloração preta como monômero A e em cinza como monômero B.

FIGURA 7 - Representação da cadeia macromolecular de um homopolímero.



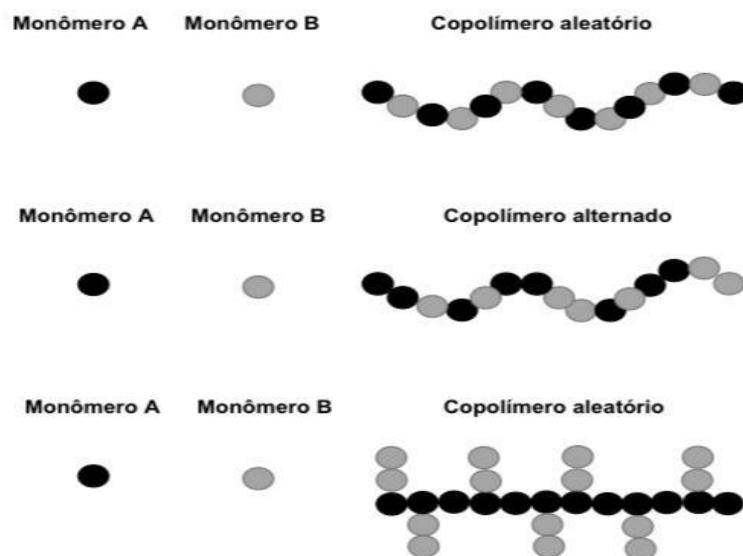
Fonte: O autor.

2.3 Copolímeros

Os copolímeros são estruturas polimerizadas por dois tipos de monômeros em sua cadeia macromolecular polimérica. Estas misturas podem ser homogêneas ou não, sendo utilizados monômeros diferentes para adequar as características dos polímeros a fim de obter um produto final.

As propriedades dos plásticos podem ser modificadas para atender necessidades específicas, tais como a copolimerização que ajuda a melhorar as propriedades mecânicas dos materiais plásticos. Cada molécula que atua na formação dos polímeros apresenta diferentes estruturas que se rearranjam em categorias dispostas alternadamente, chamado de copolímero de enxerto (FIGURA 8).

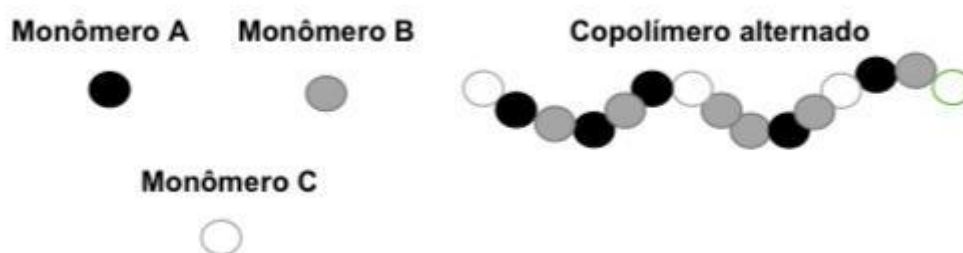
A síntese (ou adição) do polímero, que é capaz de obter outras propriedades físico-químicas pela união de pequenas moléculas em ligação covalente, promove a formação de muitas cadeias macromoleculares que compõem um determinado material polimérico com inúmeras funcionalidades. Um exemplo importante é a obtenção de blendas poliméricas – também conhecidas como materiais de ligas -, com propriedades melhores do que o material individual e sem reação química (PEREIRA. E. R, 2014).

FIGURA 8 - Representação da cadeia macromolecular de um Copolímero.

Fonte: O autor

5.2.4 Terpolímeros

Os terpolímeros, são aqueles que possuem três ou mais tipos de monômeros em sua estrutura molecular, sendo que nas indústrias, estes são referenciados como copolímeros. O exemplo mais mencionado na literatura é o acrilonitrila – butadieno – estireno (ABS), que é um terpolímero amorfo formado pela copolimerização de três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. Este foi desenvolvido para aplicações que necessitem de uma boa resistência e um bom aspecto visual, sendo mais indicado para a produção de carcaças de eletrodomésticos (FELTRE, 2004). Graficamente, segue o formato da cadeia macromolecular dos terpolímeros, conforme a figura 9.

FIGURA 9 - Representação da cadeia macromolecular de um Terpolímero.

Fonte: O autor

5.2.5 Características de fusibilidade em termoplásticos e termofixo

Geralmente, a primeira grande diferenciação nos polímeros está situada na divisão entre o caráter termoplástico ou termorrígido (ou termoestável), cuja classificação se baseia nas características de fusão desses materiais apresentados. Para Remy, Gay e Gonthier (2002), as resinas termoplásticas são materiais que podem ser aquecidos até o ponto de fusão para serem moldadas e o endurecimento dessas resinas ocorre com o esfriamento (Por exemplo: PP, PS, PP, PEBD, PEAD e outros). Segundo Santos e Mól (2010), os polímeros também podem ser classificados como elastômeros, devido ao seu comportamento mecânico.

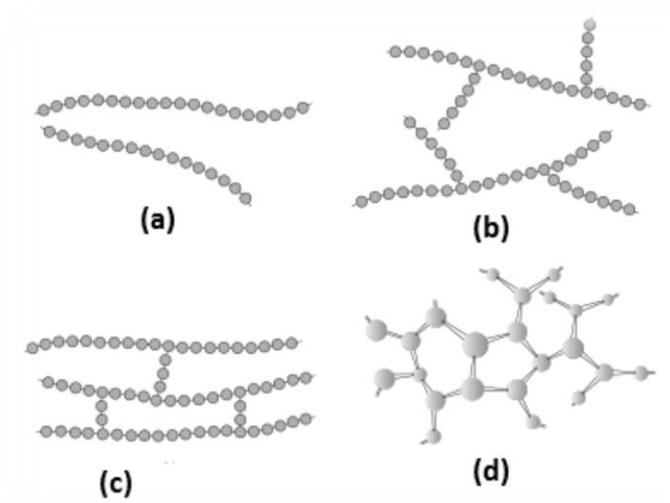
Neste caso, o processo é reversível porque ao serem aquecidas, as cadeias poliméricas, que não são interligadas entre si, podem deslizar uma sobre as outras e, por isso, um termoplástico sólido pode ser derretido. Este ciclo reversível de amolecimento e endurecimento é o que permite a reciclagem. Quanto mais vezes a operação for repetida, maior será a degradação do material, e por isso, muitos plásticos apresentam um número máximo de vezes que podem ser reciclados (REMY, GAY E GONTHIER, 2002).

De acordo-com Petrucci (1976), as resinas termofixas são rígidas e frágeis, sendo muito estáveis a variações de temperatura (por exemplo: as resinas fenoplásticas, as resinas aminoplásticas, as resinas epóxi e os silicones). O aquecimento do polímero acabado promove a decomposição do material antes de sua fusão, tornando sua reciclagem complicada. Uma vez prontos, não mais se fundem. Quanto a sua estrutura, pode ser comparado à cordões ligados fisicamente entre si como uma rede [d] / [c] ligações cruzadas (reticulado) de malha fina, formado por numerosas ligações, sem que tenha tanta liberdade como os termoplásticos. Eles apresentam maior estabilidade dimensional, mantêm suas propriedades em uma larga faixa de temperaturas, sendo mais resistentes aos solventes e muito utilizados em ambientes externos.

A formação dos polímeros se dá através de reações químicas com o auxílio de calor (temperatura) e pressão para a formação das cadeias poliméricas, como na representação das quatro variações sofridas nas estruturas moleculares desses polímeros (FIGURA 10). Os aditivos químicos inseridos à estrutura molecular são componentes que controlam o comprimento apropriado da molécula, alterando ou

melhorando as propriedades mecânicas, físicas ou químicas desses materiais, obtendo assim propriedades desejadas (Callister, 1997).

FIGURA 10 - Representação dos arranjos espaciais constituintes no polímero.



Fonte: Callister, 2008

Estruturas moleculares dos polímeros: (a) linear, (b) ramificada, (c) com ligações cruzadas e (d) em rede.

Os polímeros termorrígidos que possuem monômeros multifuncionais, ou seja, que contenham três ou mais ligações ativas, formam as redes tridimensionais de ligações cruzadas, como nos materiais borrachosos (elastômeros) que apresentam este tipo de ligação. Quando aplicados pressão e aumento de temperatura, esses monômeros que se interligam entre si, estimulam o processo de “cura” do polímero para a polimerização completa e formação do plástico termorrígido. Por conta da forte interligação molecular, as moléculas ficam pressas, impedindo-os de amolecer. Mesmo promovendo elevadas temperatura para a fusão em determinado grau, o calor começa a degradar a estrutura formada somente quando aquecido novamente (DOWNLING, 1993).

A estrutura molecular linear dos termoplásticos apresenta - se na forma de cordões soltos, porém agregados como num novelo de lã numa estrutura linear [a] como na figura 3, possibilitando a fusão por diversas vezes. Ademais, alguns podem até se dissolver em solventes e a temperatura ambiente e possuem características maleáveis, rígidas ou mesmo frágeis. Estes se diferenciam entre si, devido ao

conjunto de polímeros agrupados, que gera uma repetição nesses pequenos particulados, conhecidos por monômeros. Logo, a sua reciclagem torna-se possível, característica bastante desejável atualmente. (PINTO et al., 2012).

As estruturas químicas são ligações predominantemente covalentes. A tabela 2 mostra os tipos de ligações existentes (tripla, dupla ou simples), as energias associadas a estas e a distância entre os átomos ligados (comprimento da ligação).

TABELA 2 - Energia absorvida entre as ligações covalentes

Energia		Ligações Covalentes	Comprimento (nm)
kJ/mol	kcal/mol		
890	212	C $\equiv$ C	0,12
680	162	C = C	0,13
535	127	C = O	0,12
500	119	O - H	0,10
450	107	C - F	0,14
435	104	C - H	0,11
435	104	H - H	0,074
430	102	N - H	0,10
375	89	O - Si	0,16
370	88	C - C	0,154
360	86	C - O	0,14
340	81	C - Cl	0,18
305	73	C - N	0,15
250	60	N - O	0,12
220	52	O - O	0,15
160	38	F - F	0,14

Fonte: Shackelford ,1996.

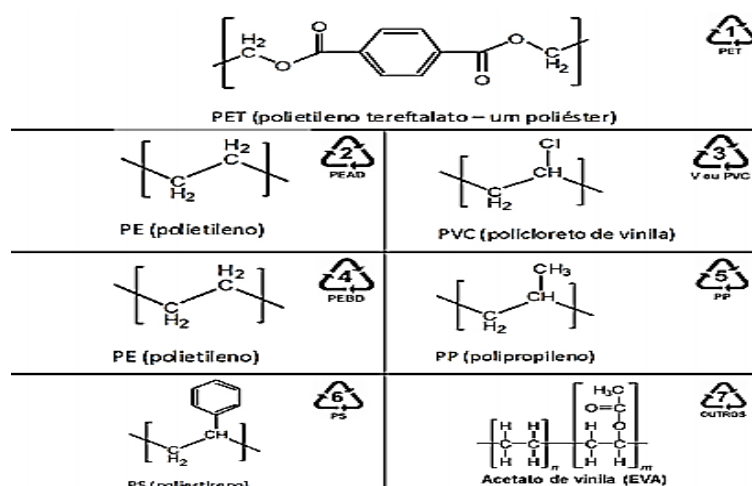
As ligações listadas acima seguem uma ordem da mais energética para a menos energética. Portanto, as ligações triplas entre carbonos são mais fortes e umas das implicações ao processo de degradação do material nas condições do meio

ambiente está ligada à obtenção de materiais poliméricos mais resistentes na aplicação de esforços mecânicos (processamento do material).

Os polímeros lineares possuem unidades repetidas de monômeros nas extremidades em uma única cadeia para formação do polímero. Há entre as cadeias uma grande quantidade de ligações de Van der Waals (ponte de hidrogênio) e alguns polímeros com estruturas lineares são citados como o polietileno, o cloreto de polivinila, o poliestireno, o poli (metil metacrilato), o náilon e os fluorcarbonos. Já os polímeros ramificados são sintetizados com cadeias laterais e ramificadas ligada à cadeia principal. Essas ramificações podem resultar em reações paralelas que ocorrem durante a síntese do polímero. O PEAD é um polímero linear, enquanto o PEBD contém ramificações de cadeia pequena (MANO, 1999).

Os plásticos apresentam estruturas químicas e ligações variadas (FIGURA 11), que dependem das características iniciais da formação de cada monômero associado às aplicações dessa matéria-prima para a manufatura. Devido à alta demanda pela produção de plásticos em toneladas, dois elementos primordiais da classe econômica e da resistência física do material são evidenciados, respectivamente, quanto ao baixo custo de produção e a durabilidade sobre o meio ambiente (SANTOS, W. et al, 2005).

FIGURA 11 - Estrutura química dos materiais plásticos.



Fonte: Conselho Regional de química IV Região, 2020

Segundo Petrucci (1976), os plásticos são um grupo de materiais capazes de serem moldados nas mais diversas formas, por deformação plástica. Estes materiais têm como característica principal a existência de um tipo de monômero que promoverá uma diferenciação na funcionalidade. Conforme Remy, Gay, Gonthier (2002), os plásticos são produtos químicos que têm como componente básico as resinas, que são produzidas a partir da união de moléculas, podendo ser sintética ou orgânica.

Os plásticos mais encontrados nos resíduos industriais apresentam vários tipos de variações como o poli (tereftalato de etileno) (PET), o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS) entre outros. Dentre os plásticos citados, o PEAD vem tomando o mercado nacional para o consumo, principalmente no setor de embalagens de rápido descarte. Estima-se que em torno de 30% do total dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de plásticos rígidos descartados em comparação dos materiais trabalhados com PET (60%) (CRUZ E ZANIN, 1999).

5.2.6 Comportamento mecânico e aplicações dos polímeros

Os plásticos são projetados para sofrer transformações e suportar altas tensões, com a garantia de boas propriedades mecânicas ao produto, que substancialmente, dependem do comportamento do material e o tipo de monômeros utilizado. Para a análise dos ensaios mecânicos em geral, alguns parâmetros são de grande importância, como: módulo de Young, tensão e deformação no escoamento, tensão máxima, tensão e deformação na ruptura e tenacidade (TABELA 3).

TABELA 3 - Propriedades Mecânicas dos Polímeros.

Polímeros	PP	OS	PET	PEAD	PEBD
Temperatura de Transição Vítrea (Tg/°C)	8	100	76	-70	-100
Fusão Cristalina (Tm/°C)	165	235	256	135	110
Transparência	Opaco	Transparente	Transparente	Translúcido	Transparente
Resistência à tração (Mpa)	55	23	57	30	12
Alongamento (%)	160	3	370	500	490
Módulo de Young (Mpa)	1210	3100	1200	1400	605
Rigidez	Rígido	Rígido	Rígido	Rígido	Rígido
Peso molecular (Mn)	30.000 50.000	50.000 200.000	15.000 50.000	20.000 60.000	20.000 40.000

Fonte: Adaptado MANO, E. B. et al, 1999

O polipropileno (PP) é um polímero derivado do propeno (C_3H_6) ou propileno, com muitas aplicações na indústria alimentícia por sua capacidade de conservar o aroma, ser inquebrável, opaco, brilhante, rígido à deformações, resistente a altas temperatura (qualidades mecânicas elevadas com baixo desgaste), baixa densidade, resistência à temperaturas superiores a $100^\circ C$, podendo ser utilizado na fabricação de cadeiras plásticas, seringas e embalagens de modo geral (SANTOS, W. et al, 2005 e AUCH-SCHUWELK e ROSENKGRANZ, 2006).

O poliestireno (PS) é um homopolímero resultante da polimerização do monômero de estireno. Em função do seu baixo custo, o material plástico participa da fabricação de utensílios domésticos rígidos, produz material isolante para o acondicionamento de equipamentos, embalagens de alimentos, dentre outros. Existem alguns derivados de PS, como o poliestireno de propósito geral (GPPS), o poliestireno de alto impacto (HIPS), poliestireno expansível (EPS), poliestireno orientado (OPS) e o poliestireno extrusado (XPS) (SANTOS et al, 2005). O monômero de estireno ($C_6H_5CH=CH_2$) pode ser facilmente pigmentado, possui uma transparência ao incidir uma luz sobre a superfície, possui fácil processamento por

modelagem quando fundido, baixa densidade e absorção de umidade. Sua principal aplicação é com o nome comercial de isopor, diversas vezes utilizado em forros residenciais. (AUCH-SCHUWELK e ROSENKGRANZ, 2006).

O polietileno de alta densidade (PEAD) apresenta boas propriedades de resistência a tração e ductilidade a temperatura ambiente, entretanto sob condições severas de alta pressão, baixa temperatura e altas velocidades de deformação, torna-se quebradiço (GUIMARÃES et al., 2002); é resistente a baixas temperaturas, leve, impermeável, rígido às deformações e com resistência química e mecânica; pode ser usado na fabricação de tampas de refrigerante, brinquedos, eletrodomésticos, caixas plásticas, sacarias (revestimento e impermeabilização), entre outros (CETESB e SINDIPLAST, 2011).

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é um polímero leve, comumente usado em embalagens, como sacos e frascos. O valor reduzido da densidade se deve à pouca ramificação da cadeia e as suas principais características químicas são: baixa densidade, boa resistência (inclusive em situações de baixa temperatura), incolor, boa estabilidade química e alto módulo de elasticidade (%). Quando misturado com polietileno de alta densidade, pode ser utilizado na isolação de cabos coaxiais (WASILKOSKI, 2002).

O poli (tereftalato) de etileno (PET) possui baixa permeabilidade a gases (CO_2 e O_2) e elevada relação resistência/densidade aos fatores decisivos para sua aplicação no setor de embalagens. É um plástico de engenharia e possui uma excelente combinação de propriedades como: rigidez, tenacidade, isolamento elétrico, alta resistência ao calor, estabilidade química e dimensionalidade, o que permite a sua vasta aplicação. Tecnicamente, quanto maior o grau de cristalinidade, maior a rigidez (ou seja, menor resistência ao impacto/ deformação elástica) e maior resistência térmica (MICHAELI, W et. al, 1995).

5.3 Processo de injeção de materiais plásticos

As indústrias automotivas estão sendo cada vez mais estimuladas a utilizar materiais plásticos em substituição à lataria de veículos e/ou peças metálicas, devido a viabilidade técnica e econômica desses materiais que resistem a degradação do meio ambiente. Esses materiais apresentam características essenciais para o

atendimento das exigências do setor de automóveis, no intuito de implementar materiais mais resistentes, com menor preço e densidade. Ribeiro (2009) define que a moldagem por injeção representa um ciclo de transformação de termoplásticos e termofixos, contendo etapas no processo que serão executadas em uma ordem programada, produzindo uma ou mais peças por vez.

O processo de produção por injeção está voltado ao desenvolvimento de produtos em larga escala, com etapas de preenchimento da cavidade do sistema de molde integrado até o processo de injeção plástica para obtenção de peças ou embalagens. Segundo Redivo (2005), este processo apresenta uma vantagem em comparação a outros processos termoplásticos, que é a elevada reprodutibilidade do equipamento para duplicação dimensional dos produtos. Porém, alguns cuidados com a matéria-prima e o molde devem ser tomados antes de iniciar o processo.

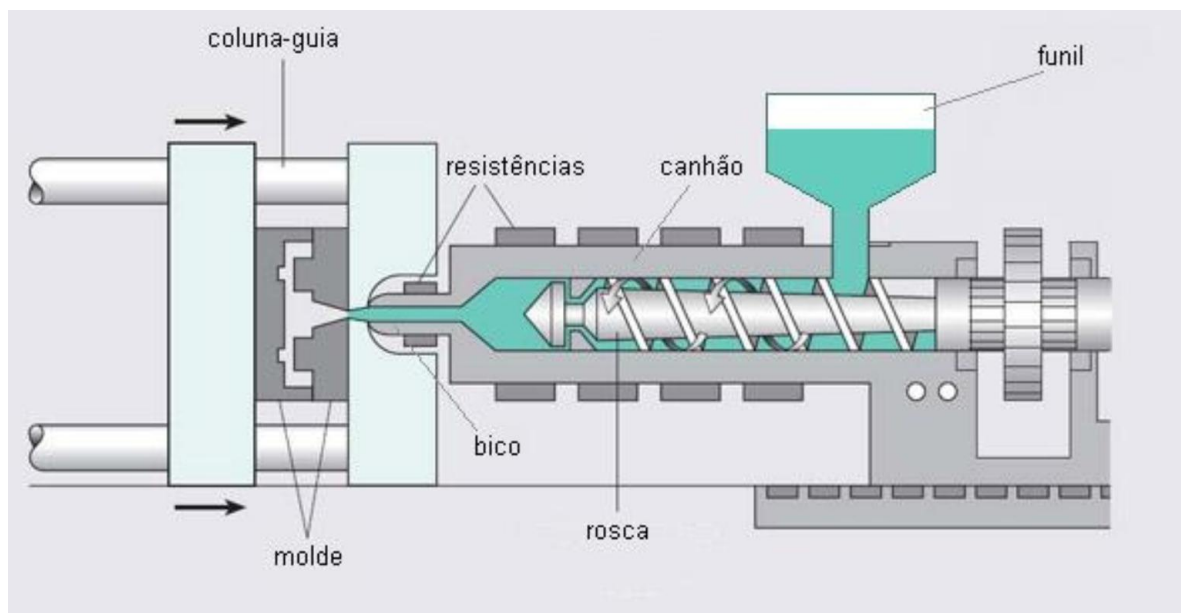
As principais fases do processo de injeção das resinas, constituem-se de três elementos essenciais: a) o preenchimento, onde ocorre o fechamento do molde com o material fundido; b) o resfriamento, onde ocorre a solidificação do material; c) a extração, onde ocorre a abertura do molde e retirada do componente já solidificado. O procedimento com um maior gasto de tempo está situado na fase de resfriamento, após o encerramento do ciclo de injeção.

No processo de injeção, de acordo com Magalhães (2010), o molde utilizado possui várias partes móveis, onde o plástico irá passar até obter o formato da peça ou embalagem desejada. A manutenção, montagem e instalação do molde, tomando a atenção correta na montagem das peças móveis, a instalação dos pinos (de acordo com o calibre desejado), a lubrificação das partes móveis, a medição e registro das características críticas para uma maior qualidade, a verificação de danos no molde, entre outros, são elementos importantes para o bom funcionamento do trajeto de material plástico. Após a instalação do molde, o operador deverá ajudar a janela do processamento da resina para a alimentação da máquina.

O sistema de moldagem da resina passa por algumas etapas até a conformação do produto, onde a matéria-prima sob a forma de grãos será colocada no funil, direcionada para o interior do cilindro do canhão para a plastificação (derretimento da resina). À medida que a rosca iniciar a rotação, há um aumento de temperatura na resina que será transportada para frente e a rosca se deslocará para trás, conforme a figura 12. Ao redor do sistema de alimentação existe um mecanismo de refrigeração, capaz de controlar o choque térmico em relação ao ambiente externo,

após a extração da peça (MAGALHÃES, 2010). Neste sistema existem três fontes responsáveis para a elevação da temperatura na resina plástica: o aquecimento das resistências ao redor do cilindro, a velocidade de rotação da rosca e a contrapressão ou força aplicada na rosca para evitar o movimento de recuo da mesma (MAGALHÃES, 2010). Quando estes parâmetros estão bem dimensionados, o processo se torna mais rápido e eficaz, podendo durar o fechamento de um ciclo (em média, 20 minutos) e isso dependerá do processo de conformação para a concepção do produto final.

FIGURA 12 - Sistema Hidráulico da Máquina Injetora.



Fonte: Magalhães, 2010

A peça moldada será mantida a uma temperatura mais fria e num processo contínuo e posteriormente removida por um braço robotizado ou manualmente, depositada sobre uma esteira para a inspeção visual da peça, remoção de rebarbas e o envio das peças aprovadas para o setor de pigmentação.

5.3.1 Conformação do material acabado

A fim de manter regulado o sistema de injeção termoplástica e este garantir eficiência produtiva, são determinados parâmetros em função do tipo de resina plástica utilizada, o tipo de molde a ser confeccionado, das características do

maquinário e outras variáveis. Cada máquina possui funcionalidades próprias quanto ao processamento do material com limites de pressão, torque para o giro da rosca, como também quanto aos materiais poliméricos que possuem propriedades diferenciadas para a conformação do produto.

O molde inserido inicialmente no sistema é projetado para um tipo de produto a ser conformado ou tipo de máquina injetora e o projeto do molde possibilita variedades na produção de peças. O formato do produto influencia os parâmetros do processo e comportamento mecânico para manter o controle da utilização de um determinado molde, injetora e material específico. (MANRICH, 2005).

A qualidade do produto final está equiparada aos parâmetros que modificam as suas propriedades do material injetado, como : na contrapressão da rosca durante a plastificação do polímero, na dosagem de material, na temperatura, na homogeneidade do polímero fundido, na velocidade ou no gradiente de velocidades de injeção, na pressão de injeção (comutação) e no tempo de recalque, na temperatura do molde, na homogeneidade da temperatura do fluido para o molde, no tempo de resfriamento e no tratamento do produto após extração (MAGALHÃES, 2010).

5.3.2 Sistema de limpeza (purga) no equipamento de injeção plástica

Devido à alta viscosidade da maioria dos termoplásticos, vestígios das resinas são depositados no equipamento por cada processo, necessitando de uma limpeza (“purga”) interna na rosca (cilindro) rotatória para que não venham surgir problemas com delaminação (formação de camadas), degradação da resina, pontos pretos (material queimado) e manchas nos próximos produtos moldados (sob pigmentação). O poliestireno cristal (PEAD) ou uma mistura de 50% de acrílico podem ser utilizados para a remoção desses resíduos.

No equipamento para moldagem de injeção termoplástica existe a necessidade de realizar o processo de purga ou limpeza desses resíduos termoplásticos, embora muito material e tempo são desperdiçados para concluir a transição com eficácia. Cada perda no processo deve ser minimizada, seja com redução do tempo de ciclo, redução do tempo de máquina parada, menor quantidade de *set up* (tempo de parada), automatização e reciclagem, não somente de produtos não conformes e

canais de injeção, mas também das borras plásticas geradas do processo de purga de máquinas injetoras (ALBUQUERQUE, 2000).

5.3.3 Resíduo industrial do processo de purga

As borras (que é subproduto da purga) são considerados os resíduos industriais, que são gerados pelo processo de injeção plástica de material polimérico fundido fora do molde, formando uma massa espessa e disforme, que pode apresentar queimaduras ou contaminações (impurezas), impossibilitando a sua reutilização ou reciclagem, sendo classificada visualmente como borra limpa, borra suja ou borra queimada, para que seja possível o seu reaproveitamento.

Como se pode notar o termo “borra” designa a matéria-prima que foi processada na injetora e não foi reaproveitada pelo processo produtivos. Esta pode ser reprocessada no sistema de reciclagem para a revalorização desses resíduos e ser inserida novamente na linha produtiva, porém em condições inadequadas ao processamento, pode apresentar contaminações ou o material pode ser degradado devido a repetição de processamentos, ambos não servem para a manufatura de bens.

Durante o processamento da obtenção da borra, duas operações foram identificadas e que não agregam valor ao sistema mecânico, embora gerem custos, consumam mais energia, tempo e matéria-prima. Portanto, é muito importante garantir uma boa limpeza do conjunto do canhão e da rosca plastificadora, pois previne problemas como as contaminações que interferem drasticamente no produto (PEREIRA. E. R, 2014), citados abaixo:

- (A) Tempo de *set up*: corresponde ao intervalo em que necessite da manutenção do equipamento ou a informação recebida pelo setor, para interromper a produção por algum motivo;
- (B) Troca de matéria-prima no equipamento: neste caso, a limpeza é feita com um material adequado para depois inserir o novo material que será conformado.

A borra formada no primeiro caso (A) é obtida no tempo de interrupção do sistema, onde a purga fica contida no cilindro da injetora e dependendo do tipo de material a ser trabalhado, este material pode alterar as propriedades garantidas para

a inserção de outro tipo de resina. Para tanto, a realização da purga no segundo caso (B) se torna essencial para eliminar por completo a presença de material de limpeza, facilitando a geração da borra plástica. Em alguns casos, não é possível reaproveitar toda a borra gerada no processo de purga, sendo viável a transformação em termoplástico somente com a utilização da borra limpa, desde que ela não apresente degradação e nem contaminações com outros materiais. A classificação visual de borras plásticas injetadas é entendida como borra limpa, borra suja, borra queimada ou contaminada (FIGURA 13).

FIGURA 13 - Borras plásticas injetadas classificadas por análise visual.



Fonte: Pereira, E. R, 2014

Quando o processo de purga não é seguido, há o aparecimento de alguns resultados negativos, como a delaminação, que pode ocorrer pela presença de matérias-primas incompatíveis misturadas ao material que será alimentado pelo equipamento, ocasionando a ineficiência do processo. A descoloração pode ser causada pela degradação da matéria-prima estagnada no interior da máquina, apresentando a presença de pontos pretos no material degradado no cilindro ou no bico de injeção (REVISTA DOS MOLDES DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO, 2013).

A presença de carbono acumulado que é proveniente da matéria-prima degradada junto à rosca e o cilindro, bem como os moldes e bicos de injeção, promovem um impacto significativo na eficiência de processamento, nas taxas de geração de sucata, reduzindo a vida útil das máquinas e intensificando a manutenção desses equipamentos. A purga representa um processo de precaução para inúmeros aparecimentos de peças defeituosas, tornando o procedimento mais vantajoso

quando é realizado constantemente, mesmo gerando borras (REVISTA DOS MOLDES DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO, 2013).

5.4 O sistema de reciclagem

Na reciclagem, existe a coleta seletiva do lixo, a separação prévia do material coletado e o processamento da matéria-prima na manufatura de bens. A implantação da reciclagem mecânica nas resinas pós-consumo industrial é obtida pelo processo de injeção termoplástica, que contribui para a diminuição dos resíduos plásticos no meio ambiente, promove o prolongamento na vida útil dos aterros sanitários, entre outros fatores importantes que estimulam o reaproveitamento dos resíduos (Ambiente Brasil, 2006).

A reciclagem das embalagens plásticas possui uma gama de técnicas, que visam a melhoria do produto final, a otimização de energia e os materiais empregados na fabricação de embalagens, embora haja transformações predominantes à resistência do material que assumiriam funcionalidades, como novas matérias-primas ou produtos com intuito de serventia, amparadas em conceitos econômicos, sociais, sanitários e de impacto ambiental legal (CALDERONI, 1999).

A reciclagem assume um papel importante quando nos referimos à preservação do meio ecológico, auxiliando na minimização dos resíduos gerados ao ambiente, em contrapartida pelos métodos tradicionais de produção e gerenciamento de resíduos, como pirólise, tratamentos térmicos e produção de polímeros virgens (GUTIÉRREZ et al., 2016).

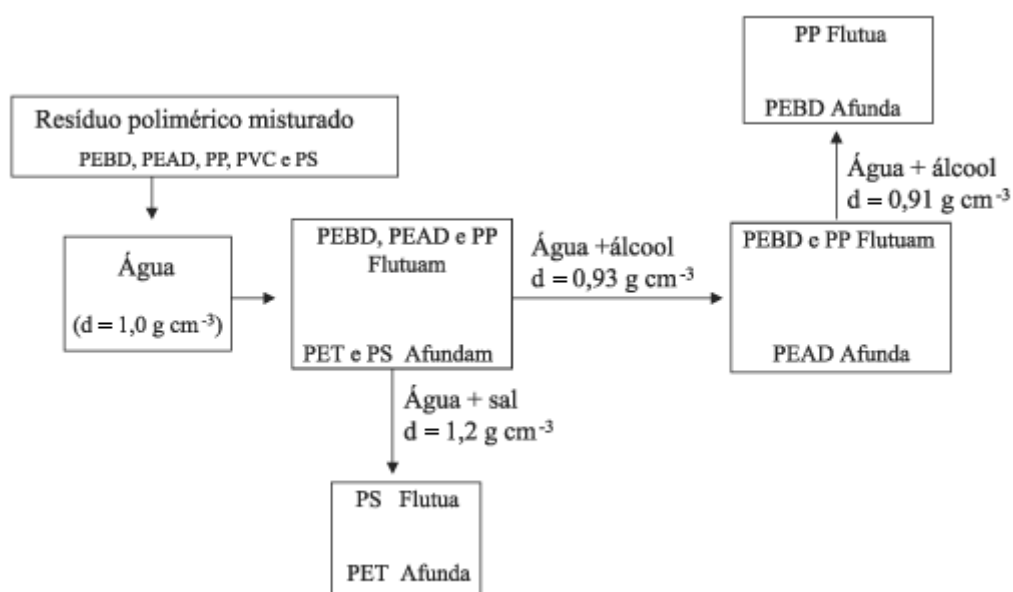
Segundo Grippi (2001), os benefícios da reciclagem são:

- Diminuição da quantidade de lixo a ser desnecessariamente aterrado;
- Preservação dos recursos naturais;
- Economia proporcional de energia;
- Diminuição da poluição ambiental;
- Geração de empregos diretos e indiretos.

A separação de diversos tipos de plástico pela densidade dos polímeros facilita a identificação desses materiais. De modo geral, as empresas aplicam um mecanismo de separação por diferença de densidade. A figura 14 demonstra como é feita a segregação dos resíduos poliméricos misturados recebidos pelas usinas de

reciclagem, aplicando a diferença da massa específica em tanques com água e/ou soluções alcoólicas ou salinas (VILHENA, A. 1999). Assim, a reciclagem desses materiais descartados, abrangendo técnicas de reaproveitamento, é uma forma de reduzir os resíduos que são gerados anualmente, mantendo a eficiência da preservação e favorecendo despoluição do meio ambiente.

FIGURA 14 - Esquema de separação dos polímeros por diferença de densidade.



Fonte: Vilhena, A. 1999.

No ponto de vista de Peruzzo e Canto (2006), a implementação da reciclagem em determinados tipos de materiais como o plástico se torna viável economicamente, pois contribuiu de forma positiva para a conservação do meio ambiente, reduzindo a quantidade de matéria-prima que possivelmente poderia ser descartada, dando um destino correto através da reutilização dos polímeros por conceitos físicos e químicos (densidade, massa molar, resistência à chama e a ação química, cristalinidade, estabilidade térmica), entre outras propriedades físicas que privilegiam a reciclagem.

5.4.1 Gestão ambiental dos resíduos recicláveis

O *marketing* verde sempre cria alternativas para promover uma imagem mais positiva perante o consumidor, a fim de mostrar que a cadeia dos resíduos plásticos também pertence ao usuário. Os sistemas de gestão ambiental, instituídos no Brasil

incluem várias empresas de reciclagem que relacionam vantagens à economia de seus recursos naturais, como: a energia, as melhorias de saúde e o comportamento do trabalhador exigido. Ao se optar por produtos que causem menos danos ao meio ambiente durante o processo produtivo e a etapa pós-consumo, há benefícios diretos e geração de mercadorias ambientalmente “mais amigáveis” (LIMA; ROMEIRO FILHO, 2001).

Todavia, existe uma forma de aproveitamento desses resíduos na linha produtiva, quando estes apresentam um maior potencial de aplicação e possivelmente na agregação de valor durante o processamento, contrapondo a ideia do desperdício de material reciclável pós-consumo ligado por muitas vezes a poluição gerada pelo lançamento do resíduo em locais desapropriados (MANO E BONELLI, 1994; FORLIN E FARIA, 2002). Segundo os dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem e do Centro de Produção Industrial Sustentável (respectivamente CEMPRE; CEPIS, 2005), normalmente a reciclagem pela gestão ambiental está fragmentada em três classes: a reciclagem primária, a secundária e a terciária. Alguns autores ainda definem a recuperação de energia pela quebra das ligações moleculares como reciclagem quaternária. Porém, a recuperação de energia não é um método de reciclagem e assim, não pode ser definida como um tipo quaternário (SUBRAMANIAN, 2000; CEPIS, 2005).

5.4.2 Reciclagem primária, secundária e terciária

A Sociedade Americana de Ensaio de Materiais (ASMTs) normalizou uma divisão dos tipos de reciclagem de plásticos, de modo a uniformizar os conceitos. Essa divisão apresentada a seguir, está conforme a autora Zanin e Mancini (2015) menciona na literatura:

- a) Reciclagem primária da matéria-prima é o processo utilizado normalmente quando envolve a seleção dos resíduos, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento em equipamentos, como extrusoras e injetoras. O produto final é o material reciclado com propriedades semelhantes à resina virgem;
- b) Reciclagem secundária da matéria-prima é submetida em resíduos sólidos urbanos pelo mesmo processo anteriormente, porém com maior valor agregado, incluindo o processo de aglutinação, como na obtenção de filmes plásticos. A matéria-prima da reciclagem secundária pode, eventualmente, ser um resíduo industrial, porém, o produto final é um material reciclado com propriedades finais inferiores à resina virgem;

c) Reciclagem terciária é um processo utilizado para reciclar o plástico instituído pela decomposição química controlada da matéria (despolimerização);

d) Reciclagem quaternária é um processo pouco considerado no sistema de revalorização plástica, que é utilizado para reciclar o plástico com base na combustão química, visando ao aproveitamento de seu conteúdo energético. Sendo os produtos finais considerados pela geração de energia e a emissão de dióxido de carbono quando ocorre a combustão completa.

Como o resultado de inúmeros trabalhos demonstrados quanto ao reaproveitamento de matéria-prima secundária, pode-se ampliar o desenvolvimento de novos produtos com alta qualidade e com características similares aos que são produzidos com a matéria-prima virgem, oriunda da indústria petroquímica. Em vista disso, fica comprovada que a reinserção do material pós-consumo no processo, prolongue ou não interrompa, a vida útil dos aterros sanitários (LIMA; ROMEIRO F., 2001).

5.4.3 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é uma operação utilizada em duas fases, em etapa primária e secundária, que consistem na conversão dos descartes plásticos pós-industriais ou de consumo (PLASTIVIDA, 2020). A única diferença é que na reciclagem primária, o material a ser utilizado não precisa ser lavado, identificado ou separado de outros materiais. Os plásticos vão direto para o moedor, que o transformarão em grânulos, isto é, serão reduzidos até o tamanho de um chip, tal que possam ser passados na extrusora. (SPINACE et al., 2005).

Na extrusora, o material é fundido e homogeneizado ao longo da área do equipamento, saindo na forma de cordões que são resfriados em um banho de água, para então serem granulados e ensacados. Após a reciclagem, o material obtido pode ser reprocessado através das técnicas usuais: injeção, extrusão, sopro, calandragem, termoformagem etc. (SCHLISCHTING, 2003). Segundo a tabela 4, pode-se verificar detalhadamente a descrição da quantidade de equipamentos avaliados na indústria de plásticos recicláveis e o consumo equivalente através da potência (W) e o tempo de uso (h) relativo a um dia de operação.

TABELA 4 - Consumo Energético utilizando PEAD.

Equipamentos	Quantidade	Potência (w)	Tempo de Uso (h/mês)	Consumo (MWh/mês)
Esteira de alimentação do moinho	1	1.471	300	0,4413
Moinho	1	55.163	300	16,5488
Rosca de alimentação do lavatório	1	2.207	300	0,6620
Lavatório	1	14.710	300	4,4130
Bomba de retorno da água	1	2.207	300	0,6620
Pente lavatório	1	736	300	0,2207
Rosca de alimentação dos Secadores	1	1.471	300	0,4413
Secador 1	3	22.065	300	19,8585
Secador 2	1	29.420	300	8,8260
Compressor de ar	1	5.516	60	0,3310
Aglutinador para extrusão	1	36.775	600	22,0650
Granulação	1	68.402	600	41,0409

Fonte: Adaptado da ABES, 2014.

Na reciclagem mecânica, os resíduos pós-industriais utilizam muito das técnicas de moagem com facas e a tecnologia de extrusão, podendo também ser empregado o método de aglutinação e granulação em torno do seu processo (PIVA;

WIEBECK, 2004). Em seguida, deverá ser inserido a outros produtos, como: sacos de lixo, solados, pisos, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, embalagens não alimentícias e muitos outros (SPINACE et al., 2005).

5.4.4 Regranulação dos resíduos termoplásticos

A composição dos plásticos tem uma grande variedade, não só, por apresentar as mais diferentes propriedades. As primeiras dificuldades são encontradas durante o processo de segregação quando misturados. Esta função é reservada aos centros de coleta seletiva, Devido ao seu baixo valor agregado, resina secundária é reintroduzida no processo da mesma forma quando inserida a resina virgem (MANCINI et al., 2000).

O regranulação pós-consumo e a utilização de resinas na planta de produção está prevista na Resolução n. 105, de 19.05.99 (1999), da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), onde os requisitos mínimos são estabelecidos para inserir um projeto da programação industrial e estabelecer maneiras de evitar o acúmulo de material não utilizado em produtos acabados.

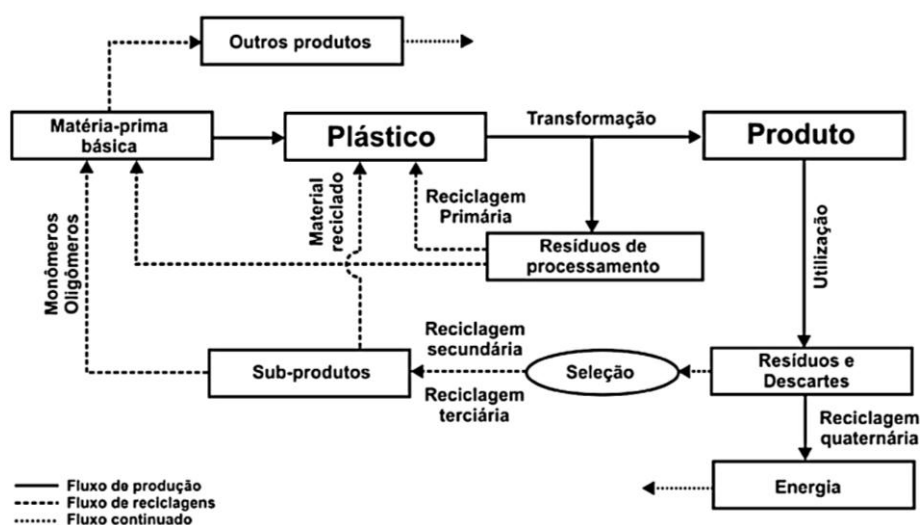
Conforme dito anteriormente, as medidas que apresentam uma maior valorização na reciclagem dos materiais descartados para o pós-consumo ou de maneira retornável estão associadas aos fatores culturais, políticos e socioeconômicos da população; a existência de empresas recicladoras para diversos tratamentos de resíduos; a programas de coleta seletiva, reciclagem ou de integração paralela das empresas produtoras que intermediam as tarefas junto com as comunidades.

As indústrias de produção ou conversão de embalagens, visando atender todos os requisitos de qualificação inseridos na *International Organization for Standardization* (ISO) 14.000, atentam-se em reduzir os custos de produção, a minimização de volumes descartáveis através do reaproveitamento na própria linha de produção ou otimizando o projeto da embalagem (SELKE, 1990). Os termoplásticos moldáveis podem ser reprocessados por reciclagem mecânica, utilizando materiais reciclados ou as resinas virgens.

A qualidade do produto final pode ser influenciada por conta da incompatibilidade entre os diferentes tipos de polímeros. Para isso, torna-se necessária a realização de uma triagem e higienização adequada, a fim de remover as impurezas, que estão misturadas ao material reciclado e a degradação dos

plásticos que darão continuidade ao processamento (RABELLO, 1999). Segundo Luzuriaga (2005), a quantidade de reprocessamento em um determinado de material reciclado pode tornar as suas propriedades físicas muito inferiores em relação ao material virgem decorrente da decomposição induzida pelas elevadas taxas de cisalhamento e temperaturas de processo, além da exposição por fatores climáticos e o próprio manejo pessoal. Na figura 15, observa-se o fluxo das principais etapas de produção empregadas ao sistema de reciclagem em termoplásticos.

FIGURA 15 - Sistema integrado para a reciclagem de termoplásticos.



Fonte: Adaptado Mano et al, 2005

As propriedades mecânicas dos polímeros dependem de alguns fatores: a estrutura química, temperatura, tempo e condições de processamento do polímero (CANEVAROLO, 2006). A tabela 5 informa os respectivos pontos de fusão e massa específica a 20°C de cada tipo de resina.

TABELA 5 - Propriedades das principais resinas termoplásticas.

Tipo de Polímero	Massa Específica a 20 ° C (<i>g/cm³</i>)	Ponto de Fusão (° C)
PP	0,850 - 0,913	165
PEBD	0,915 - 0,935	105
PEAD	0,940 - 0,970	130
PS	1,04 - 1,12	220
PET	1,335 - 1,420	180
PVC	1,391 - 1,431	127

Fonte: Mazzuco. M, 2008.

5.4.5 A influência do processamento sobre as propriedades dos polímeros

Durante o processamento, os polímeros sofrem alterações na estrutura molecular e como aumento de temperatura, há oxidação atmosférica e cisalhamento, causando alterações de cadeias, como as reações cruzadas que reduzem o peso molecular da resina. Estas modificações na estrutura molecular estão associadas à redução das propriedades mecânicas e térmicas do material (MUSAFA, 2013). Quando a resina participa de diversos processamentos térmicos, não é aconselhável aquecimentos consecutivos, porque as resinas plásticas recicladas apresentam resultados muito aleatórios quando estão em contato com substâncias químicas (aditivos) e possíveis contaminações (EHRIG,1992).

Um estudo realizado por Ehrig apud Gibbs (1992) avaliando o polietileno de alta densidade (PEAD) de resinas virgens e pós-consumo usados em recipientes de leite (tabela 6) indicou que houve pouca variação entre as propriedades após o processamento, com exceção do alongamento na ruptura, devido aos contaminantes presentes. Outro detalhe observado refere-se à formação de bolhas e furos quando é produzido em espessuras finas de material com a resina pós-consumo. O Módulo de Young- também chamado de módulo de elasticidade sob tração - é uma medida da

razão entre a tensão aplicada e a deformação ocorrida no material, considerando a região elástica linear da curva “tensão VS. deformação” em ensaios de tração.

TABELA 6 - Propriedades do PEAD em embalagens Tetra Pak (continua).

Propriedade	Resina reciclada (Pós-Consumo)	Resina Virgem	Resina Virgem Reprocessada
Índice de Fluidez(g/10min)	0,53	0,77	0,79
Densidade(g/cm ³)	0,961	0,963	0,961
Módulo de Flexão (MPa)	1540	1510	1510
Impacto Izod (J/cm)	1,5	1,3	0,9
Tensão o alongamento (MPa)	29,2	29,6	30,0
Tensão na ruptura (MPa)	22,0	15,2	17,2
Elongação na ruptura (%)	103	555	613
Tensão de Impacto (KJ/m ²)	152	172	178

Fonte: EHRIG apud GIBBS, 1992.

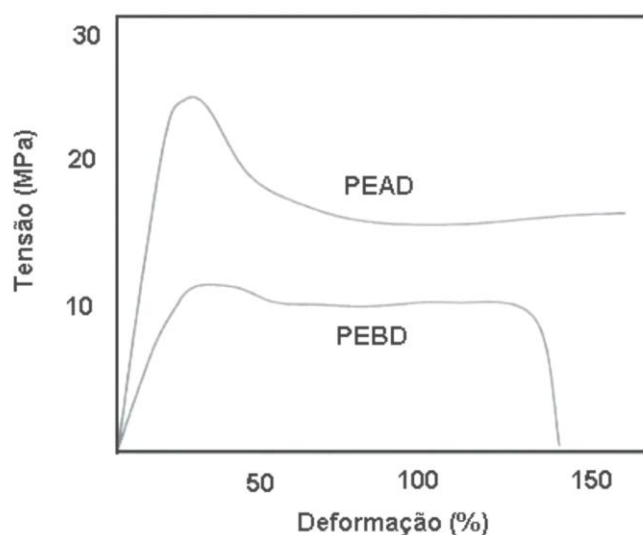
Um estudo realizado pela *Quantum Chemical Corporation* mostra que a reciclagem de *grades* de extrusão de PEAD mantém as boas propriedades da resina, como o módulo de flexão, resistência a baixas temperaturas, tensão ao escoamento e à ruptura, e que após lavagem e granulação do material de PEAD, há adequada processabilidade, podendo ser utilizado em diversos outros processos de extrusão (EHRIG,1992).

As perdas nas propriedades de alongamento na ruptura (Mpa) são observadas em pequenos testes com o uso de corpos de prova e atuam de forma moderada sobre a tensão de impacto desfavoráveis e com inaceitáveis níveis de contaminação, o que provoca furos em paredes finas (EHRIG,1992). A energia necessária para os processos de fabricação ou reciclagem envolve desde a extração da matéria-prima, a manufatura, o consumo de combustível para distribuição, o recolhimento dos produtos

pós-industriais para uma destinação final, assim como o recurso utilizado. Considerando um desenvolvimento sustentável, é importante observar a eficiência da utilização de energia em cada estágio do sistema para a produção de bens até a sua reciclagem (SUBRAMANIAM, 2000).

O comportamento de um material quando sujeito a esforços mecânicos tem por objetivo determinar as propriedades mecânicas. A figura 16 configura um mesmo polímero, à medida que o grau de cristalinidade aumenta, o módulo elástico, a resistência ao escoamento e a dureza também aumentam, em comparação entre dois polímeros com graus de cristalinidade variados.

FIGURA 16 - Curva de tensão x deformação em tração para o PEAD e PEBD.



Fonte: Canevarolo, 2002.

No ensaio de tração, o material é submetido a um corpo de prova em determinada carga, sofrendo uma deformação progressiva de extensão ou elasticidade no comprimento da resina sob a variação aplicada no produto analisado. Todavia, a capacidade de desenvolver materiais com deformação reversíveis e irreversíveis, e que resistem à fratura é amplamente utilizada para a avaliação das propriedades mecânicas em função da resistência dos mesmos (MANO,1991).

O efeito das ligações cruzadas na tensão de tração de polímeros é bem específico, sendo semelhante ao grau de cristalinidade e peso molecular. Isto é, por menor que seja a concentração dada, o efeito das ligações cruzadas impede o escoamento das moléculas presentes no composto. Desta forma, quanto maior o grau

das ligações cruzadas, maior será o Módulo de Young e menor a deformação do material. Graficamente, a resistência à tração aumenta à medida que a quantidade de ligações cruzadas é incrementada, atingindo um pico máximo, e posteriormente, ocorre um decréscimo rápido da tensão. O grau de cristalinidade tem bastante influência nas propriedades mecânicas e viscoelásticas dos polímeros que são formadas por longas cadeias, atraídas por forças de Van der Waals.

Em alguns polímeros são acrescentados aditivos também conhecidos como plastificantes. Os plastificantes diminuem a interação intermolecular das cadeias, resultando na diminuição do Módulo de Young e aumento da deformação plástica. O Módulo de Young, ou Módulo de Elasticidade, corresponde à rigidez ou a resistência do material à deformação elástica.

5.4.6 Degradação

A degradação, pode acontecer em diversos aspectos, como na alteração das suas propriedades. Pode causar deteriorações progressivas, tornando as reações irreversíveis com a atuação de agentes causadores que aceleram o processo de degradação no meio ambiente, que condiz com a perda de funcionalidade do polímero e a perda de massa molar em processos físicos, químicos ou até biológicos. Segundo De Paoli (2008), a degradação plástica é definida por uma reação química que modifica a estrutura do material polimérico. Em relação às transformações ocorridas pela degradação, pode ocorrer sem ou com cisão (ou quebra de ligações) na cadeia principal do polímero.

A primeira é considerada mais superficial, enquanto a segunda obtém modificações estruturais, podendo ser mais drástica às propriedades. Há também outras formas de degradação por despolimerização, oxidação e reticulação. Para romper as ligações químicas covalentes, deve-se submeter o material a uma fonte de energia que favoreça a quebra das ligações químicas, tais como: calor, luz, radiação, tensão mecânica, ataque químico ou biológico, dentre outras. Fatores como taticidade (estrutura molecular específica de cada polímero), presença de monômeros, ramificações, blendas poliméricas (mistura mecânica de plásticos diferentes), morfologia (aparência externa de formação), grau de cristalinidade (translucidez), difusividade, entre outros, podem ser responsáveis pela redução de energia na cadeia polimérica, facilitando a quebra de suas ligações (DE PAOLI, 2008).

A alteração de cor na configuração visual é considerada como um dano irreversível para o setor de reciclagem e as modificações que compreendem o desempenho do material é considerada estrutural, pois altera as propriedades mecânica, térmica, química e física deste resíduo. Os polímeros de cadeias longas poliméricas, muitas vezes ramificadas, apresentam carbonos secundários e terciários, que requerem menor energia para a quebra das ligações entre os hidrocarbonetos, gerando radicais livres, responsáveis por um início do processo de degradação (DE PAOLI, 2008).

5.5 Método Simplificado de *Bottom-up*

Os cálculos das emissões dos GEE's pelo método simplificado de *Bottom-up* podem ser realizados desde que haja dados locais detalhados e confiáveis sobre a tecnologia de motorização utilizada, qualidade do combustível, consumo, quilometragem, fatores de emissão levantados por locais de referência, condições para operação da frota etc. O *International Plant Protection Convention* (IPCC) recomenda essa prática como forma de aferição dos cálculos e consequentemente, garantir a precisão das informações que serão mensuradas.

Os cálculos das emissões de CO₂ devem ser feitos conforme segue:

$$\text{Emiss}_i = \text{FE}_{iabc} \times \text{Atividade}_{abc} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

- **Emiss_i** = Emissão de um gás *i* [tCO₂];
- **FE_{iabc}** = Fator de emissão de um gás [tCO₂/unidade];
- **Atividade_{abc}** = Quantidade de energia consumida ou Distância percorrida;

Variáveis do cálculo:

- **i** = CO, HC, NO_x, MP, SO₂, **CO₂** e outros.
- **a** = Tipo de combustível;

- **b** = Tipo de veículo;
- **c** = Tecnologias empregadas.

Fonte: Adaptado de Amaral, 2010.

5.5.1 Fatores de Emissão Fixa e Móvel

Segundo La Rovere (2005), o valor que corresponde ao fator de emissão pode sofrer uma variação em relação a legislação do país, visando a tecnologia aplicada no processo para quantificação desses gases. O cálculo da emissão de CO₂ associado ao consumo de energia, utilizando a metodologia de *Bottom-up* simplificada (Equação 1) serve para determinar as emissões de qualquer gás liberado pelas fontes móveis (automóveis) ou fixas (consumo de energia elétrica).

Existem alguns valores ditos como padrão, para a determinação desses fatores em cada região do país, correlacionando o consumo de combustível por fontes móveis (tabela7), sob a perspectiva de eficiência energética do óleo diesel e também, valores médios do consumo de energia elétrica por equipamentos térmicos (TABELA 4) que mensuram as quantidades de emissões dos GEE decorrentes das atividades operacionais.

TABELA 7 - Emissões das fontes móveis por categoria de combustível.

Combustível	Mínima	Máxima
	<i>K g C O ₂ / Litro</i>	
Diesel	3,33	3,41
Gasolina 20% etanol	2,10	2,21
Gasolina 25% etanol	2,00	2,11
Etanol Hidratado	0,49	0,61

Fonte: Adaptado de MCTIC (2006); Macedo (2008); CARB (2010); CETESB (2010); CRAGO (2010).

O óleo diesel é um produto derivado do petróleo, com faixas de ponto de ebulição altos quando comparadas com a gasolina, passando a ser utilizado em motores automotivos de combustão interna por compressão. Devido à sua alta eficiência, durabilidade e flexibilidade, há uma tendência mundial no uso crescente deste combustível na linha automobilística para os caminhões de carga pesada, o que reflete num aumento da demanda por diesel em relação aos demais derivados de petróleo (MASSAGARDI, 2004). Compreende-se, que nos veículos leves (automóveis), frequentemente a gasolina ou o álcool etílico são empregados, embora o diesel seja eficaz nos veículos pesados (ônibus e caminhões). A tabela 8 considera um fator médio para as emissões de CO₂ eq. liberados para as operações móveis, como transporte realizado por uma determinada distância.

TABELA 8 - Fator médio de emissão do CO₂.

Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)
ANO - 2019
0,0750

Fonte: MCTIC, 2019.

O Fator Médio Mensal (FMM) é um indicador muito utilizado dentro dos parâmetros da pegada ecológica de energia elétrica. Há a necessidade de avaliar um período considerável de coleta de dados, posto que o estudo tem como *ano-base 2019* e as informações foram baseadas pelo abastecimento de fonte hidrelétrica brasileira. A tabela está disponível pelo órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTIC).

5.5.2 Consumo de Energia e Emissões

Para garantir a eficiência energética associada ao desenvolvimento sustentável e no maquinário utilizado, criam-se etapas bem definidas no sistema de produção de bens, transporte e disposição final (SUBRAMANIAM, 2000). A quantificação da energia necessária para a fabricação e utilização de diferentes embalagens deve envolver a análise do ciclo de vida (ACV) do produto, inserida desde a extração da matéria-prima, a manufatura, o consumo de combustível na distribuição/retorno do

reciclável e o processo de disposição final. O consumo energético total dos produtos manufaturados, referente às indústrias de transformação é estabelecido em função do ACV dos materiais, conforme mostra a tabela 9.

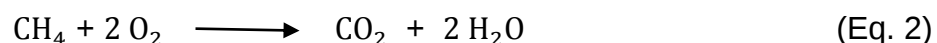
TABELA 9 - Energia elétrica consumida pela indústria de transformação.

Resinas	Varição Energética (MWh/ton)
PEAD	1,61
os	0,97
PP	1,90
PEBD	2,66
PET	2,20

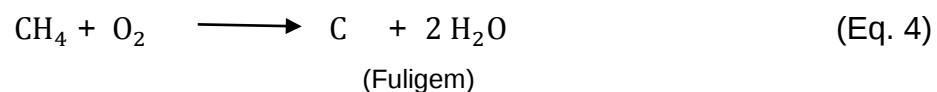
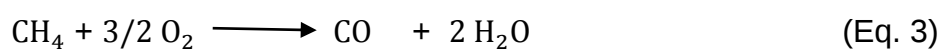
Fonte: Ferraroli, F. 2001.

O departamento de transporte está entre os que mais tem contribuído para a aceleração da degradação ambiental através das emissões atmosféricas da queima de combustíveis fósseis. Assim, 25% do total das emissões de todo o dióxido de carbono gerado no mundo é resultante das atividades produzidas pelo sistema de transporte (GABRIEL.E, 1992). Em relação às categorias de transporte, o rodoviário acaba sendo o mais intensivo. A combustão é uma reação oxidativa que ocorre em qualquer tipo de composto orgânico, sendo este representado nas seguintes reações:

Combustão Completa:



Combustão Incompleta:



Segundo o Plano de Controle da Poluição por Veículos em Uso (PCPV, 2005), os principais poluentes lançados na atmosfera pelos veículos automotores são provenientes do processo de combustão incompleta, sendo normalmente, qualificadas e quantificadas as emissões de: CO, HC, NO_x, SO₂, aldeídos e material particulado (como a fuligem).

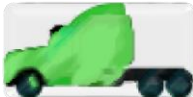
Cada poluente acima participa das emissões em maior ou menor quantidade, quando considerados o tipo de combustível, o modelo do motor, a regulação mecânica, a manutenção e o modo com que se dirige. Porém, em veículos novos, as mesmas emissões acometidas pela queima do combustível são controladas com a implementação de tecnologias (como o uso de catalisadores, injeção eletrônica de combustível entre outros). Apesar de individualmente esse tipo de emissão ser aparentemente insignificante, quando analisado o número de veículos existentes, verifica-se então a geração em toneladas de poluentes por dia (LOUREIRO, 2005).

No entanto, o fluxo da taxa de absorvidade das florestas pode sofrer variações com decorrência do ecossistema afetado pela intensiva dispersão do gás por hectare e outros fatores associados a capacidade da espécie filtrar o elemento. Segundo COELHO (2001) e MELO (2007), este valor pode variar de 1,6 a 6,5 tCO₂ por hectare em um ano, dependendo do bioma, fertilidade do solo, temperatura etc. Já em florestas tropicais e boreais, a média de absorção é de 1,8 tCO₂/ha/ano (WACKERNAGEL & REES, 1996).

5.5.3 Fontes Móveis e Operacional

O transporte é um fator decisivo nas operações de logística reversa da matéria-prima. É uma atividade que concretiza a movimentação de produtos entre o ponto de origem até o seu destino. As empresas de transporte consideram a determinação de um veículo destinado a coleta de resíduos adequados para o tráfego, relacionando a capacidade interna, tipo de caminhão, consumo do combustível e a média da distância percorrida (ida e volta). Conforme a tabela 10, delimita-se o tipo de veículo para a coleta de resíduos sólidos e/ou industriais, fornecendo a quantidade de eixos, comprimento em metros e a capacidade máxima em toneladas.

TABELA 10 - Especificação de caminhões para transporte de cargas
(continua).

Tipos de veículos	Eixos	Comprimento máximo (m)	Capacidade máxima (ton.)
$\frac{3}{4}$ ou V U C ⁽¹⁾ 	2	6,3	3
Toco 	2	14	6
Truck 	3	14	10-14
CMS ⁽²⁾ 	2	S R R (4)	S R R (4)
CMT ⁽³⁾ 	3	S R R (4)	S R R (4)

Fonte: Gestran, 2017.

TABELA 10 - Especificação de caminhões para transporte de cargas.

Carreta c/ 2 eixos CMS ⁽²⁾ 	4	18,15	33
Carreta c/ 3 eixos CMS ⁽²⁾ 	5	18,15	41,5
Bitrem 	7	19,8	57
Rodotrem 	9	30	74

Fonte: Gestran, 2017.

VUC ⁽¹⁾: Veículo Urbano de Carga; **CMS** ⁽²⁾: Cavalo Mecânico Simples; **CMT** ⁽³⁾: Cavalo Mecânico Trucado; **SRR** ⁽⁴⁾: Conforme o semirreboque utilizado no transporte rodoviário.

A seleção para o tipo de caminhão irá depender da carga carregada. Como o plástico é um material leve e volumoso, definiu-se que a quantidade transportada será a mesma em todos os casos, de acordo com a eficiência logística de deslocamento entre as unidades. As datas operacionais realizadas pelo caminhão toco seguiu uma escala de três dias alternados em cada semana no mês, pois a geração de resíduos sólidos era considerada apenas 20% da produção total, ou seja, consideramos uma capacidade máxima de 6 toneladas.

Na categoria de caminhões pesados, a frota preza por uma maior eficiência no motor do veículo, pois existe um aumento no consumo por quilometragem rodada quando realiza entregas de longas distâncias, proporcionalmente a uma intensidade de uso muito mais elevada (MMA, 2014). Como o foco está na redução dos poluentes, busca-se a flexibilidade dos bens movimentados e as distâncias estabelecidas em um

curto deslocamento entre a empresa que faz a reciclagem e a que encaminha o resíduo sólido à unidade de transformação. O consumo de óleo diesel e a capacidade de carga por categoria podem ser vistos na tabela 11, que delimita as informações frente a categoria, o motor em relação ao combustível e a definição dos veículos automotores no transporte de carga.

TABELA 11 - Categorização da frota.

Categoria	MOTOR	Definição
Caminhões leves ($3,5t < \text{P B T}^{(1)} < 10t$)	Diesel <i>2,5 Km/l</i>	Veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroçaria e PBT superior a 3.500 kg
Caminhões médios ($10t \leq \text{PBT} < 15t$)		
Caminhões pesados ($\text{PBT} \geq 15t$)		

Fonte: Adaptado do inventário da MME associada à ABEN

P B T⁽¹⁾: Peso bruto total (Peso + Carga).

Na categoria do caminhão toco, leva-se em consideração o peso do caminhão e a carga total para identificação do veículo. Segundo os dados fornecido na tabela 5, tanto o valor total em toneladas, quanto a capacidade de carga e o peso distribuído ao longo do seu comprimento (caminhão toco), ultrapassam das 15 toneladas, estabelecendo a sua categoria como caminhões pesados.

Com relação ao combustível, a utilização do diesel em caminhões pesados, conforme tabela 11, visa a redução de GEE por trajeto. Outro ponto importante está ligado ao motor com atingimento de quantias significativas de torque com baixas rotações (SIQUEIRA, 2018). A distância analisada foi delineada somente quando o caminhão estava abastecido com os refugos e depois com as resinas processadas pela unidade de reciclagem.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Implantação da Logística Reversa na indústria Magonel

O caso em questão demonstra como a logística reversa na forma de investimento e valorização dos produtos poliméricos pode diminuir a quantidade de resíduos plásticos depositados no meio ambiente e, em aterros sanitários., Estes resíduos são oriundos de uma indústria plástica denominada Magonel localizada em Taboão da Serra. As resinas virgens de polipropileno (PP), poliestireno (PS), polipropileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno de alta densidade (PEAD) e poli (tereftalato) de etileno (PET) são frações obtidas pelo processo de fabricação da indústria, que produz 1/3 do total, em toneladas, de plástico impróprio para a comercialização.

Atualmente, a empresa de médio porte utiliza em suas operações industriais as resinas termoplásticas de segunda geração com base na produção de embalagens plásticas. Essas resinas serão avaliadas em relação à emissão de dióxido de carbono, produzidas pelas atividades definidas em meio à implementação. Os materiais provenientes da indústria de transformação, inclusive borras, refugos e materiais não conformes pelo setor de qualidade (figura17) são alguns dos resíduos pós-industriais do processo de purga inerentes à moldagem por injeção de termoplásticos na Indústria Magonel.

FIGURA 17 - Resíduo pós-consumo de material plástico industrial.



Fonte: Sindiplast, 2011

A indústria é composta por 20 máquinas injetoras que operam por 10 horas cada uma, intercalando com o período de *set up*. Possui 15.000 m² de área construída entre o setor de produção, estoque dos manufaturados e o espaço de armazenagem das resinas não conformes relatadas, que são identificadas por densidade, pelo som produzido quando amassados e testes laboratoriais. Quanto ao transporte das “sobras” dos resíduos pós-industriais se instituiu uma subcontratação de uma empresa recicladora chamada *New Plastics (NP)* com a finalidade de potencializar a redução de produtos invalidados, quando comparado à perda das resinas durante o processamento fabril supracitado.

A indústria Magonel então recebe dois funcionários da *NP*, responsáveis por separar os materiais por matriz plástica (figura 18). Estes são enfardados remetendo a unidade recicladora e transportados por um caminhão toco com a capacidade máxima de seis toneladas definidas de acordo com tabela disponibilizada na revisão bibliográfica (figura 19).

FIGURA 18 - Triagem realizada por tipo de resina.



Fonte: Sindiplast, 2011.

FIGURA 19 - Resíduos pós-industriais limpos e enfardados.



Fonte: JJ. Plast Reciclagem, Site.

Cada situação proposta nesse cenário terá um enquadramento com as propriedades físico-químicas influenciadas pela interação dos compostos. É necessário avaliar a atuação das forças intermoleculares e intramoleculares do material ao ser empregado durante a avaliação na logística reversa, após a delimitação de todo o percurso realizado, a quantificação do processo mecânico operacional e a validação do projeto quanto a quantificação da emissão de CO_2 . Tais valores foram calculados conforme o procedimento apresentado no item 5.5.

6.2 A subcontratação da empresa New Plastics

A empresa *New Plastics (NP)* é uma recicladora de rejeitos industriais, localizada em São Paulo. Ela possui 7 funcionários responsáveis por todo o processo de reciclagem, desde a segregação do material refugado de borras até a etapa da formação de seus grânulos, oriundas das indústrias de transformação plástica. Todavia, considerando a capacidade máxima por tonelada do caminhão toco em via da mensuração do volume como constante, distribuiu-se o material sobre a carroceria

aberta do veículo utilizado, para suprir todo o dinamismo da reciclagem e esvaziar o setor de armazenamento do refugo fabricado pelo processo de purga, quando se trata da rebarba das resinas de modelagem previamente removidas da injetora.

Estabeleceu-se a logística reversa (figura 20) das aparas dentro do processo de produção industrial, possibilitando o reaproveitamento do material, no retorno do granulado que seguirá para a indústria de transformação plástica, remetendo assim o ciclo de beneficiamento do material polimérico antes rejeitado pela unidade.

FIGURA 20 - Delimitação da Logística Reversa por etapas.



Fonte: O autor.

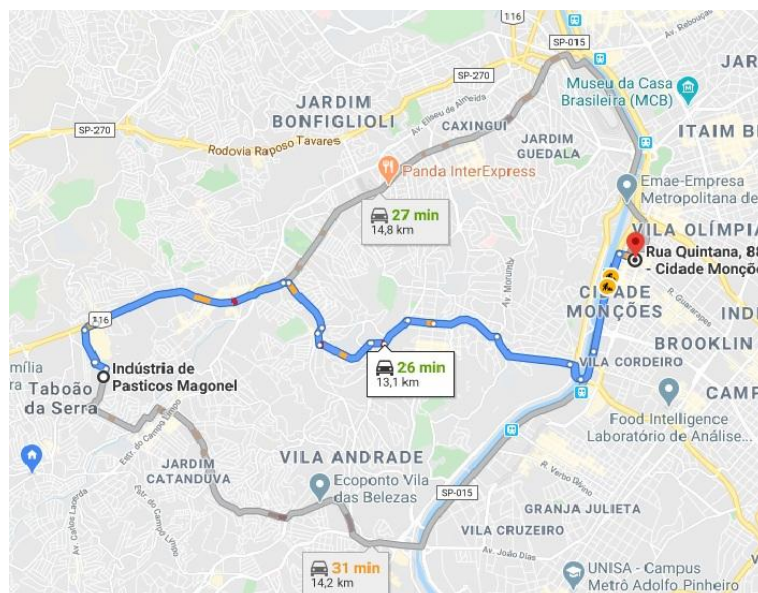
O histórico das rotas foi estabelecido no próximo tópico, determinando alguns pontos relevantes para o mecanismo de reciclagem mecânica para o beneficiamento da indústria plástica Magonel na implementação deste recurso.

6.3 Distância entre a Indústria Magonel e a NP

A hipótese da rota para o transporte entre a indústria de transformação plástica e a usina recicladora está situada, respectivamente, nas cidades de São Paulo e Taboão da Serra, com alguns pontos críticos em meio ao trajeto delimitado. A figura 21 mostra o detalhamento entre as distâncias mínimas efetuadas pelo caminhão toco

responsável por trafegar com as aparas e materiais refugados até o seu destino onde ocorrerá o descarregamento das resinas.

FIGURA 21 - Hipótese do trajeto percorrido pelo caminhão toco.



Fonte: Google Maps, 2020.

Desconsiderando os dias de trânsito no local, alterações no clima e as mudanças de rota pelo GPS, a tabela 12 relata o menor percurso tanto na saída como no retorno de todo o material processado. Observa-se que foram mantidos os valores e estes foram somados para totalizar a distância percorrida.

TABELA 12 - Trajetos das resinas pós-consumo.

Distância percorrida (Taboão da Serra/São Paulo)	13,1 km (SAÍDA)
Distância percorrida (São Paulo/Taboão da Serra)	13,1 km (RETORNO)
Distância total percorrida	26,2 km

Fonte: O autor.

Para mensurar a quantidade de CO₂ eq. emitida pelo veículo transportador, reportou-se a distância total percorrida, assim como o motor apropriado para execução do projeto. Deste modo, a escolha pelo caminhão toco ilustra a relação entre a

empresa que gerou os resíduos industriais diariamente e a intervenção da indústria recicladora por dar conta de promover a redução dos grãos.

As referências na revisão bibliográfica delimitam alguns fatores de conversão aplicados ao longo do texto. Como garantia de menor poluição e melhor adequação em veículos de carga pesada, o motor à diesel foi escolhido, dimensionando as unidades por kg de CO₂ a partir dos quilômetros percorridos, aumentando o consumo energético pela queima de combustível.

Antes do resíduo ser alimentado na unidade recicladora, etapas como de separação podem ser necessárias como citadas anteriormente pela mediação da empresa *NP*. Para que seja possível o reaproveitamento deste material recebido pela unidade recicladora, faz-se necessário que o material polimérico seja bem cuidado e acondicionado de modo que evite contaminações externas.

6.4 Etapas da reciclagem

Mesmo havendo uma separação prévia dos resíduos (fonte geradora), estes podem apresentar diferentes tipos de contaminantes que deverão ser removidos com soluções de limpeza no processo de lavagem. Caso contrário, enfrentarão problemas associados à ineficiência do processo. Os tipos de contaminantes que podem ser encontrados são, por exemplo, preenchimentos não-fundíveis, pigmentos, madeiras, papel ou metal, assim como uma variedade de plásticos que não podem ser usados como matéria-prima dentro dos processos em consideração.

O processo utilizado pela empresa de reciclagem é descrito por três etapas definidas como: tratamento preliminar, redução térmica e fragmentação. Sua aplicação para resíduos pós-industriais requer, no entanto, lavagem, moagem, secagem, aglutinação para extrusão e a granulação.

6.4.1 Etapa 1: Tratamento preliminar

Os plásticos separados anteriormente são encaminhados para a etapa de moagem no moinho de facas Mecanofar MF300/R (figura 22) que opera a cada 1 Kg de material em média de 3 segundos. Em seguida, o material é levado para os tanques de lavagem (figura 23) com solução de 5% v/v de detergente neutro concentrado, em repouso por 2 horas. Alguns casos que houver uma contaminação por impurezas

difíceis de serem removidas com detergente neutro, são emergidos em uma solução de 2% v/v de ácido acético para remover manchas na superfície, em repouso de 1 hora em temperatura ambiente.

FIGURA 22 - Etapa de moagem com moinho de facas.



Fonte: Abes, 2014.

FIGURA 23 - Tanque de Lavagem dos materiais.



Fonte: Site MECALUX, 2020.

Utilizou-se em todo o processo a água potável disponível na empresa *NP*, fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). A água é usada principalmente para trocas de calor, após a transformação do produto, no resfriamento das peças (informação desprezível para a quantificação de GEE no processo).

O processo de secagem dos materiais (FIGURA 24) foi executado em estufas apropriadas para a desumidificação, devendo ficar acondicionados por algumas horas

sob determinada temperatura relativa. O procedimento deve ser seguido para evitar formação de bolhas no interior da peça que se formam com o vapor d'água, que ocorre de maneira gradativa ao aquecimento. Concluída essa fase de tratamento preliminar, o material poderá ser processado sob redução térmica.

FIGURA 24 - Estufagem nas resinas plásticas.



Fonte: Sindiplast, 2011.

6.4.2 Etapa 2: Redução térmica

Nesta etapa, os materiais que receberam o tratamento preliminar, passam por um homogeneizador que retira o excesso de água ao ser agitado circularmente no equipamento MH-100. O consumo energético não foi considerado, pois este equipamento ganha continuidade no aglutinador RS-Serviços (FIGURA 25) quando o material compactado é reduzido, conforme a temperatura de fusão de determinados materiais plásticos, sendo assim enviado à extrusora (FIGURA 26).

FIGURA 25 - Representação do Aglutinador.



Fonte: Sindiplast, 2011.

OBS: Esta etapa é comum quando o material a ser recuperado se encontra em forma de filmes e fibras; para peças maciças, ela não é necessária (SINDIPLAST, 2011).

Quando é agitada no equipamento, a resina gera um atrito que promove o aumento de calor simultâneo contra as paredes laterais do equipamento (aglutinador) formando uma massa plástica espessa. De acordo com a solicitação da indústria de transformação, podem ser adicionados a esta mistura pigmentos ou outras substâncias químicas que melhoram a especificação do produto.

FIGURA 26 - Equipamento de extrusão



Fonte: Sindiplast, 2011.

A extrusora SEIBT modelo ES 35 F-R, opera de forma similar, quando submetida a uma comparação com a máquina extrusora da indústria de transformação

plástica. Quando a massa plástica chega no equipamento, os processos de homogeneização e dispersão dos componentes químicos adicionados na fase anterior, também realizam a mistura novamente dos seus elementos, a fim de obter características requisitadas.

O cabeçote produz os *pallets* de forma contínua, passando por um sistema de resfriamento em banhos em circuito fechado e sistema de recirculação de água, visando amenizar o choque térmico entre a temperatura ambiente com os fios formados de resinas plásticas que saem superaquecidas no processo antecedente. O equipamento de resfriamento não foi considerado no gasto energético para emissão dos GEE.

6.4.3 Etapa 3: Fragmentação

Em seguida, os *pallets* são fragmentados por “corte na cabeça” (FIGURA 27) e um dispositivo acoplado na máquina extrusora que determina a granulometria em uma tela que filtra o material impedindo a contaminação por impurezas. Em alguns casos, os grãos são resfriados e secos por centrifugação. Esta informação foi desconsiderada para o dimensionamento do valor energético para obter as emissões de dióxido de carbono.

FIGURA 27 - Granulação por “Corte na Cabeça”.



Fonte: Sindiplast, 2011.

Os equipamentos considerados para o cálculo, devido a potência elevada, o processo de granulação com rotor e contra – facas (FIGURA 28), onde toda massa

obtida no processo de aglutinação é arrastada formando os cordões, passando pelo sistema de resfriamento para uma matriz com rotor de corte, que fragmenta os pellets coincidentes às suas velocidades na formação de grãos de tamanhos diferentes.

FIGURA 28 - Granulador com Rotor e Contra – Facas.



Fonte: Sindiplast, 2011.

Se durante o processo obter resíduos refugados, estes poderão retornar ao processo (SINDIPLAST, 2011). A logística reversa termina quando o material é entregue ao estabelecimento industrial na forma de matéria-prima, seguindo para o processo de revitalização plástica e aderindo um novo formato para produção de embalagens.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

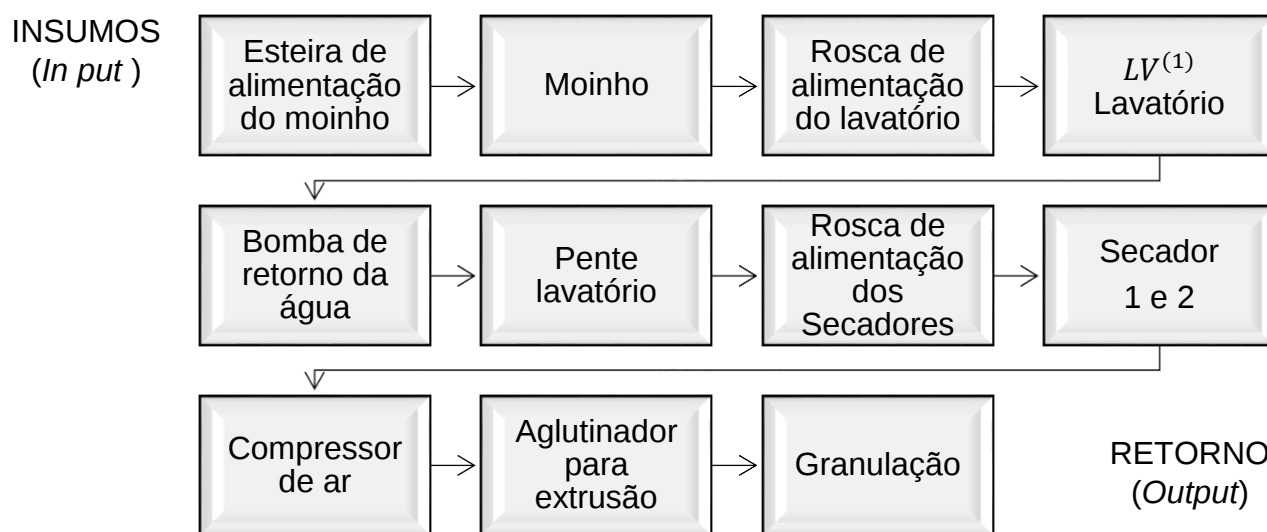
Nesta seção será discutida, a relação do consumo energético em todo o processo de regranulação plástica, na operação fixa e móvel, confrontando as propriedades físico-químicas destes materiais analisados por meio de tabelas que expõem os processos das operações unitárias para a conformação de um material reciclado e menos impactante ao meio ambiente, resultantes de uma indústria de transformação. Devido a aplicação da logística reversa sobre as “sobras” da indústria plástica, os resultados foram obtidos através da medição das emissões do CO₂ eq. em cada matriz polimérica dimensionada, em apoio às bases de cálculo da metodologia simplificada de *Bottom-up*.

7.1 Base de Cálculo

Cada recurso consumido possui um fator de emissão de CO₂ eq. associado, que inclui a quantidade de gás carbono emitida em seu ciclo de vida (por exemplo, na extração, produção, consumo, destinação, reuso etc.). De acordo com o processo de restauração do material reciclável pós-consumo, observa-se que as áreas absorventes do carbono possuirão hectares/unidades de plantações diferentes desempenhados na composição da Pegada Ecológica (ANDRADE, 2006).

Segundo Wackernagel & Rees (1996), para o dimensionamento do sistema na Pegada Ecológica, alguns itens deverão ser especificados. A instalação de áreas vegetativas reduz a quantidade de CO₂ eq. na atmosfera e o mesmo processo ocorre nos oceanos pela fotossíntese, capturando o gás carbono e lançando o oxigênio. A delimitação da área dependerá do quanto de CO₂ eq. está sendo produzido devido aos esforços operacionais estimulados para o plantio de árvores.

Dentre as categorias fornecidas pelo autor, a pesquisa constituiu-se das informações do veículo de transporte utilizado por carga definida e quanto aos bens de consumo energético dos equipamentos da usina de reciclagem. A seguir, algumas etapas do sistema da logística reversa aplicados foram estabelecidas (figura 29):

FIGURA 29 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica dos plásticos.

Fonte: O autor.

LV⁽¹⁾ Lavatório: Desconsiderou-se na lavagem, o consumo de água pelo processo, pois não é exigido na contabilidade da pegada ecológica.

A quantificação do CO₂ presente nos GEE foi realizada levando em consideração os fatores de conversão e equações obtidas no item 5.5. Nesse cálculo, foi estimada a quantidade de carbono emitida pela queima do combustível e pelo consumo energético nos equipamentos que pertencem ao setor de reciclagem, respectivamente. Assim sendo, considerou-se uma somatória para ambos os resultados supracitados (energia elétrica e combustão do óleo combustível), em uma mesma unidade métrica, desenvolvendo uma nova equação (equação 5) que representa o total de emissão de CO₂ do sistema de implementação da reciclagem mecânica para os termoplásticos avaliados:

$$\text{Emissão Total [tCO}_2\text{]} = \text{Emissão Móvel} + \text{Emissão Fixa} \quad (\text{Eq. 5})$$

Primeiramente, o cálculo foi baseado na tabela PEAD indicada na tabela 5 do item 5.4.3 da revisão bibliográfica, onde há uma delimitação de informações em MWh (quilowatt-hora/mês) sobre o consumo energético dos processos da revalorização plástica, submetendo-se nas mesmas condições da figura 29, onde são delimitadas todas as etapas para obtenção do chip plástico. Vale ressaltar que a variação

energética para cada resina foi utilizada como um fator multiplicador para o cálculo das emissões, distinguindo-se os resultados para cada resina plástica e consequentemente, emissões diferentes de CO₂.

A conversão para cada matriz plástica se relaciona com fator multiplicador relativo à fração entre as resinas mensuradas, em que cada resultado obtido sobre o consumo energético dado por uma indústria de transformação com a utilização de plástico virgem. A tabela 13 demonstra razão da quantidade de energia consumida em MWh/ton em cada matriz polimérica, que será considerada como denominador os respectivos valores do consumo energético das variadas resinas dentro da razão estabelecida com o seu numerador fixo, conforme mostra o item 5.4.3 na tabela energética do processo de reciclagem.

A tabela base para a conversão entre as resinas resulta em um valor adimensional, avaliado como fator de multiplicação nos processos realizados durante a reciclabilidade dos materiais, sem que haja alterações na forma com que é processado, regenerando assim, o resíduo industrial em matéria-prima para um mesmo equipamento.

TABELA 13 - Tabela base para a conversão entre as resinas.

Resinas	Consumo Energético (MWh/Ton.)	Conversão de Matrizes	Fator de Multiplicação
PEAD	1,61	1,61/1,61	1,0000
PS	0,97	1,61/0,97	1,6597
PP	1,90	1,61/1,90	0,8473
PEBD	2,66	1,61/2,66	0,6052
PET	2,20	1,61/2,20	0,7318

Fonte: Adaptado de Ferraroli, F. et al, 2001.

7.2 Absorção de energia no processo de reciclagem

A reciclagem mecânica necessita de um pequeno consumo energético confrontado com o esforço realizado no processo de extração da matéria-prima para

a produção dos polímeros com estimados níveis de carbono em sua composição. Isto deve ao fato, de que, as indústrias exijam de si uma eficiência máxima quanto ao bom funcionamento de seus equipamentos com diferentes aplicações, principalmente, quando há uma interferência proporcionada pelas propriedades do material inserido no sistema produtivo. E, quanto ao tipo de combustível utilizado na geração de energia cinética sob os motores do veículo que realiza a menor logística entre os comerciantes.

Os valores da potência no consumo energético foram mensurados por 30 dias, considerando as mesmas operações prevalecidas na reciclagem do PEAD no item 5.4.3. Neste cálculo, adotou-se um fator de multiplicação adimensional para cada tipo de resina (PS, PP, PEBD e PET), tomado como referência os valores da Tabela 13. Através das equações apresentadas no item 7.1, foi possível realizar a quantificação das emissões de dióxidos de carbono para a determinação da resina mais impactante no processo da regranulação mecânica. Todos os resultados obtidos foram discutidos no próximo capítulo de item 7.3, mas antes, segue a tabela de conversão para as demais resinas supracitadas por este trabalho.

Para obter o resultado da potência e do consumo energético por cada equipamento, primeiro multiplique o coeficiente do item 7.1 para cada polímero correspondente (TABELA 14), utilizando a tabela base do item 5.4.3 e estabelecer a conversão de unidade do consumo em KWh por MWh (1/1.000.000), quando for multiplicar a potência encontrada pelo tempo de uso (h) uniforme, respectivamente, encontrará o consumo energético por equipamento.

TABELA 14 - Consumo energético dos equipamentos da indústria de regranulação (continua).

Equipamentos	Polímero	Quantidade	Potência (W)	Tempo de Uso (h)	Consumo (MWh/mês)
Esteira de alimentação do moinho	PS	1	2.441	300	0,7324
	PP		1.246		0,3739
	PEAD		1.471		0,4413
	PET		1.076		0,3229
	PEBD		890		0,2671

Moinho	PS	1	91.553	300	27,4660
	PP		46.739		14,0218
	PEAD		55.163		16,5488
	PET		40.368		12,1104
	PEBD		33.384		10,0153
Rosca de alimentação do lavatório	PS	1	3.662	300	1,0986
	PP		1.870		0,5609
	PEAD		2.207		0,6620
	PET		1.615		0,4844
	PEBD		1.335		0,4006
Lavatório	PS	1	24.414	300	7,3243
	PP		12.464		3,7391
	PEAD		14.710		4,4130
	PET		10.765		3,224
	PEBD		8.902		2,6707
Bomba de retorno da água	PS	1	3.662	300	1,0986
	PP		1.870		0,5609
	PEAD		2.207		0,6620
	PET		1.614		0,4844
	PEBD		1.335		0,4006
Pente lavatório	PS	1	1.221	300	0,3662
	PP		623		0,1870
	PEAD		736		0,2207
	PET		538		0,1615
	PEBD		445		0,1335
Rosca de alimentação dos Secadores	PS	1	2.441	300	0,7324
	PP		1.246		0,3739
	PEAD		1.471		0,4413
	PET		1.076		0,3229
	PEBD		890		0,2671
Secador 1	PS	3	36.621	300	10,9864
	PP		18.696		5,6087
	PEAD		22.065		19,8585

	PET		16.147		4,8442
	PEBD		13.354		4,0061
Secador 2	PS	1	48.828	300	14,6485
	PP		24.928		7,4783
	PEAD		29.420		8,8260
	PET		21.530		6,4589
	PEBD		17.805		5,3415
Compressor de ar	PS	1	9.155	600	0,5493
	PP		4.674		0,2804
	PEAD		5.516		0,3310
	PET		4.037		0,2422
	PEBD		3.338		0,2003
Aglutinador para extrusão	PS	1	61.035	600	36,6213
	PP		31.159		18,6957
	PEAD		36.775		22,0650
	PET		26.912		16,1472
	PEBD		22.256		13,3537
Regranulação	PS	1	113.526	600	68,1156
	PP		57.957		34,7740
	PEAD		68.402		41,0409
	PET		50.056		30,0337
	PEBD		41.397		24,8380

Fonte: O Autor

A energia será absorvida pelo resíduo plástico pós-consumo, que com o passar do tempo (denominado de Tempo de Residência) será fundido pela ação da temperatura para a conformação de um novo produto na indústria de transformação.

7.3 – Emissões de CO₂ nos equipamentos e no transporte rodoviário

Retrata-se neste capítulo os resultados alcançados pelo estudo de caso, no que se refere a avaliação dos cinco materiais plásticos, que podem ser empregados na reciclagem mecânica para obtenção de novos produtos.

7.3.1 – Análise das emissões sobre os equipamentos

Examinando a primeira etapa do processo, são utilizadas onze equipamento para a lavagem, moagem e secagem dos materiais pós-consumo, não considerando o consumo de água no processo, as máquinas variam a sua potência entre 538 W a 55.162,5 W e que funcionam 10 horas por dia, com exceção do compressor de ar, que opera duas horas diariamente. Nesta etapa, o consumo mais significativo foi de 9.155 W para o PS. A moagem de filmes plásticos com comprimento maior que 50 cm, pode apresentar dificuldades, devido ao enroscamento destes no motor de moinho de facas, gerando um aumento no torque e colocando em risco o superaquecimento do equipamento, sendo assim necessário acionar o seu desligamento.

A prévia segregação de materiais muito grandes e/ou compridos, que provocam deslizamento junto às facas e apresentem superfícies planas, torna essa etapa de moagem mais longa e mais cara pelo consumo energético elevado. Na tabela 18, observa-se o prevailecimento do PS de forma dispendiosa quando avaliado em um mesmo cenário sofrido pelas demais resinas, sendo sequenciados por ordem decrescente no total de energia elétrica absorvida pela resina para ser processada.

TABELA 15 - Consumo de energia elétrica total dos materiais.

Resinas	Consumo (MWh/mês)
PS	169,73
PEAD	115,51
PP	86,65
PET	74,84
PEBD (LDPE)	61,89

Fonte: O Autor.

Na segunda etapa será utilizada uma máquina que promove a aglutinação, logo o material extrusado é transformado em pallets com potência máxima entre as resinas, com consumo energético de 61.035W para o PS, no período de 20 horas ao dia. O material deve estar bem seco para ser colocado no aglutinador, responsável pelo aquecimento das resinas, o consumo energético em watts do PS está maior devido ao ponto de fusão ser bem elevado, aproximadamente para 220°C até que ocorra a redução do volume específico do material para a etapa de alimentação da amostra no processamento, pois facilita o escoamento do material para o funil do equipamento de extrusão.

Apesar de ser um único equipamento que opera duas atividades, ocorre um grande consumo de energia. Isso porque o aglutinador para a extrusão opera mediante ao aquecimento, proporcionado pela resistência elétrica. Além disso, o aglutinador para extrusão se torna um grande consumidor, porque é submetido a variação de temperatura com a adição de água no seu interior para uma perfeita aglutinação do material pós-consumo, que será destinado à extrusão.

A terceira etapa, refere ao consumo energético da granulação dos *pallets*, advindos da extrusão e mostra maior gasto de energia, mesmo operando em um único equipamento representa o valor de 113.526 W para a resina de PS. A tabela 19 registra os resultados das conversões realizadas pelo fator médio mensal do item 5.5.1 que são multiplicados em cada resina para obter a relação em tCO₂ eq. por MWh (tCO₂ / MWh).

TABELA 16 - Toneladas de dióxido de carbono liberadas pelo consumo energético.

Material	tCO₂/ MWh
PS	12,73
PEAD	8,66
PP	6,50
PET	5,61
PEBD	4,64

Fonte: O Autor.

7.3.2 Análise das emissões geradas pelo transporte rodoviário

Neste contexto, a aplicação da revalorização plástica segmentada e elaborada pela empresa, considerou a avaliação no período de um mês, correspondente a 30 dias, pertinentes as atividades operacionais de transporte e no processamento do resíduo industrial na usina de reciclagem mecânica para obter resultados mais palpáveis. Observa-se na tabela 20 o valor total resultante das emissões de CO₂ eq. por percurso traçado no item 6.3, este definido pelo menor percurso entre as empresas expostas. Os resultados foram convertidos para tCO₂, perfazendo-se o total dos GEE's gerados pelo setor de reciclagem e transporte na busca de menor produção de CO₂ eq. em meio aos processos utilizados pelo fabricante.

TABELA 17 - Emissão em tCO₂ convertida em percurso.

Transporte de Saída e Retorno (Emissão/mês)
0,4236 tCO ₂

Fonte: O Autor.

8 CONCLUSÃO

Durante o processo para o beneficiamento da matéria-prima reciclável, foi demonstrada uma eficiência média na redução (em 69,4% para os resíduos regranulados) no consumo energético das resinas pós-consumo, levando em consideração a captação do material descartado até a entrega do produto regranulado na indústria de transformação que agregará valor ao material.

Logo, o material reciclado pode ser substituído por outras resinas similares, que comprovam um baixo índice de emissão atmosférica poluente. Por sinal, isto é um fator determinante para a quantificação total do CO₂ eq. gerado por setores de reciclagem, uma vez que cada matriz polimérica interage diretamente no desequilíbrio do meio ambiente causando a intensificação do aquecimento global.

O processo físico-químico de grande influência nos plásticos ocorre através da ação do aquecimento térmico (temperatura) que deve seguir algumas recomendações em meio ao tempo de residência de cada material. Estes precisam de tempo para absorver uma quantidade de energia térmica e com o auxílio do calor, misturam-se. Da mesma forma, tempo excessivo pode levar à degradação (queima) do material, mesmo se a temperatura estiver nos tempos recomendados e provocar um excesso de gases. A massa fundida no aspecto visual deve apresentar uma característica homogênea, sem diferença de coloração, sem rugosidades e caroços (grânulos inteiros e não fundidos).

Um material fundido e de má qualidade diminui as características físicas do material, impedindo a homogeneização adequada e consequentemente o tensionamento das peças (tornando-as quebradiça). O tempo de residência em excesso acarreta a quebra das cadeias moleculares, provocando a diminuição da viscosidade que influencia diretamente na estabilidade do resíduo. A energia absorvida pelo polímero faz romper as ligações e emite uma quantidade de CO₂ no processo de regranulação plástica até a sua fusão; em seguida será resfriado, cortado na forma de grãos para obtenção de novos produtos.

Em suma, concluímos que para os plásticos estudados, cada um possui diferentes resultados em função da natureza dos polímeros. Assim sendo, para o produto feito com PS virgem, evidencia-se uma emissão de CO₂ bem próxima, mesmo quando reciclado pela usina, agora para os materiais de PEBD, obteve valores inferiores no consumo energético e nas emissões GEE quando relacionado com um material virgem para a manufatura.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA) - **Regulamento Técnico: Disposições Gerais para Embalagens e Equipamentos Plásticos em Contato com Alimentos**. Resolução n. 105, de 19 de maio de 1999 - Diário Oficial da União, 20 de maio de 1999.

ALBUQUERQUE, J.A.C. **Ciências Biológicas, Meio Ambiente e Ecologia: Meio Ambiente, Química dos Polímeros**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2000.

AMARAL, R. **Análise da aplicabilidade da pegada ecológica em contextos universitários: Estudo de caso no campus de São Carlos da Universidade de São Paulo**. São Carlos, SP. Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: www.tcc.sc.usp.br/.../Amaral_Renata_Castiglioni.pdf. Acesso em: 10 de abril de 2013.

AMBIENTE BRASIL. **A Reciclagem**. Publicado em dezembro de 2006. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em: 3 de agosto de 2020.

ANDRADE, B.B. **Turismo e Sustentabilidade no município de Florianópolis: Uma aplicação do método da pegada ecológica**. (Dissertação mestrado). Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS (ABRE). **Resíduos plásticos transformados em embalagens**. Disponível em: www.abre.org.com.br. Acesso em: 12 de julho de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de revisão NBR 13230: Simbologia indicativa de reciclabilidade e identificação de materiais plásticos**. Rio de Janeiro, 8p., 2006.

AUCH-SCHUWELK, H.; ROSENKGRANZ, F. **Construction Materials** - Manual. 1ª ed. Munich: Editora Birkhauser, 2006, p. 94-95.

BENZI, L. **Embalagem, história e evolução**. F & C Embalagem, São Paulo, v.6, n.58, p.28-33, 1993.

BONELLI, C.M.C.; MANO, E.B. **Revista de Química Industrial**, in press (1994).

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 15 de junho de 2020.

BRAUN, D. & Bezdadea, E. **Theory of degradation and stabilization mechanisms in: Encyclopedia of PVC**. Volume 1; 2. Ed., Nova York, 1986.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 3. ed. Humanitas: São Paulo, 1999.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª Ed. Nova York: Ed. LTC, 2008.

CALLISTER, W.D.; **Materials Science and Engineering**. John Wiley & Sons Inc., 4th edition, 1997.

CANEVAROLO JR.; S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo, Artliber, 2002.

CANEVAROLO, S. V. Jr. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artibler, 2006, p. 21, 43, 44, 49, 192.

CARB, 2010. **Emissões das fontes móveis**. Disponível em: <http://greet.es.anl.gov/>. Acesso em 15 de agosto de 2020.

CEPIS, Centro Pan-Americano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado - Plásticos**, publicado em novembro de 2005. Disponível em <http://www.cepis.ops-oms.org>. Acesso em setembro de 2020.

CETESB e SINDIPLAST - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e Sindicato da Indústria de Material Plástico do Estado de São Paulo. **Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos**. São Paulo – CETESB e SINDIPLAST, 2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia-ambiental/Produ??o-e-Consumo-Sustent?vel/11-Documents>. Acesso em: 07 de março de 2020.

CETESB, publicado em março de 2010. **Emissões de gases poluentes conforme o combustível utilizado para o transporte de suprimentos e mercadorias**. Disponível em: http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/PDF/inventario_efeitoestufa.pdf. Acesso em 15 de agosto de 2020.

COELHO, S. **Uso da terra determina emissão de CO₂ na Amazônia: Desmatamento pode comprometer sustento biológico, químico e físico da floresta**. Instituto Ciência Hoje. Rio de Janeiro, dez 2001. Notícias Ecologia e Meio Ambiente. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/controlpanel/materia/view/2434>. Acesso em: 23 de junho de 2020.

COLTRO, L. **Embalagens Plásticas Flexíveis V.S. Meio Ambiente: Problema ou Solução? Curso " Embalagens Plásticas Flexíveis: Propriedades e Avaliação da Qualidade"**. Campinas: CETEA/ITAL, 2002.

CONSELHO REGIONAL DA QUÍMICA IV REGIÃO. **Estrutura química dos materiais plásticos**. Disponível em: https://www.crq4.org.br/quimicaviva_plasticos. Acesso em: 22 de maio de 2020.

CRAGO, C. L.; KHANNA, M.; BARTON, J.; GIULIANI, E.; AMARAL, W. **Competitive ness of Brazilian sugar cane ethanol compared to US corn ethanol**. Energy Policy, v. 38, n. 11, p. 7404-7415, 2010.

CRUZ, S.A.; ZANIN, M. **Caracterização elétrica do HDPE reciclado proveniente de resíduo sólido urbano**. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 5, 1999, Águas de Lindóia - SP, CD-ROM, Trabalho - n.440, p.1589-1590, 1999.

DE PAOLI, M.A. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2 ed. São Paulo, Chemkeys, 2008.

DKA Barnes, F. Galgani , RC Thompson , M. Barlaz. **Acúmulo e fragmentação de detritos plásticos em ambientes globais**. Philos. Trans. R. Soc. B 364, 1985 – 1998, 2009.

DOWLING, N.E. ***Mechanical Behavior of Materials***. Prentice Hall, USA, 1993.

ECYCLE, 2014. **O que é pegada de carbono no meio ambiente?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/3874-pegada-carbono.html>. Acesso em 29 de maio de 2020.

EHRIG, R.J., CURRY, M.J. ***Plastics Recycling Products and processes***. Munich: Hanser Publishers, 1992.

EVAGELISTA, J. **Tecnologia de alimentos**. 4º reimpressão da 2ª edição. São Paulo: Editora Atheneu, 2001.

FELLOWS, P.J. ***Food processing technology: Principles and practice***. England: Woodhead Publishing Ltd., 2nd Ed., 2002, 575 p.

FELTRE, R. **Química Orgânica**. 6. Ed. V.3. São Paulo: Moderna, 2004. p. 379, 385, 386.

FERRAROLI, F.; MOTTA, I. **Uma nova dimensão de termoplásticos: O consumo energético**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 11, nº 3, 2001.

FORLIN, F. J.; FARIA, J. A. F. **Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 12, 2002.

FORMIGONI, A. **A Reciclagem do PET no Brasil**. Página 70 - Dissertação de Mestrado, Universidade Paulista (UNIP), São Paulo, 2007.

GABRIEL, E. **A Embalagem e Meio Ambiente: uma visão geral**, VII Congresso Brasileiro de Embalagens, Campinas, SP, 7p., 1992.

GESTRAN, Empresa Nacional. **Tipos de Caminhões: Conheça os principais tamanhos e capacidades em toneladas para o veículo transportador**. Publicada em 26/04/2017. Disponível em: <https://www.gestran.com.br/blog/principais-tipos-de-caminhoes>. Acesso em: 24 de maio de 2020.

GEYER, R. (FAPESP) et al. ***Production, use, and fate of all plastics ever made***. Science Advances. 19 de julho de 2017.

GOOGLE MAPS. **Trajeto entre as unidades de embalagens plásticas**. Disponível em : <https://www.google.com/maps> _ Acesso em: 16 de junho de 2020.

GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. p. 27.

GUIMARÃES, M. J. O C., COUTINHO, F. M. B., ROCHA M. C. G., **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 12, 76, 2002.

GUTIÉRREZ, C.; RODRÍGUEZ, J.F.; GRACIA, I.; LUCAS, A. GARCÍA, M.T. **Reduction of the carbon footprint through polystyrene recycling: economical evaluation**. Process Safety and Environmental Protection, v. 101, p. 144-151, 2006.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E., 2009. **Plastics Recycling: challenges and opportunities**. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B, v. 364, n. 1526, p. 2115-2116.

IDOL, J.D; LEHMAN, R.L, 2004. **The CRC handbook of mechanical engeneering**. 2nd. Ed. Nova Iorque: CRC.

INSTITUTO DE EMBALAGENS. **Embalagens Flexíveis**. São Paulo. Instituto de embalagens, 2009. 164p.

JENNINGS, T. C. & STARNES JR., W. H. **PVC stabilizers and lubricants**, in PVC handbook, C. E. Wilkes, J. W. Summers & C. A. Daniels (ed.), Hanser Gardner Publishers, Cincinnati, 2005.

JJ. Plast Reciclagem. **A Compra de Polipropileno para a reciclagem**. Disponível em: <http://www.jjplast.com.br/compra-de-pp-para-reciclagem>. Acesso em: 15 de julho de 2020.

JUNIOR, E. H. **Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia de Polímeros**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 8, n. 2, p. 6-9, 1998.

LA ROVERE, E.L. **Inventário de Emissões de Gases do Efeito Estufa do Município de São Paulo**. Ed. São Paulo, 2005. 137 p.

LIMA, R. M. R.; ROMEIRO, F.E. **A reciclagem de materiais e suas aplicações no desenvolvimento de novos produtos: um estudo de caso**. In: Congresso Brasileiro De Gestão de Desenvolvimento de Produto. 3º Edição, 2001, Florianópolis.

LÓPEZ, A. et al. **Pyrolysis of municipal plastic wastes: Influence of raw material composition**. Waste Management, v.30, n.4, p. 620-627, 2010.

LOUREIRO L. N.; **Panorâmica sobre as emissões atmosféricas: um estudo de caso** - Avaliação do inventário emissões atmosféricas da região metropolitana do rio de janeiro para fontes móveis. Tese. Universidade federal do Rio de Janeiro, 2005.

LUZURIAGA, S., KOVÁROVÁ, J., FORTELNY, I. **Degradation of pre-aged polymers exposed to simulated recycling: Properties and thermal stability**. Polymer Degradation and Stability, v. 91, pp. 1226-1232, 2006.

MAGALHÃES, P.I.G. **A validação de processo como garantia de conformidade dos produtos na indústria de dispositivos plásticos.** Juiz de Fora, 2010.

MANCINI, S. D., et al. **Composição dos Plásticos presentes em Resíduos Urbanos.** Revista Saneamento Ambiental, n 67, 2000.

MANO, E. B.; MENDES, L.C. **Introdução a Polímeros.** 2a ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1999.

MANOS, G., GOBIN, K., AKPANUDOH, N. S. 2005. **Catalytic degradation of plastic waste to liquid fuel over commercial cracking catalysts Effect of polymer to catalyst ratio/acidity content.** Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2005, Vol. 235, pp. 67 - 73.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos Roscas únicas, Extrusão e Matrizes, Injeção e Moldes.** Editora Artliber, 2005 São Paulo.

MASSAGARDI, M. **Diesel: Oportunidades e Desafios.** In: Hart World Fuels Conference Latin American & the Caribbean. Rio de Janeiro, 2004.

MAZZUCO, M. **Estabelecer processos de identificação e separação de plásticos para a indústria de reutilização e reciclagem.** Trabalho de Conclusão de Curso de Química, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), Florianópolis, 2008, 40 p.

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html. Acesso em 25/05/2020. Brasil Governo Federal.

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação, 2006. **Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis. Relatório de Referência.** Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/17352.html>. Acesso em 15 de agosto de 2020.

MECALUX. **Gold Press TQ 500 PET.** Disponível em: <https://www.logismarket.ind.br/gold-press-maquinas-e-reciclagem/tanque-paralavagem-de-pet-pvc/4139084920-p.html>. Acesso em: 25 de Junho de 2020.

MELLO, A.C.G. **Os Reflorestamentos com espécies nativas e a fixação de Carbono.** Opiniões sobre o setor de florestas plantadas Ribeirão Preto, março-maio 2007. Disponível em: <http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=307>. Acesso em: 23 de junho de 2020.

MICHAELI, W et al. **Tecnologia dos Plásticos.** 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1995.

MICHAELIS - **Moderno Dicionário da língua Portuguesa.** São Paulo: Melhoramentos, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA, 2014. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília, Brasil – BR. Disponível

em: <http://www.anp.gov.br/?pg=71044&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1402513929715>. Acesso em: 24 de junho de 2020.

MUSAFI, N. **Plastics Waste Management: Disposal, Recycling, and reuse**, 1993.

NÓBREGA, O. S.; SILVA, E. R.; SILVA, R. H. da. **Livro didático sobre Química**, volume único. 1. Ed. São Paulo: Ática, 2005, p. 535.

OLIVEIRA, O. J. **Gestão da qualidade**. São Paulo: Thomson, 2006.

PARENTE, Juracy. **Varejo no Brasil: Gestão e Estratégia**. São Paulo: Atlas, 2000. 388p.

PCPV: **Plano de Controle da Poluição por Veículos em Uso**, 2005. Governo Do Estado Do Ceará.

PEREIRA, E.R. **Avaliação do desempenho Mecânico de Blendas de PEAD Virgem e Borrachas Plásticas como Alternativa para a Reutilização de Resíduo Industrial**. Porto Alegre: XI Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 2014.

PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. do. **Química na abordagem do cotidiano**. 4. Ed. São Paulo: Moderna, 2006, volume 3, p. 248, 251, 258, 267.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976, p. 400 - 411.

PINTO, J. C. C. DA S., et al. 2012. **Impactos ambientais causados pelos plásticos**. Rio de Janeiro: e-papers Serviços Editoriais Ltda., 2012.

PITT, F. D.; BOING, D.; BARROS, A. A. C. **Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis**. Revista da UNIFE, v. 1, n. 09, 2011.

PIVA, A. M.; WIEBECK, H. **A Reciclagem do plástico**. São Paulo: Artliber, 2004.

PLASTIC NEW ZEALAND. **The Plastic Identification Code: Bottoms up! Recycling plastic is easy at work and at home**. Disponível em: www.plastics.org.nz . Acesso em: 15/07/2020.

PLASTIVIDA - Instituto Sócio Ambiental Dos Plásticos. **Reciclagem: o que é?** Disponível em: http://www.plastivida.org.br/2009/Reciclagem_Oque-e.aspx. Acesso em: 02 de março de 2020.

RABELLO, M., **Aditivação de Polímeros**. 1 ed. São Paulo, Artliber, 2007.

REDIVO, M.A.P. **Estudo da viabilidade de painéis externos automotivos em termoplásticos**. São Paulo, 2005.

REMY, A.; GAY, M.; GONTHIER, R. **Os Materiais**. 2ª ed. São Paulo: Hemus, 2002, p. 302, 346.

REVISTA dos moldes de injeção de plásticos. **Defeitos em peças plásticas, avaliação de defeitos em peças de termoplásticos**. Revista do mês de abril publicada no ano de 2013. Disponível em: <http://www.remoldes.moldesinjecaoplasticos.com.br/abril.pdf>. Acesso em: 28 agosto 2020.

RIBEIRO, L.S. **Evolução tecnológica e automação das máquinas injetoras**. São Paulo, 2009.

SANTOS, W. L. P. dos; MÓL, G. de S. **A Química cidadã: química orgânica, eletroquímica, radioatividade, energia nuclear e a ética da vida**. 1. Ed. V.3. São Paulo: Nova Geração, 2010, p. 137,140, 142, 155.

SANTOS, W.L.P. E MÓL, G.S. **Química e Sociedade**, Volume único, São Paulo: Nova Geração, 2005.

SCHLISCHTING, R. **A Influência da adição de poliestireno expandido no processo de polimerização do estireno em suspensão**. Florianópolis, SC, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/74645/browse?value=Schlischting%2C+Rodrigo&type=author>. Acesso em: 24 de Maio de 2020.

SELKE, S.E.M. **Packaging, and the environment ¾ alternatives, trends and solutions**. Lancaster, England, 1990.

SHACKELFORD, J.F.; **Introduction to Materials Science for Engineers**. 4th edition, Prentice Hall, USA, 1996.

SILVA, E.A; ARAÚJO, I.M. XI-026. **Eficiência Energética Na Indústria De Reciclagem e Transformação de Material Plástico**. Artigo da ABES, 2014.

SILVA, K.V. **Produção de filmes de celulose bacteriana funcionalizados por ligação covalente com moléculas capazes de absorver radiação ultravioleta**. Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, publicado em setembro de 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322148981_Celulose_Bacteriana_Produzida_a_partir_de_Glicerol_Residual_da_Producao_de_Biodiesel. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

ŠIMON, P. **Polymer Degradation and Stability**, 36, p.85, 1992.

SINDIPLAST- **Sindicato da Indústria de Material Plástico do Estado de São Paulo**, 2011. Guia Ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos, série P+L. 1ª edição.

SIQUEIRA, P. E. **Por que os carros grandes usam diesel?** Disponível no site: <https://pt.quora.com/Por-que-os-carros-grandes-usam-diesel>. Acesso em: 24 de junho de 2020.

SONG, H. S., HYUN, C. J. **A study on the comparison of the various waste management scenarios for PET bottles using life cycle assessment methodology**, *Resources, Conservation and Recycling*. v. 27, p 267-284, 2001.

SPINACÉ, M.A.S; PAOLI, M.A.D. **A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros**. In: *Química Nova*, Vol. 28, nº1, p. 65-72, 2005.

SUBRAMANIAM, P.M. **Plastics Recycling and waste management in the US**, *Resources, Conservation and Recycling*. 28, p 253-263, 2000.

VAN WILLIGE, R.W.G. **Effects of flavour absorption on foods and their packaging materials**. 2002. 140 f. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands, 2002.

VILHENA, A. Guia de coleta seletiva de lixo, 1ª ed., **CEMPRE: Compromisso Empresarial para Reciclagem**. ed. São Paulo 1999, p. 26.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our ecological footprint. The new catalyst bioregional series**. Gabriola Island, B.C.: New Society Publishers, 1996.

WASILKOSKI, C. M. **Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2002.

WWF - Banco Mundial. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**, 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

ZANIN, M.; MANCINI, S.D; **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. Publicado em 2015. 2º Edição. Editora Edufscar.