

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

RECICLAGEM DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO
MISTURADOS NÃO REAPROVEITADOS PELOS CENTROS
DE TRIAGEM DE PORTO ALEGRE

Dissertação de Mestrado

Letícia Christmann Espíndola

Porto Alegre

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**RECICLAGEM DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO
MISTURADOS NÃO REAPROVEITADOS PELOS CENTROS
DE TRIAGEM DE PORTO ALEGRE**

Letícia Christmann Espíndola

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de concentração: Polímeros

Orientador:
Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Porto Alegre

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *RECICLAGEM DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO MISTURADOS NÃO REAPROVEITADOS PELOS CENTROS DE TRIAGEM DE PORTO ALEGRE*, elaborada por Leticia Christmann Espíndola, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Cléia de Andrade Salles

Prof. Dr. Luís Felipe Machado do Nascimento

Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio

Agradecimentos

Aos meus pais, Carlos e Iria, pelo apoio incondicional ao longo destes anos todos. Agradecimentos aos demais parentes, irmãs, tios, sobrinhos porque sempre torceram por mim.

À Daniel Dresch, por estar ao meu lado, na reta final do trabalho, sempre com amor e paciência.

Aos meus colegas de mestrado, por terem me agüentado durante os meus maus momentos, especialmente à minha leal amiga Andréa Marins de Oliveira. Aos amigos, Fernanda Tartori, Eduardo Gaspar Franzen Ferreira, Karina Moita de Oliveira, Gabriela Marques dos Ramos, Gabriela Straatmann, Vanderley Bettiol, Liliane Pollo, Arlindo Räder, e aos demais novos e antigos colegas, sempre dispostos a ouvir e discutir sobre os mais variados assuntos.

À minha colega de trabalho Adriana Inés Wassermann e meu grande amigo e companheiro Marco Eduardo Schulz, que foram fortes colaboradores e incentivadores deste trabalho, pelo apoio incondicional e parceria ao longo destes anos. Agradecimentos também ao professor Assis Francisco Castilhos pela ajuda na compreensão do problema do Resíduo Sólido Urbano e do papel fundamental da reciclagem.

Ao meu orientador Nilo Sérgio Medeiros Cardozo e ao professor Norberto Holtz, pelas idéias e imprescindível ajuda na estruturação deste trabalho.

Agradecimentos à COPESUL, pela bolsa de mestrado e análises dos efluentes deste trabalho, ao DMLU pelo fornecimento dos resíduos plásticos e dados históricos para realização da pesquisa, ao CEFET-RS por ceder espaço para as instalações físicas deste projeto e material para pesquisa, à IPIRANGA PETROQUÍMICA S.A., pela realização dos testes mecânicos do produto final e à UFRGS, pela estrutura para a realização deste trabalho de mestrado.

À quatro grandes engenheiros, Carlos Berwanger (in memorian), José Maria Pinto Ferreira, Juan José Migueles Molinos (in memorian) e Sérgio Möller, pelo grande exemplo de vida e amor à profissão.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal buscar alternativas para minimização dos Resíduos Sólidos Urbanos gerados, especificamente o resíduo plástico misturado que não é vendido pelos galpões de reciclagem dos centros urbanos e acaba sendo destinado ao aterro sanitário. Os plásticos descartados podem representar até 40% do resíduo sólido urbano gerado em grandes cidades. A idéia principal deste trabalho é determinar um processo com baixo custo de implantação e operação que possa ser utilizado pelas comunidades pobres para geração de emprego e renda e que também diminua os resíduos descartados no meio ambiente. Na cidade de Porto Alegre existe um programa de coleta seletiva de resíduos potencialmente recicláveis, feita através de caminhões, nas residências que encaminha este material para locais de triagem onde os materiais são separados e vendidos para recicladores. Os resíduos plástico, principalmente filmes, são difíceis de serem comercializados pelos centros de triagem por estarem misturados, serem de difícil identificação, baixo peso e apresentarem uma grande contaminação por sujeiras, logo este resíduo acaba seguindo para aterros locais. A amostra escolhida foi proveniente do contêiner de rejeitos do galpão de triagem Aterro da Zona Norte da cidade de Porto Alegre. Foram analisadas alternativas para os seguintes processos: coleta, caracterização, moagem do material sujo, homogeneização, lavagem, secagem, aglutinação e prensagem de placas por compressão. O efluente gerado na lavagem foi analisado quanto aos seguintes parâmetros: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos, Sólidos Sedimentáveis, Óleos e Graxas, Condutividade, pH, Surfactantes, Nitrogênio Total, Fósforo Total e Coliformes Fecais. As placas moldadas a partir do material reciclado foram avaliadas quanto às propriedades de Tração, Flexão, Resistência ao Impacto Charpy, Resistência ao Impacto Izod e Densidade Média.

Abstract

This work has as main goal to find alternatives to minimize the amount of plastics in Municipal Solid Waste (MSW), specifically commingled plastic residue that cannot be sell by sorting centers and therefore is destined to landfill. This rejected plastics can represent 40% of the MSW generated in big cities. The main idea is to determine a low cost process that may be implemented by poor communities as a way to generate more profits and jobs to them and also to reduce residues discharged on the environment. In Porto Alegre city (Brazil), there is a program of selective collection of materials that can be recycled, made by trucks, on the residences and that carries this material to sorting centers where they are separated and sold to recyclers. Plastics residues, especially films, are difficult to be commercialized by these sorting centers due to the fact that they are mixed, dirty, hard to identify and low weight, therefore theses centers send them to landfill. Samples studied in this work come from this rejected plastic material, commingled, collected in the rejection container of the shed named Aterro da Zona Norte. Alternatives were analyzed concerning the following process: collection, characterization, grinding of dirty material, homogenization, washing, drying, agglutination and pressing process. The following parameters of the effluent generated by the washing process were analyzed: Biochemical Oxygen Demand in 5 days (BOD₅), Chemical Oxygen Demand (COD), Surfactants, Total Nitrogen, Fecal Coliforms, Conductivity, Total Phosphorus, Oil and Grease, Settleable Solids, Suspended Solids and pH. The plates generated by compressing had their mechanical properties analyzed as tensile, flexural, density, Charpy Impact Strength and Izod Impact Strength.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Etapas básicas do gerenciamento de resíduos.....	4
Figura 3.1: Estabilidade térmica dos vários tipos de plásticos	28
Figura 3.2: Reciclagem mecânica de poliolefinas	33
Figura 3.3: Aglutinador.....	39
Figura 3.4: Moldagem por compressão para produção de placas feitas de materiais termoplásticos.....	40
Figura 4.1: Fases do processo de reciclagem mecânica.....	54
Figura 4.2: Separação de material no Centro de Triagem do Aterro da Zona Norte.....	55
Figura 4.3: Coleta realizada no contêiner de rejeitos do Centro de Triagem.....	56
Figura 4.4: Alimentação de material para a prensagem dos fardos	56
Figura 4.5: Fardos prensados.....	57
Figura 4.6: Moinho de facas.....	62
Figura 4.7: Moagem do material.....	62
Figura 4.8: Tanque de lavagem e cesta para coleta do material decantado.....	64
Figura 4.9: Lavagem do material moído	65
Figura 4.10: Esquema para separação flutuação-decantação em 4 estágios teóricos para resíduos plásticos misturados.	65
Figura 4.11: Descarga de efluente líquido.....	66
Figura 4.12: Esquema da secagem do material na cama de PVC.....	68
Figura 4.13: Secagem do material na estrutura de aço inoxidável.	69
Figura 4.14: Esquema da secagem em leito fluidizado.....	70
Figura 4.15: Secagem no tambor com ar.....	70
Figura 4.16: Visualização do aglutinador.....	71
Figura 4.17: Inserção do material plástico no aglutinador e inserção de água na mistura.....	71
Figura 4.18: Tipos de materiais prensados	72
Figura 5.1: Material rejeitado pelo centro de triagem.....	77
Figura 5.2: Distribuição de plásticos por coleta	79
Figura 5.3: Partículas metálicas aderidas ao ímã.....	89
Figura 5.4: Aspecto visual dos materiais processados por compressão:.....	92
Figura 5.5: Aspecto visual da placa E ₂₀₀ ou E ₂₃₀	94
Figura 5.6: Aspecto visual da placa L ₂₀₀ e L ₂₃₀	94
Figura 5.7: Vista da parte inferior da placa	95

Figura 5.8: Laminação na placas de material limpo sobrenadante aglutinado.....	95
Figura 5.9: Aspecto das placas prensadas P ₁₈₀ e P ₂₀₀	96
Figura 5.10: Placa de material lavado e decantado prensado na temperatura de 230°C...	96
Figura 5.11: Aspecto das placas prensadas S ₂₀₀ e S ₂₃₀	97
Figura 5.12: Massas específicas dos materiais prensados.....	98
Figura 5.13: Tensão na ruptura média dos materiais	100
Figura 5.14: Alongamento na ruptura dos materiais	102
Figura 5.15: Tensão a 5%.....	104
Figura 5.16: Resistência ao Impacto Charpy.....	106
Figura 5.17: Resistência ao Impacto Izod	107

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação dos resíduos quanto à origem.....	5
Tabela 2.2: Principais tipos de coleta de resíduos pós consumo	6
Tabela 2.3: Tempo necessário para a decomposição de alguns materiais	9
Tabela 2.4: Total em peso de plásticos no RSU e forma de disposição	11
Tabela 2.5: Percentagem de plásticos pós-consumo reciclados em alguns países	11
Tabela 2.6: Composição em peso dos plásticos presentes no RSU dos EUA.....	15
Tabela 2.7: Reciclagem de plásticos pós-consumo em alguns estados do Brasil	18
Tabela 2.8: Meios de disposição de resíduos no Rio Grande do Sul no ano de 2000	18
Tabela 2.9: Quantidade coletada e enviada para disposição final no Rio Grande do Sul diariamente em 2000	19
Tabela 3.1: Composição percentual de polímeros no RSU.....	23
Tabela 3.2: Temperaturas de plastificação dos polímeros	28
Tabela 3.3: Compatibilidade dos diferentes termoplásticos	30
Tabela 3.4: Métodos que influenciam na miscibilidade de 2 polímeros.....	31
Tabela 3.5: Equipamentos de redução de tamanho preliminar	34
Tabela 3.6: Composição das frações da separação por flutuação/decantação de plásticos do RSU.	35
Tabela 3.7: Propriedades físicas da mistura PEAD/PEBD/PP/PS/PVC, na proporção 15/68/13/2/2 após o processo de S ³ P e moldagem por injeção	45
Tabela 3.8: Propriedades mecânicas do PEAD pós-consumo reciclado	45
Tabela 4.1: Quantidade de material coletada no contêiner de rejeitos.....	57
Tabela 4.2: Massas específicas dos principais polímeros contidos no RSU	58
Tabela 4.3: Tabela mostrando o comportamento dos polímeros quando submetidos à queima	61
Tabela 4.4: Limites de emissão de efluentes líquidos	66
Tabela 4.5: Métodos para análises de efluentes	67
Tabela 4.6: Quantidade necessária para fazer a prensagem no molde QD de acordo com o material utilizado.....	73
Tabela 4.7: Quantidade necessária de material decantado para fazer a prensagem no molde D2	74
Tabela 4.8: Processo de prensagem	74
Tabela 5.1: Percentual em peso de polímero contido em cada amostra.....	78

Tabela 5.2: Principais contaminantes das embalagens plásticas encontradas no rejeito do centro de triagem.....	79
Tabela 5.3: Resultados da análise de efluentes da amostra armazenada por mais de 6 meses	82
Tabela 5.4: Resultados da análise de efluentes da amostra que foi moída e lavada logo após a coleta	84
Tabela 5.5: Comparação entre as médias dos valores obtidos na lavagem do efluente armazenado por período superior a 6 meses e da lavagem em até 2 semanas com os limites impostos pela SSMA.....	85
Tabela 5.6: Vazões de água de resfriamento ($L.h^{-1}$) para cada espessura de placa (mm). 90	
Tabela 5.7: Composição média de polímeros das amostras coletadas no contêiner de rejeitos.....	91
Tabela 5.8: Materiais utilizados para compressão	93
Tabela 5.9: Valores encontrados de massa específica ($g.cm^{-3}$) para os corpos de prova..	98
Tabela 5.10: Tensão na Ruptura (MPa)	99
Tabela 5.11: Alongamento na Ruptura (%).....	101
Tabela 5.12: Tensão a 5% (MPa).....	103
Tabela 5.13: Resistência ao Impacto Charpy ($kJ.m^{-2}$)	105
Tabela 5.14: Resistência ao Impacto Izod ($J.m^{-1}$).....	107
Tabela 5.15: Valores médios das propriedades dos materiais reciclados	108

Lista de Siglas, Símbolos e Variáveis

ANZECC – Australian and New Zealand Environment and Conservation Council

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEFET-RS – Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Sul

CEMPRE – Centro Empresarial para Reciclagem

CEPA – Commonwealth Environmental Protection Agency

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

D1 – Molde redondo de aço inoxidável diâmetro=175 mm e altura=20mm

D2 – Molde redondo de aço inoxidável diâmetro=115 mm e altura=40mm

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DMLU – Departamento Municipal de Limpeza Urbana

DSD – Duales System Deutschland

E₂₀₀ – Material lavado, sobrenadante, aglutinado, extrusado e prensado na temperatura de 200°C

E₂₃₀ – Material lavado, sobrenadante, aglutinado, extrusado e prensado na temperatura de 230°C

EPA – Environmental Protection Agency

L₂₀₀ – Material lavado, sobrenadante, aglutinado e prensado na temperatura de 200°C

L₂₃₀ – Material lavado, sobrenadante, aglutinado e prensado na temperatura de 230°C

MPN – Most Probable Number (número mais provável de coliformes na amostra)

P₁₈₀ – Material lavado, decantado e prensado na temperatura de 180°C

P₂₀₀ – Material lavado, decantado e prensado na temperatura de 200°C

PC - Policarbonato

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Poli(tereftalato de etileno)

PEV – Programa de Entrega Voluntária

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PVC – Poli(cloreto de vinila)

PU – Poliuretano

QD – Molde quadrado de 16 cm com cavidade de 20 mm

RSSS – Resíduo Sólido de Serviço de Saúde

RSU – Resíduo Sólido Urbano

S³P – Processo de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo misturados e pulverizados

S₂₀₀ – Material sujo aglutinado e prensado na temperatura de 200°C

S₂₃₀ – Material sujo aglutinado e prensado na temperatura de 230°C

T_{inf} – Temperatura inferior

T_{sup} – Temperatura superior

UV – Radiação ultra-violeta

Sumário

Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Siglas, Símbolos e Variáveis.....	xi
Sumário	xiii
Introdução	1
Fundamentos sobre Reciclagem	3
2.1 Conceitos Básicos.....	3
2.1.1 Resíduos Sólidos.....	4
2.1.2 Coleta dos Resíduos Sólidos	6
2.1.3 Unidades de triagem de material	7
2.1.4 Disposição final	8
2.1.5 Reciclagem	8
2.2 Panorama da reciclagem de plásticos	10
2.2.1 Reciclagem de plásticos no mundo.....	10
2.2.2 Reciclagem de plásticos no Brasil	16
2.2.3 Reciclagem de plásticos no Estado do Rio Grande do Sul	18
Revisão Bibliográfica e Legislação	21
3.1 Reciclagem de plásticos.....	21
3.2 Principais tipos de plásticos encontrados no RSU	24
3.2.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD).....	24
3.2.2 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).....	24
3.2.3 Poli(tereftalato de etileno) (PET).....	24
3.2.4 Polipropileno (PP).....	25
3.2.5 Poliestireno (PS)	25
3.2.6 Poli(cloreto de vinila) (PVC).....	25
3.2.7 Outros	26
3.2.8 Separação dos plásticos.....	26
3.2.9 Propriedades térmicas dos plásticos	27

3.3	Reciclagem de Plásticos Misturados	29
3.4	Reciclagem mecânica de plásticos	32
3.4.1	Moagem.....	34
3.4.2	Lavagem.....	34
3.4.3	Análise dos efluentes resultantes da lavagem	36
3.4.4	Secagem	38
3.4.5	Aglutinação	39
3.4.6	Processo de Prensagem	40
3.4.7	Principais problemas do processamento de plásticos misturados	41
3.5	Processos existentes para reciclagem de plásticos misturados	42
3.6	Propriedades mecânicas do material reciclado misturado	44
3.7	Mercado para produtos recicláveis.....	45
3.8	Legislação sobre reciclagem	48
3.8.1	Legislação Mundial sobre reciclagem.....	49
3.8.2	Legislação Nacional.....	50
	Materiais e Métodos.....	54
4.1	Esquema Básico da Reciclagem Mecânica.....	54
4.2	Coleta dos Resíduos Plásticos.....	55
4.2.1	Seleção do centro de triagem.....	55
4.2.2	Coleta e armazenamento das amostras.....	55
4.3	Caracterização das amostras	58
4.3.1	Análise de massa específica	58
4.3.2	Análise do comportamento do plástico durante a queima	59
4.3.3	Outros métodos.....	59
4.4	Moagem	62
4.5	Pesagem e homogeneização.....	63
4.6	Lavagem.....	63
4.7	Caracterização do efluente.....	65
4.8	Secagem.....	67
4.8.1	Secagem ao ar livre sobre lona plástica	67
4.8.2	Secagem sobre uma cama com estrutura de canos de PVC	68
4.8.3	Secagem em estrutura metal.....	68
4.8.4	Secagem em leito fluidizado	69

4.8.5 Secagem com ar forçado	70
4.9 Aglutinação	71
4.10 Materiais processados	72
4.11 Prensagem	72
4.12 Preparação dos corpos de prova para a determinação das propriedades mecânicas	75
4.13 Avaliação das propriedades do material reciclado	75
4.13.1 Massa Específica.....	75
4.13.2 Resistência à Flexão.....	75
4.13.3 Resistência à Tração.....	76
4.13.4 Resistência ao Impacto Izod.....	76
4.13.5 Resistência ao Impacto Charpy	76
Resultados e Discussões.....	77
5.1 Coleta dos resíduos plásticos	77
5.2 Caracterização da amostra	78
5.3 Moagem	80
5.4 Homogeneização	81
5.5 Lavagem.....	81
5.5.1 Análise dos efluentes gerados pela amostra que foi armazenada por período superior a 6 meses	82
5.5.2 Análise dos efluentes gerados pela amostra que foi moída e lavada logo após a coleta.....	84
5.5.3 Análise da borra resultante do processo de lavagem	86
5.6 Secagem	87
5.6.1 Secagem ao ar livre sob lona plástica	87
5.6.2 Secagem sobre uma cama com estrutura de canos de PVC	87
5.6.3 Secagem em estrutura de metal	88
5.6.4 Secagem em leito fluidizado	88
5.6.5 Secagem com ar em um tambor	88
5.7 Aglutinação	89
5.8 Moldagem por compressão	89
5.8.1 Material limpo sobrenadante aglutinado e extrusado (E ₂₀₀ e E ₂₃₀).....	93
5.8.2 Material limpo sobrenadante aglutinado a 200 e 230°C (L ₂₀₀ e L ₂₃₀).....	94
5.8.3 Material decantado limpo a 180 e 200°C (P ₁₈₀ e P ₂₀₀).....	96

5.8.4 Material aglutinado sujo a 200 e 230°C (S ₂₀₀ e S ₂₃₀).....	97
5.9 Avaliação das propriedades de cada mistura	97
5.9.1 Massa específica	98
5.9.2 Ensaio de tensão-deformação (Tração).....	99
5.9.3 Resistência à Flexão.....	103
5.9.4 Resistência ao Impacto Charpy	105
5.9.5 Resistência ao Impacto Izod.....	106
5.10 Propriedades médias das misturas	108
Conclusões e Sugestões.....	110
6.1 Conclusões	110
6.2 Sugestões para próximos trabalhos	115
Referências Bibliográficas	117

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho tem como objetivo principal buscar alternativas para minimização dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) da cidade de Porto Alegre que são destinados aos aterros sanitários. As matérias-primas escolhidas para este trabalho foram os plásticos, pois alguns podem demorar até 500 anos para se degradar, e seu volume no RSU pode ser de até 40% devido ao baixo peso das embalagens. Isto torna os resíduos plásticos descartados um componente muito impactante nos aterros sanitários.

No ano de 2000, segundo a Pesquisa Nacional sobre Saneamento básico do IBGE (2002), foram coletadas no Brasil 228.413 toneladas ao dia de resíduos sólidos e o estado do Rio Grande do Sul coletou 7.468,3 toneladas ao dia de resíduos, sendo que 9,34% destes foram enviados aos centros de triagem. Conforme dados do CEMPRE de 2002, o resíduo sólido urbano da cidade de Porto Alegre era composto por 9% em peso de plásticos, e este material representava entre 30 e 40% de seu volume. Em 1999, somente 4% em peso de todo o plástico consumido na cidade foi reciclado, em 2002 foram reciclados 23,6%, e no ano de 2004, este número subiu para 27,6% correspondendo a 67.000 toneladas. Isto demonstra claramente um aumento na reciclagem deste material, muito além da média nacional que em 2004, segundo a ABIQUIM, foi de 17,5% (CEMPRE, 2004). Os principais componentes plásticos encontrados no lixo seco são: polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), poliestireno (PS) nas formas expandido e não expandido, flexível e rígido, poli(cloreto de vinila) (PVC) e poli(tereftalato de etileno) (PET) (CEMPRE, 2002).

A reciclagem pode ser dividida em reciclagem mecânica, reciclagem química e reciclagem energética. A reciclagem mecânica é o processo operacional mais simples e de mais fácil aplicação no Brasil. Os outros dois processos são mais complexos e podem gerar

emissões gasosas, muitas vezes prejudiciais ao meio ambiente e de difícil controle ambiental.

Considerando que a reciclagem de plásticos no Brasil ainda é pequena e que reciclar é uma tendência mundial, este trabalho apresenta um processo para reciclar os plásticos de difícil separação ou limpeza encontrados no resíduo sólido urbano da cidade de Porto Alegre. Para este estudo foram utilizados os plásticos rejeitados na separação manual que ocorre nos galpões de reciclagem da cidade de Porto Alegre e que acabam sendo enviados para o aterro sanitário.

Os objetivos deste trabalho foram basicamente cinco. Primeiramente auxiliar na minimização dos resíduos plásticos enviados para aterro sanitário através da reciclagem mecânica. O segundo foi avaliar a composição da amostra que será processada. O terceiro objetivo foi verificar as condições de processamento dos plásticos através da reciclagem mecânica. O quarto objetivo foi verificar a composição dos efluentes gerados e compará-la com os limites impostos pela legislação ambiental vigente. E por último, avaliar as propriedades mecânicas do material produzido por compressão.

O conteúdo desenvolvido neste trabalho foi dividido em cinco capítulos, resumidos a seguir:

O capítulo 2 apresenta os fundamentos básicos referentes a resíduos, seus meios de coleta, disposição e reciclagem, bem como o atual panorama mundial, nacional e regional da reciclagem.

O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre reciclagem de plásticos, principais plásticos encontrados no RSU, suas propriedades básicas, reciclagem de plásticos misturados, reciclagem mecânica de plásticos, principais processos de reciclagem, propriedades mecânicas do reciclado, mercado e algumas legislações sobre reciclagem no mundo e no Brasil.

O capítulo 4 mostra os materiais e os métodos necessários para o processo de reciclagem mecânica, bem como as metodologias de análises de efluentes do processo de lavagem do material e dos testes para determinação das propriedades mecânicas do material processado por compressão.

O capítulo 5 trata dos resultados obtidos em cada uma das etapas do processamento, bem como as principais dificuldades encontradas, os resultados das análises dos efluentes, da secagem, do processo de compressão e das propriedades mecânicas do material resultante, relacionando os resultados obtidos com as propriedades da matéria plástica virgem.

Por último, o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos sobre Reciclagem

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura no que diz respeito aos conceitos básicos que envolvem a reciclagem, os panoramas mundial, nacional e regional, mostrando também como está sendo tratada a reciclagem ao redor do planeta.

2.1 Conceitos Básicos

Segundo Colavitti (2003), a produção de resíduos sólidos triplicou no mundo nos últimos 30 anos. Por esta razão, a reciclagem de alguns materiais tornou-se importante devido a dois principais fatores. O primeiro deles é que, para alguns produtos, a matéria-prima pode constituir até 80 % do custo do artigo final. Em segundo lugar, a reciclagem minimiza os problemas ambientais de disposição final dos resíduos. No caso dos plásticos, que tem como matéria-prima o petróleo ou gás, a reciclagem reduz o consumo dos mesmos (SPAACK, 1988).

Cada vez mais, o conceito dos 4 R's se difunde no que diz respeito ao gerenciamento de resíduos (MUSTAFA, 1993; SUBRAMANIAM, 2000), cujos objetivos são descritos a seguir:

- "Redução": combate à geração de resíduos;
- "Reuso": nova utilização dos materiais;
- "Reciclagem": utilização do material descartado para a fabricação de novos produtos e
- "Recuperação": extração de energia a partir dos resíduos misturados descartados.

A redução e o reuso são formas de minimização, mas a reciclagem de materiais será sempre um fator importante na diminuição do volume nos aterros, bem como na diminuição do consumo de matérias-primas primárias.

A forma como os resíduos são tratados, desde a sua geração até a disposição final, é chamada de gerenciamento de resíduos. As etapas do gerenciamento de resíduos são mostradas no esquema da Figura 2.1 (SPAACK, 1988).

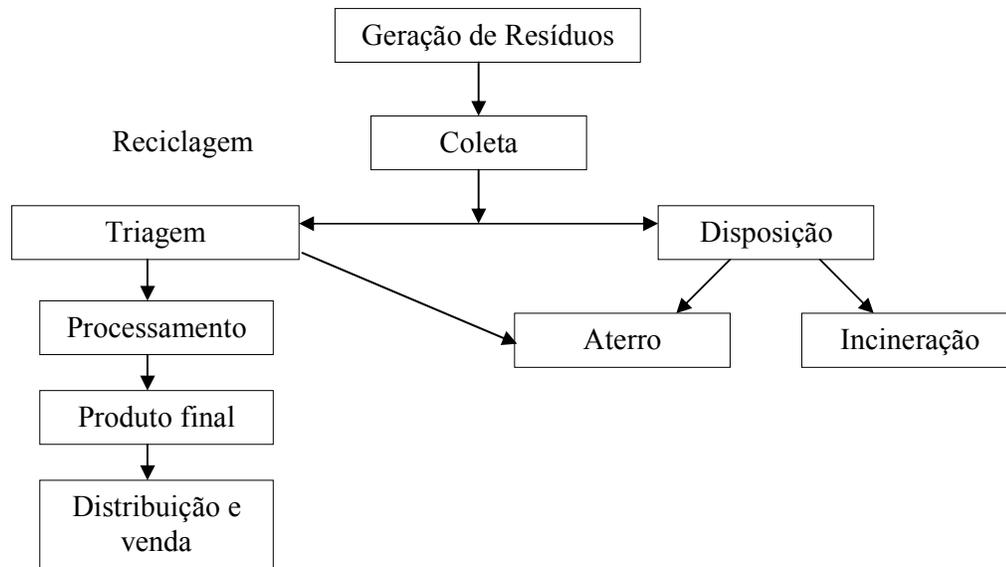


Figura 2.1: Etapas básicas do gerenciamento de resíduos (SPAACK, 1988)

A seguir serão apresentados alguns conceitos referentes aos resíduos sólidos gerados nas residências, sua coleta, disposição e reciclagem.

2.1.1 Resíduos Sólidos

Para determinar a melhor tecnologia de tratamento, aproveitamento e destinação final do resíduo sólido é necessário conhecer a sua classificação. A Tabela 2.1 mostra a classificação dos resíduos (LIXO, 2002).

O resíduo urbano pode ser dividido em resíduo seco, resíduo úmido e materiais não recicláveis. O resíduo seco é composto basicamente por papel, papelão, jornais, revistas, cadernos, caixas e embalagens em geral, caixa de leite, caixas de papelão, latas em geral, alumínio, cobre, pequenas sucatas, copos de metal e de vidro, garrafas, potes e frascos de vidro, plásticos, garrafas PET, sacos e embalagens, brinquedos, utensílios domésticos, etc. O resíduo úmido é composto por cascas de frutas e legumes, restos de comida, papel de banheiro, etc. Dentre os materiais não recicláveis encontram-se o papel higiênico, guardanapos de papel, papel carbono, etc. Pilhas e baterias não podem ser descartadas no

resíduo doméstico, pois contém metais pesados que contaminam o meio ambiente (LIXO, 2002; COLAVITTI, 2003).

Tabela 2.1: Classificação dos resíduos quanto à origem (LIXO, 2002)

<i>Tipo de Resíduo</i>	<i>Composição</i>
Resíduo urbano	Resíduos sólidos de áreas urbanas, incluindo resíduos domésticos, efluentes industriais domiciliares (pequenas indústrias de fundo de quintal) e resíduos comerciais.
Resíduo domiciliar	Resíduos sólidos de atividades residenciais contendo quantidade elevada de matéria orgânica, plástico, lata, vidro, etc.
Resíduo comercial	Resíduos sólidos das áreas comerciais composto basicamente por matéria orgânica, papéis e plásticos.
Resíduo público	Resíduos sólidos resultantes de limpeza pública (areia, papéis, folhagem, poda de árvores, etc.).
Resíduo especial	Resíduos geralmente industriais que devem ser tratados, manipulados e transportados de forma especial, como pilhas, baterias, embalagens de agrotóxicos, embalagens de combustíveis, remédios ou venenos, etc.
Resíduo industrial	Resíduos provenientes de indústrias. Há que se ter cuidado porque nem todos os resíduos produzidos podem ser designados como resíduo industrial. Algumas indústrias do meio urbano produzem resíduos semelhantes ao doméstico. Exemplo disto são as padarias.
Resíduo de Serviço de Saúde (RSS)	Originado dos serviços hospitalares, ambulatoriais e farmacêuticos, são compostos dos mais variados tipos de resíduos sépticos, resultantes de curativos, aplicação de medicamentos que, em contato com o meio ambiente ou misturados ao resíduo doméstico, poderão ser patógenos ou causadores de doenças, devendo ser destinados à incineração.
Resíduo atômico	Produto resultante da queima de combustível nuclear, composto de urânio enriquecido com isótopo atômico 235. A elevada radioatividade constitui um grave perigo à saúde da população, por isso este resíduo deve ser enterrado em local próprio e inacessível.
Resíduo espacial	Resíduo composto por restos provenientes dos objetos lançados pelo homem no espaço, que circula ao redor da Terra com uma velocidade de cerca de 28 mil quilômetros por hora. São estágios completos de foguetes, satélites desativados, tanques de combustível e fragmentos de aparelhos que explodiram normalmente por acidente ou foram destruídos pela ação das armas anti-satélites.
Resíduo radioativo	Resíduo tóxico e venenoso formado por substâncias radioativas resultantes do funcionamento de reatores nucleares. Como não há um lugar seguro para armazenar esse resíduo radioativo, a alternativa recomendada pelos cientistas foi colocá-lo em tambores ou recipientes de concreto impermeáveis e a prova de radiação, e posteriormente enterrados em terrenos estáveis, no subsolo.

Todo o resíduo gerado por uma população deve ser disposto de forma que não interfira nas suas atividades sociais ou industriais. Antigamente, a preocupação com o meio ambiente era mínima e desta forma, os resíduos gerados eram dispostos em qualquer lugar. Com o passar

dos anos e o crescimento da população, começaram a existir algumas restrições quanto ao descarte de resíduos, principalmente a céu aberto.

2.1.2 Coleta dos Resíduos Sólidos

Segundo Mustafa (1993), na maioria dos grandes centros urbanos do mundo, a coleta periódica de resíduos sólidos é dividida em coleta de resíduo comum, realizada normalmente por meio de caminhões compactadores que enviam o material para aterro sanitário e coleta seletiva de materiais recicláveis, realizada com caminhões de caçamba aberta, que podem absorver o grande volume e baixo peso do resíduo composto basicamente por embalagens. Segundo o autor, existem cinco sistemas principais de coleta seletiva de materiais recicláveis como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Principais tipos de coleta de resíduos pós consumo (MUSTAFA, 1993)

<i>Sistema</i>	<i>Princípio</i>
Coleta nas residências	Coleta e separação de materiais potencialmente recicláveis visando redução do volume do RSU.
Centros de recebimento para reciclagem	Local onde os consumidores levam os seus materiais para serem reciclados. Podem ser parte integrante do programa de coleta seletiva.
Contêiner de entrega voluntária para materiais	Este sistema incentiva o consumidor a separar seus resíduos recicláveis. Envolve custo baixo ou nulo para operar se forem privados. Tem a desvantagem de priorizar somente os tipos de resíduos plásticos que possuem maior custo de venda no mercado.
Máquinas de venda reversa	Máquinas colocadas perto de máquinas que originalmente vendem latas de alumínio, que recebem e acomodam os frascos usados. Algumas destas máquinas podem moer o plástico recebido.
Legislação de depósito de contêiner	Os consumidores pagam para depositar o seu resíduo em contêineres no momento da compra. Os plásticos retornados possuem uma alta pureza, facilitando a triagem e reciclagem.

Afora estas formas de coleta de material, existe ainda, principalmente em países subdesenvolvidos, uma classe de pessoas que coletam material reciclável, visitando periodicamente os locais onde o consumidor deposita seus resíduos, como empresas e escolas, para coletar o material com potencial poder de revenda antes dos caminhões de coleta seletiva. Normalmente este trabalho é realizado com o auxílio de um “carrinho de mão” ou uma “carroça”, onde se colocam os materiais que poderão ser revendidos a uma recicladora. Estabelecimentos comerciais e escolas, grandes geradores de papel, e proximidades de bares são os locais mais visados por este tipo de coletadores.

Dependendo da localização da moradia da população, o custo de transporte do resíduo sólido pode ser alto entre a residência e o local de disposição ou reciclagem. A maior segregação do material na fonte geradora faz com que a quantidade de energia utilizada para reciclar e as emissões produzidas sejam menores durante a manufatura dos reciclados (APME, 2000). Uma comunicação à população sobre as rotinas de coleta e o tipo de

programa, bem como os dias de coleta e os tipos de materiais aceitáveis se faz necessária para que a reciclagem se torne parte da vida do morador (EHRIG, 1992).

Curitiba foi a primeira cidade no Brasil a implantar o programa de coleta seletiva em 1989. Instalou diferentes programas, dentre os quais destacam-se "Lixo que não é lixo" que coleta os resíduos periodicamente nas residências e "Compra do Lixo", onde a população carente troca seus resíduos por alimentos. Este último originou o chamado "Câmbio verde", que troca resíduos recicláveis por hortigranjeiros em locais como supermercados (COLAVITTI, 2003).

São Paulo instituiu a primeira Cooperativa de Catadores de Papel, Papelão e Materiais Reaproveitáveis do Brasil, a COOPAMARE (LORENZETTI, 2004).

Existem também vários grupos voltados à reciclagem no estado do Rio Grande do Sul, como a Federação das Associações de Recicladores do Rio Grande do Sul (FARRGS), Associação do Aterro da Zona Norte, formada por trabalhadores que catavam resíduos no mesmo local, etc. (LORENZETTI, 2004).

Na cidade de Porto Alegre foi criado o "Programa de Coleta Seletiva", onde a prefeitura realiza uma coleta semanal em cada bairro, dos materiais potencialmente recicláveis por meio de caminhões. São coletados aproximadamente 60 t de material por dia (DMLU, 2002). Este material é enviado para um dos nove centros de triagem da cidade, onde são separados por tipo e vendidos.

2.1.3 Unidades de triagem de material

Unidades de triagem são locais para onde o material oriundo da coleta seletiva é enviado. O material é descarregado dos caminhões e colocado dentro destes centros, onde os sacos de lixo são abertos e ocorre a separação manual com ou sem auxílio de esteiras rolantes, do material com valor de revenda para as recicladoras.

A taxa de material que pode ser separada por cada operador nos locais de triagem é estimada entre 50 e 200 kg.h⁻¹, de acordo com o número de operações de seleção que são requeridas. No caso de garrafas, onde o operador deve separar somente um tipo específico, este valor pode chegar a 150 kg.h⁻¹. A precisão da separação varia entre 80 e 95 % devido ao fator do erro humano, que como em qualquer processo de seleção manual, depende da característica do material, do tipo de tarefa, treinamento do separador, taxa de seleção, tipo de seleção, condições da matéria-prima, cansaço, etc. (BRANDRUP et al., 1996).

Existem hoje na cidade de Porto Alegre, nove Unidades de Triagem de resíduo seco, onde trabalham mais de 450 recicladores, recebendo, classificando e comercializando em média 60 t de material entregues diariamente pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU, 2002). Estas unidades são localizadas estrategicamente pela cidade de acordo com a disposição dos resíduos. São elas: Santíssima Trindade, Campo da Tuca, Cavahada, Restinga, Ilha Grande dos Marinheiros, Wenceslau Fontoura, Aterro da Zona Norte, Vila Pinto (DMLU, 2002). Em 2002 foi instalada mais uma unidade chamada Unidade de

Triagem do Hospital São Pedro. Em janeiro de 2004 foi inaugurada a primeira Central Regional de Comercialização de Materiais Recicláveis de Porto Alegre, e existe ainda a Unidade de Triagem e Compostagem da Lomba do Pinheiro (NOTÍCIAS SOBRE PORTO ALEGRE, 2004).

O material que não é vendido pelas unidades de triagem de Porto Alegre é descartado em um contêiner de rejeitos que, uma vez ao dia, é esvaziado e levado por um caminhão ao aterro sanitário mais próximo.

2.1.4 Disposição final

Existem três formas de dispor os resíduos sólidos gerados: a) a céu aberto, que são os chamados lixões, sem nenhum controle ambiental; b) aterros controlados, que possuem suas emissões monitoradas e; c) aterros sanitários, onde todas as variáveis que possam interferir no meio ambiente são controladas e remediadas.

A quantidade crescente de resíduo que é enviada para aterros sanitários, o fechamento de muitos destes locais, a falta de reposição dos mesmos são fatores que agravam o problema da disposição do resíduo sólido (EHRIG, 1992). O aterro aumenta o risco de lixiviação e impregnação do solo por materiais perigosos à saúde e pode ter como consequência a contaminação das águas subterrâneas (SHENT et al., 1999; PINTO et al., 1999). Outras desvantagens como grande ocupação de área para estabelecimento do aterro sanitário, emissões gasosas perigosas à saúde, odores, fogo e risco de explosão, problemas de vermes, roedores, abutres, doenças patogênicas e problemas estéticos, também são fatores importantes que devem ser considerados (MUSTAFA, 1993).

Nem todos os locais podem servir como aterro sanitário para os resíduos sólidos gerados pela população. Áreas de proteção aquática, de proteção de águas subterrâneas e arredores de águas costeiras, áreas de segurança para fornecimento futuro de água, área de proteção de termas medicinais, residenciais e industriais, centro de cidades e áreas de desenvolvimento misto, planícies inundáveis e áreas sujeitas a terremotos, avalanches, deslizamentos e semelhantes não podem ser utilizadas para aterro pois sua contaminação pode representar perigo à saúde da população. A área utilizada para aterro deve ser monitorada para acompanhar os possíveis efeitos no ambiente ao seu redor (BRANDRUP et al., 1996).

A necessidade de redução do RSU destinado aos aterros sanitários faz com que a reciclagem dos materiais que podem ser transformados novamente em produtos com valor agregado seja importante do ponto de vista ambiental e também econômico, tendo em vista os altos custos de manutenção dos aterros sanitários para dispor o resíduo sólido.

2.1.5 Reciclagem

Um dos conceitos para reciclagem é que ela representa a revalorização dos descartes domésticos e industriais, mediante uma série de operações que permitem que os materiais sejam reaproveitados como matéria-prima para outros produtos (PLASTIVIDA, 2002).

Outro conceito é que a reciclagem é um método para produzir materiais com baixo custo e reduzir seu impacto ambiental (MARTINS; DE PAOLI, 2001).

Quando os preços dos produtos fabricados a partir de matéria-prima virgem começaram a aumentar, e juntamente com eles o custo de disposição do resíduo, ocorreu a expansão dos processos de reciclagem de resíduos (DI VITA, 1997).

O material reciclado deve atender aos mesmos requerimentos impostos pelo mercado no que diz respeito aos produtos comercializados. Estes requerimentos são controle de qualidade, padrões, especificações, confiabilidade de produção e adequação à legislação vigente (BRANDRUP et al., 1996).

A reciclagem gera várias vantagens econômicas, ambientais, ecológicas e sociais. Dentre as vantagens econômicas, destaca-se a diminuição do consumo de energia (elétrica e combustível) na planta de processamento se comparada com a fabricação de materiais a partir de resina virgem. As vantagens ambientais da reciclagem são basicamente a diminuição dos resíduos dispostos em aterro e conseqüentemente a diminuição de área necessária construção de novos aterros sanitários. As vantagens ecológicas são a conservação dos recursos naturais como água, árvores, minerais e outros, a diminuição da quantidade de água necessária para a preparação de materiais reciclados em relação à quantidade para produção de materiais virgens (a preparação de vidro e metal reciclado consome até 44 % menos água que no processo com material virgem), e também o fato de que os materiais compostáveis podem ser utilizados como fertilizantes aumentando os nutrientes do solo (incluindo traços de minerais), controlando a erosão, aumentando a umidade do solo e melhorando sua massa específica. Dentre as vantagens sociais, destacam-se a geração de renda para os trabalhadores não qualificados dos países em desenvolvimento, propagando o conceito “Lixo é Dinheiro” onde os cidadãos percebem o resíduo sólido como material reciclável e a recuperação da matéria orgânica do resíduo sólido para preparação de comida para animais (KASEVA; GUPTA, 1996).

Um fator importante para que medidas sejam tomadas no que diz respeito à reciclagem de materiais é a difícil decomposição dos mesmos no meio ambiente. A Tabela 2.3 mostra a economia com a reciclagem e o tempo de decomposição de alguns materiais no meio ambiente.

Tabela 2.3: Tempo necessário para a decomposição de alguns materiais (LIXO, 2002)

<i>Material reciclado</i>	<i>Preservação</i>	<i>Decomposição</i>
1000 kg de papel	Corte de 20 árvores	1 a 3 meses
1000 kg de plástico	Extração de milhares de litros de petróleo	200 a 450 anos
1000 kg de alumínio	Extração de 5000 kg de minério	100 a 500 anos
1000 kg de vidro	Extração de 1300 kg de areia	4000 anos

A norma ASTM D-5033-90 divide basicamente os processos de reciclagem em 4 tipos que são listados abaixo (EHRIG, 1992; FINK, M.; FINK, J., 1997; GOMES; THAI, 1998):

- Reciclagem primária: onde a reciclagem mecânica transforma os resíduos em um produto com características iguais à do material original.
- Reciclagem secundária: onde a reciclagem mecânica transforma os resíduos em produtos com características de qualidade que são secundárias às do material original ou são utilizados em aplicações inovadoras.
- Reciclagem terciária: os resíduos são utilizados para a geração de matéria-prima em processos que recuperam combustíveis e produtos químicos.
- Reciclagem quaternária: os resíduos são utilizados para recuperação de energia.

A reciclagem é uma das formas de minimizar o impacto ambiental gerado pela disposição de resíduos que podem ser revalorizados em aterros sanitários ou outros locais de disposição. Com este processo também reduz-se o consumo de matéria-prima e, na maioria dos casos, reduz-se a geração de efluente líquido se comparado com o processamento da matéria-prima virgem.

2.2 Panorama da reciclagem de plásticos

Neste item são avaliados o panorama da reciclagem no mundo, no Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul.

2.2.1 Reciclagem de plásticos no mundo

O objetivo deste item da revisão bibliográfica é mostrar e comparar os números a respeito da reciclagem em todo o mundo. Em 1998, as vendas globais de plásticos atingiram aproximadamente 135 milhões de toneladas (SHEN et al., 2001). A Tabela 2.4 apresenta a quantidade de plásticos em peso que compunha o RSU de vários países, entre os anos de 1985 e 1990, e as formas de disposição nos mesmos (MUSTAFA, 1993).

No início dos anos 90, os países mais desenvolvidos começaram a adotar a reciclagem como parte integrante da vida da comunidade e, a partir deste ponto, a quantidade de material reciclado aumenta ano a ano. A Tabela 2.5 mostra que a reciclagem de plásticos pós-consumo nos anos 90 estava apenas no início.

Tabela 2.4: Total em peso de plásticos no RSU e forma de disposição (MUSTAFA, 1993)

<i>Países</i>	<i>Total de plásticos no RSU (%)</i>	<i>Incineração (%)</i>	<i>Aterro sanitário (%)</i>	<i>Outros (reciclagem, compostagem, etc) (%)</i>
Alemanha	5,5	35	60	5
Áustria	7,0	15	85	–
Bélgica	6,0 – 7,0	40	60	Mínimo
Canadá (Quebec)	7,0 – 10,0	10	90	0
Dinamarca	4,5 – 6,0	45	35	Mínimo
Espanha	6,0	8	80	12
Estados Unidos	9,0	14	73	13
Finlândia	5,0	<10	>90	–
França	5,5	35	55	10
Grécia	7,0	0	100	0
Holanda	6,5	35	60	5
Itália	6,0 – 10,0	10 – 15	75 – 80	10
Japão	6,0	68	29	3
Luxemburgo	6,0	75	25	0
Reino Unido	6,0	5	95	0
Suécia	6,0 – 10,0	50	35	15
Suíça	6,0 – 10,0	75 – 85	15 – 25	0

Tabela 2.5: Percentagem de plásticos pós-consumo reciclados em alguns países (MUSTAFA, 1993)

<i>País</i>	<i>Reciclagem de Plásticos do RSU (% do total)</i>	<i>Ano</i>
Alemanha	1,0 – 2,0	1988
Canadá	1,0	1990
Estados Unidos	2,0	1989
França	<1,0	1988
Itália	< 0,5%	1990
Reino Unido	1,0 – 2,0	1988

Não existe uma uniformidade mundial sobre como a reciclagem de plásticos deve ser conduzida. Algumas das medidas adotadas pela população ao redor do mundo para minimizar o descarte de resíduos em aterro são mostradas a seguir.

Europa

A Europa reciclou em 1997 aproximadamente 7 % de plásticos em peso que seriam destinados aos aterros (SIKKA, 2000).

A Alemanha começou a realizar esforços para a reciclagem de plásticos na década de 90, para integrar o conceito de desenvolvimento sustentável nos vários campos da economia.

Como resultado disto, a Alemanha se tornou o maior mercado de reciclagem plásticos na Europa, seguida pela Espanha (PATEL et al., 2000). Os moradores da Alemanha devem separar os vários tipos de materiais tais como metais, plásticos, papel, vidro, do material compostável (EHRIG, 1992). A coleta e triagem de material é realizada pela *Duales System Deutschland* (DSD) (PATEL et al., 2000). Em 1997, a Alemanha reciclou aproximadamente 69 % dos resíduos plásticos. Em 2000, o país reciclava 13 vezes mais material de RSU que a França, pois coletava embalagens, potes, filmes e também plásticos misturados, enquanto a França só coletava garrafas de plástico (SOFRES, 2000).

Vários foram os motivos que levaram a Alemanha a implantar a reciclagem mecânica de plásticos. O primeiro deles é o fato de que as embalagens encontradas no Resíduo Sólido Urbano constituíam 30 % do total do peso (aproximadamente 50 % em volume) e porque a capacidade de utilizar os aterros (ainda a principal forma de disposição no país) estava diminuindo rapidamente. O segundo motivo foi a utilização dos terrenos e a pressão da população para que a capacidade de aterramento não fosse expandida. O terceiro motivo foi que a partir do ano 2005, todo o RSU (plásticos inclusive) deverá ser incinerado sendo aterrados somente os resíduos permitidos pela ordem federal (*TA Siedlungsabfall*). Devido ao fato da população ser resistente à incineração, a reciclagem de embalagens foi incentivada (PATEL et al., 2000). A reciclagem mecânica do resíduo pós-consumo em 2000 estava entre 14 a 16 %. Aproximadamente 69 % do plástico coletado pela DSD era valorizado através da triagem e 31 % era rejeitado e enviado para plantas de incineração ou aterro sanitário. Do total reciclado mecanicamente, 9 % era aglutinado, regranulado e exportado para outros países (PATEL et al., 2000).

No ano de 1997, a Holanda reciclou 12 % em peso de seus resíduos plásticos enquanto a França reciclou apenas 7 % (SOFRES, 2000). A produção de resíduo sólidos urbanos na França é de 365 kg por ano por habitante. A incineração está tomando o lugar do aterramento, devido à necessidade de diminuição dos resíduos e à oportunidade de recuperar energia (WENISCH et al., 2004).

Em Glasgow, Escócia, foi implantado um programa em aproximadamente 50 locais públicos onde os materiais eram separados por tipo em centros comerciais, supermercados, áreas residenciais, estacionamentos, etc., muitos destes localizados perto de centros de reciclagem existentes. O esquema foi originalmente desenvolvido para a reciclagem de todos os tipos plásticos, porém, logo após foi modificado para somente coletar garrafas plásticas devido ao alto nível de contaminação dos outros materiais plásticos e conseqüentemente um baixo preço de mercado para este produto (MCDONALD; BALL, 1998).

Em 1999, Portugal reciclava energeticamente plásticos com uma composição média no RSU de 68 % de PE, 16 % de PP e 16 % de PS, garantindo uma produção de aproximadamente 30 % de aromáticos e uma capacidade calorífica de 45 MJ.kg⁻¹ (PINTO et al., 1999).

Na Inglaterra, a média de aumento de produção de RSU foi de 3% ao ano até 2000 e em 2001/2002 esta taxa foi de 2,4%. A produção de 2001 totalizou 28,8 milhões de toneladas de

RSU (TONGLET et al., 2004). No ano de 2000, a meta era de reciclar 25 % em peso de todo o RSU e realizar a recuperação de energia em 40 % do resíduo gerado até o ano de 2005 (SMITH et al., 1999; WILLIAMS, E.; WILLIAMS, P., 1997). Uma taxa de 7 libras foi introduzida para cada tonelada de material destinada ao aterro sanitário (WILLIAMS, E.; WILLIAMS, P., 1997). O Reino Unido reciclou em 1998, 7 % de todo o resíduo plástico consumido no país (SOFRES, 2000). Segundo Ehrig (1992), dados da British Plastics Federation mostravam que os filmes de polietileno eram os materiais mais reciclados no Reino Unido, aproximadamente 60.000 t/ano, provenientes principalmente de filmes pós-comerciais e filmes utilizados na agricultura (EHRIG, 1992). Em 1999, os plásticos correspondiam a uma parcela de 8 a 11 % do total do RSU da Inglaterra em peso, com garrafas plásticas (90 % fabricadas em PET, PVC e PEAD) totalizando 2 % do total. Na Inglaterra a coleta seletiva de materiais junto às residências era realizada de 3 formas (SMITH et al., 1999):

- a) com caixas de 25 a 60 L para materiais recicláveis secos, isto faz com que a inspeção do resíduo gerado seja facilitada e o funcionário avise ao dono da residência se a separação está sendo feita corretamente ou não.
- b) em sacos de lixo transparentes, onde os coletadores podem inspecionar a maneira como a coleta foi realizada, porém os sacos acabam se tornando outro elemento no RSU.
- c) Lixeiras com rodas (240 L) que permitem um grande acúmulo de materiais, reduzindo assim a frequência da coleta. Porém este método inviabiliza a inspeção dos coletadores e pode não ser apropriado para algumas residências.

A Suíça desenvolveu uma tecnologia para produzir um tipo de plástico resistente e a prova d'água, porém solúvel. A Itália propôs que as embalagens plásticas se tornassem degradáveis, como a embalagem plástica para 6 latas de bebidas que apresentam os anéis produzidos com plásticos foto-degradáveis (SPAACK, 1988).

Ásia

Atualmente, o principal método de reciclagem de resíduos no Japão é a incineração. Neste país os resíduos urbanos são divididos em incineráveis e não incineráveis.

A produção de RSU chegou a 50 milhões de toneladas em 2000 e 75% deste total foi incinerado a uma temperatura de 1400°C, gerando 6 toneladas de resíduos para aterro controlado (SAKAI; HIRAOKA, 2000). Segundo Ehrig (1992), isto se deve basicamente à não disponibilidade de área para construção de aterros sanitários. Nos anos 90, aproximadamente 70 % de todo plástico gerado no país era incinerado em 1900 incineradores (EHRIG, 1992). A reciclagem de plásticos é muito focada industrialmente, contudo, quando se trata de reciclagem de plásticos pós-consumo, quase não existem recicladoras. Em 1982 existiam 25 municipalidades que reciclavam plásticos e no ano de 1987 somente 3. O Japão reciclou mecanicamente em 1997 aproximadamente 12 % de plásticos em peso (SIKKA, 2000).

O RSU na Índia possuía em 2000 um quarto de seu peso em plásticos. A taxa de reciclagem deste resíduo era uma das maiores do mundo (aproximadamente 60 % do peso total). Em

1995, o Ato de Controle de Lixo Não Biodegradável HP, introduzido na província de Himachal Pradesh enfatizava a proibição de descarte de materiais plásticos em locais públicos e estabelecia que este material deveria ser depositado em receptáculos apropriados para materiais não-biodegradáveis. Em 1997, o estado de Haryana estabeleceu uma taxa para o resíduo não biodegradável como a de Himachal Pradesh (SIKKA, 2000).

A China durante o período de 1949 e 1976 (Dinastia Mao), possuía uma rotina de reciclagem como parte da sua vida. Senhor Qu, fundador da Agência de Proteção Ambiental da China afirmou que, com as reformas sociais e econômicas de seu país nos anos 80, os governos começaram a ignorar a reciclagem. Com o crescimento rápido da cidade, o papel de coletadores porta-a-porta e compradores de resíduos tornou-se importante para uma diminuição rápida do Resíduo Sólido Municipal (LI, 2002). A China reciclou mecanicamente em 1997 aproximadamente 10 % em peso de plásticos de seu RSU (SIKKA, 2000).

De acordo com as estatísticas da Taiwan Environmental Protection Agency (EPA), o total de resíduo sólido diariamente produzido em Taiwan em 1984 foi de 11.726 toneladas enquanto no ano de 1994, este foi de 23.268 toneladas, quase o dobro em 10 anos. No mesmo período, a geração per capita de RSU saltou de 0,67 para 1,10 kg.dia⁻¹. Na coleta seletiva realizada, papel era a maior parcela encontrada em peso constituindo 66 % (13.600 t) do total, seguido pelas latas de metal (14,2%), garrafas de PET (13,2 %), materiais plásticos diversos (2,9 %) e outros materiais recicláveis (3,7 %). Foi observado também que com o passar dos anos, o entusiasmo para a reciclagem diminuiu drasticamente, o que pode ser visto pelo número inicial de 250 pontos de coleta em 1992 (677,8 t.mês⁻¹) para 150 em 1995 (251,1 t.mês⁻¹) (LEU; LIN, 1998).

África

A África do Sul reciclou mecanicamente em 1997 aproximadamente 16 % de plásticos em peso do RSU (SIKKA, 2000).

Gana obteve em 1999 uma taxa de geração de resíduo por habitante entre 0,5 e 0,7 kg.dia⁻¹ dependendo da estação e da classe social. A disposição em lixões era largamente utilizada no país, o que pode ser danoso principalmente quando se trata de resíduo médico ou industrial, gerando mau cheiro, fumaça e perigo de incêndios. A reciclagem praticada era basicamente de resíduo orgânico para alimentar animais (POST, 1999).

América do Norte

A disposição de resíduos tem se tornado problema em vários locais dos Estados Unidos. Desde 1960, a quantidade de resíduos descartada cresceu 1 % ao ano. Mais de 75 % deste resíduo era composto por materiais potencialmente recicláveis (TILMAN; SANDHU, 1998). Os americanos consumiram aproximadamente 1~1,20 kg de plásticos por dia no ano de 1981 (MUSTAFA, 1993). Segundo COLAVITTI (2003), cada cidadão americano gera aproximadamente 45 kg de plástico por ano. Em 1988, a geração de plásticos pela indústria

e residências alcançou 13,2 milhões de toneladas, compondo 8 % em peso do RSU e aproximadamente 21 % em volume (SHENT et al., 1999). A composição em peso de plásticos no ano de 1994 representava 7 % do RSU e a produção global aumentava 4 % anualmente (MILENE et al., 1999). No ano de 1996, cerca de 80 % de todo o resíduo plástico ia para aterro sanitário, 10 % era reciclado e 10 % era incinerado (WILLIAMS, E.; WILLIAMS, P., 1997). O país reciclou mecanicamente em 1997 aproximadamente 12 % de plásticos em peso (SIKKA, 2000). O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos desenvolveu uma goma plástica que pode ser degradada por microorganismos quando o material é enterrado (SPAACK, 1988).

Estudos de caracterização do RSU em 1990 nos Estados Unidos estimaram que aproximadamente 40 % em peso do material descartado era papel, 18 % de material derivado de jardins e entre 7 e 9 % para os seguintes materiais, metal, plástico, vidro e alimentos. Porém, o volume ocupado por estes materiais era bem diferente. Papel era o maior contribuinte com 34 % do volume gerado, plástico ocupava um volume entre 7 e 12 %, podendo atingir até 20 % em volume, metais ocupavam um volume de 12 %, resíduos de jardim 10 %, alimentos e vidros entre 2 a 3 % e outros materiais ocupavam um volume de 18 % (EHRIG, 1992).

O RSU produzido anualmente nos Estados Unidos diminuiu de 211,5 milhões para 209,7 milhões de toneladas em 1996. As taxas de compostagem e reciclagem estavam aumentando e a disposição em aterro sanitário diminuindo (de 60,9 % para 55 % em 1996). Ocorreu um acréscimo também na reciclagem energética do resíduo devido à alta eficiência das novas plantas. A reciclagem e compostagem do RSU cresceu de 21 % em 1993 para 27 % em 1996. A composição de plásticos presentes no RSU cresceu de 11,5 % em 1996 para 12,3 % em 1996. A combustão do RSU cresceu de 15,5 % em 1994 para 17,2 % em 1996. Em 2000, aproximadamente 78 % da população nos Estados Unidos tinha acesso a programas de reciclagem. (SUBRAMANIAM, 2000).

Programas para reduzir o volume do plástico no resíduo sólido municipal também foram implementados nos Estados Unidos, como o “step-on-it” que sugere que as embalagens sejam amassadas (pisadas) para diminuir seu volume antes do descarte (EHRIG, 1992).

A composição de plásticos no RSU dos Estados Unidos em 1993 podia ser dividida como mostra a Tabela 2.6 abaixo.

Tabela 2.6: Composição em peso dos plásticos presentes no RSU dos EUA (%) (MUSTAFA, 1993)

<i>Forma encontrada do plástico</i>	<i>Peso total (1000 t)</i>	<i>RSU (%)</i>
Artigos duráveis	6.260	35,86
Artigos não duráveis	5.350	30,64
Sacos, sacolas e filmes	3.220	18,44
Garrafas de refrigerante, leite e embalagens	1.350	7,73
Outras embalagens	1.280	7,33
<i>Total</i>	<i>17.460</i>	<i>100,00</i>

Em Quebec, Canadá, foi realizado um programa de triagem do material que era descartado em grandes redes de supermercado. Todo o material que seria mandado para aterro sanitário foi dividido em 8 categorias: madeira, papelão, matéria orgânica, plástico, vidro, metal, carnes e outros (NORRIE et al., 1997). Ainda no Canadá, foi desenvolvida uma sacola de compras que se despedaça em pequenas partículas quando exposta à luz ultravioleta. Justificam a utilização desta tecnologia ao invés da utilização de plástico foto-degradável, afirmando que os resíduos plásticos são expostos à luz solar somente quando estão sobre o solo, não se decompondo em aterros ou em oceanos e rios (SPAACK, 1988).

Oceania

Em 1996, a reciclagem de plásticos do RSU na Austrália representava somente 0,4 % em peso do plástico consumido nas residências. Aproximadamente 60.000 t eram recicladas no país, representando um total de 6 % do material produzido anualmente. Este número poderia ser muito menor, pois muitos produtos plásticos eram importados pelo país (FLETCHER; MACKAY, 1996). Em 1998, 500.000 t de materiais plásticos foram dispostas e somente 2.000 t foram recicladas (GOMES; THAI, 1998).

Vários objetivos foram traçados por várias instituições no mundo. A Commonwealth Environmental Protection Agency (CEPA) desejava reduzir o RSU em 50 % e a Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC) desejavam reduzir o montante de resíduos de embalagens em 50 % em peso. Paralelo a isto, a KEMCOR, maior produtora de PEAD para garrafas de leite, estabeleceu o objetivo de reduzir a quantidade de PEAD enviado para aterro sanitário em 50 % (FLETCHER; MACKAY, 1996).

A reciclagem é uma tendência mundial, principalmente em países com pequena área para disposição de resíduos, como na Europa. Reciclar, além de ajudar ao meio ambiente, ainda pode se tornar uma fonte de renda para populações excluídas economicamente. A reciclagem deve ser instalada em todas as comunidades do mundo. Trabalhar a conscientização da população para este problema também é um fator importante, uma vez que a separação do RSU deve começar na residência de cada um.

2.2.2 Reciclagem de plásticos no Brasil

Em 2000, a taxa anual de crescimento na geração de RSU per capita no Brasil estava entre 2 a 3 %, muito superior à média mundial de 1 % (SUAREZ; MANO, 2000). Colavitti (2003) afirma que 76% de todo o RSU gerado era destinado para aterramento em lixões no país.

O Brasil teve contabilizado no ano de 2000, 5475 municípios com serviço de limpeza urbana, deste total apenas 551 controlavam a destinação final de seus resíduos. A região sul e sudeste respondem por 426 municípios deste total. No mesmo período, o país possuía 8.381 distritos com serviço de limpeza urbana ou coleta de resíduo (IBGE, 2000).

Em 2002, composição média em peso de material potencialmente reciclável recolhido pela coleta seletiva e enviado para as unidades de reciclagem do país era 39 % de papel e papelão, 15 % de plásticos, 15 % de vidro, 2 % de tetrapack, 15 % de metais, 0,7 % de alumínio, 3 % diversos (como baterias, pilhas, borracha, madeira, livros, etc.) e 10,3 % de rejeitos não comercializáveis (CEMPRE, 2002).

O consumo de plástico no Brasil vem aumentando no decorrer dos anos e de acordo com estimativas chegou a 10 kg por habitante por ano. Comparando-se com a Europa este valor é pequeno, já que cada habitante utiliza em média 40 kg de plástico em um ano. No Brasil aproximadamente 24 % dos plásticos produzidos eram destinados a embalagens que depois de utilizadas foram descartadas no RSU (SÃO PAULO, 1997b). Leve, resistente e prático, o plástico rígido é o material que compõe cerca de 60 % em peso das embalagens plásticas no Brasil, como garrafas de refrigerantes, recipientes para produtos de limpeza e higiene e potes de alimentos. São considerados também matéria-prima básica de bombonas, fibras têxteis, tubos e conexões, calçados, eletrodomésticos, além de baldes, utensílios domésticos e outros produtos. O Brasil consumiu em 2002, 1,8 milhões de toneladas de plástico, das quais 350 mil toneladas foram despejadas nos aterros sanitários e lixões. Este material poderia ser reprocessado, gerando novos artefatos plásticos e energia. Foram produzidas 255 mil toneladas de plástico PET em 2000, deste total, 26 % foi reciclada, totalizando 67 mil toneladas. As garrafas recicladas eram provenientes de coleta através de coletadores de material reciclável, fábricas e da coleta seletiva operada pelos municípios (CEMPRE, 2002).

Em 2000, aproximadamente 15 % dos plásticos rígidos e filmes descartados (cerca de 200 mil toneladas) eram reciclados no Brasil. Deste total, 60 % eram provenientes de resíduos industriais e o restante de plásticos pós-consumo (CEMPRE 2002; MARTINS; DE PAOLI, 2001). Em 2002, não existiam dados específicos para o plástico filme, que correspondia em média a 29 % do total de plásticos separados pelas cidades que fazem coleta seletiva, representando entre 5 % e 10 % do peso do lixo, conforme a região. Cerca de 80 % dos sacos e embalagens de plástico filme foram produzidas com PE e 20 % com PP, PVC e outras resinas. Algumas películas misturam dois ou mais polímeros, podendo criar problemas na hora de seu reaproveitamento industrial, como trincas e perda de resistência mecânica do produto final reciclado (CEMPRE, 2002). No ano de 2004, a ABIQUIM informou que a reciclagem de plásticos pós-consumo no país atingiu uma média de 17,5% em peso, um valor bem razoável, se levarmos em conta que na Europa este valor é de 22%. A seguir são apresentados na Tabela 2.7 os percentuais de plásticos pós-consumo reciclados nos 6 maiores estados recicladores do país, o percentual de composição de cada um deles no estado correspondente, bem como os valores médios da reciclagem no país (CEMPRE, 2004).

Tabela 2.7: Reciclagem de plásticos pós-consumo em alguns estados do Brasil (CEMPRE, 2004)

Estado	Total reciclado do RSU (%)	PET (%)	PEAD (%)	PEBD (%)	PP (%)	PVC (%)	PS (%)	Outros (%)
RS	27,6	21,1	7,0	27,0	16,0	7,0	4,0	18,0
CE	21,3	0,1	23,4	10,5	59,9	4,9	0,6	0,6
RJ	18,6	44,4	12	20,9	6,8	10,1	1,8	4,0
SP	15,8	7,3	13,3	32,2	13,6	12,2	16,4	5,1
BA	9,4	2,1	17,6	69,9	7,4	-	3,0	-
MG	5,6	14,3	15,2	46,3	13,5	0,2	7,9	2,6
BRASIL	17,5	14,9	12,6	30,9	15,3	9,2	9,9	7,2

Segundo dados do Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR), o Brasil poderia economizar até 10 bilhões de dólares ao ano se reciclasse seus resíduos domiciliares. A reciclagem de plásticos economiza até 50% de energia elétrica, e ainda pode-se utilizar sacolas de supermercado e sacos de lixo para fabricação de artefatos de plásticos (COLAVITTI, 2003).

2.2.3 Reciclagem de plásticos no Estado do Rio Grande do Sul

No ano de 2000, existiam no estado 459 municípios favorecidos com coleta de lixo de um total de 497 municípios (92,35 %). Deste total, 68 municípios controlam sua destinação final de resíduos. O estado possuía 751 distritos com serviço de limpeza urbana ou coleta de lixo (8,96 % do total do país) e coletava diariamente 7.468,3 t de lixo (3,26 % do total do país). A disposição dos resíduos no ano de 2000 no estado é mostrada na Tabela 2.8 (IBGE, 2000).

Tabela 2.8: Meios de disposição de resíduos no Rio Grande do Sul no ano de 2000 (IBGE, 2000).

<i>Tipo de Disposição</i>	<i>Rio Grande do Sul</i>	<i>Brasil</i>	<i>% do total Nacional</i>
Vazadouro a céu aberto (lixão)	247	5.993	4,12
Vazadouro em áreas alagadiças	5	63	7,93
Aterro controlado	398	1.868	37,36
Aterro sanitário	237	1.452	16,32
Aterro para resíduos especiais	51	810	6,30
Usinas de compostagem	86	260	33,07
Usinas de reciclagem	256	596	42,95
Incineradores	68	325	20,92
<i>Total</i>	<i>1.416</i>	<i>11.367</i>	<i>12,45</i>

Segundo dados do IBGE (2000), Porto Alegre controlava a destinação de seus resíduos gerados através da coleta de lixo 3 vezes por semana. Na região da grande Porto Alegre, 28

aterros eram encontrados, dos quais apenas 15 eram controlados. A quantidade disposta deste resíduo no estado é mostrada na Tabela 2.9 abaixo.

Tabela 2.9: Quantidade coletada e enviada para disposição final no Rio Grande do Sul diariamente em 2000 (IBGE, 2000)

<i>Tipo de Disposição</i>	<i>Rio Grande do Sul (t)</i>	<i>% destinado</i>
Vazadouro a céu aberto (lixão)	1.146,90	15,36
Vazadouro em áreas alagadiças	20,00	0,27
Aterro controlado	2.048,60	27,43
Aterro sanitário	2.864,20	38,35
Estação de compostagem	126,90	1,69
Estação de triagem	697,20	9,34
Incineração	15,90	0,21
Locais não fixos	33,15	0,45
Outra	515,10	6,90
<i>Total</i>	<i>7.468,30</i>	<i>100</i>

O custo da coleta seletiva no ano de 1999 em Porto Alegre foi de 43,2 dólares por tonelada e 98 % da população era atendida pelo programa na cidade. A região metropolitana gerou por dia 1600 t de resíduo, sendo 900 t de resíduo domiciliar. Do resíduo domiciliar, 300 t eram do chamado "lixo seco", que são os materiais potencialmente recicláveis coletados separadamente do resíduo domiciliar comum e enviado para as unidades de triagem. Plásticos representavam 11 % do resíduo domiciliar e 22,4 % do lixo seco. Em 1999, foram separadas e comercializadas cerca de 1447 t de plástico, o equivalente a 4 % do total de plástico gerado no RSU. Em 2000 foram criados 28 PEVs (Programas de Entrega Voluntária) em diversos bairros de Porto Alegre para o recebimento dos materiais potencialmente recicláveis (CEMPRE, 2002).

Já no ano de 2002 observou-se um aumento significativo de quase 50 % no custo da coleta, chegando a 66,1 dólares por tonelada. A quantidade coletada de material anualmente praticamente dobrou aumentando para 2100 t, abrangendo 100 % da população. Em 2003 foi reciclado 23,6 % de todo o plástico do RSU ($67.000 \text{ t.ano}^{-1}$), maior média nacional (CEMPRE, 2003).

As unidades de triagem de Porto Alegre recebem os caminhões que realizaram a coleta seletiva da cidade (aproximadamente 60 t diárias que correspondem a 7 % do RSU total). Materiais que possuem valor comercial (papelão, alguns tipos de embalagens plásticas, latas, etc.) são separados pelos integrantes das unidades de coleta seletiva e os materiais sem finalidade comercial específica são destinados a um contêiner de rejeitos que é então levado ao aterro sanitário.

A reciclagem de plástico rendeu R\$ 18 milhões ao Rio Grande do Sul, segundo a Gazeta Mercantil de 31/10/2000. No estado são recicladas 66.000 t anuais de plástico, sendo 36 mil

de aparas limpas, descartadas pela própria indústria e as outras 30.000 t representam 15 % de todo o plástico pós-consumo que iria para aterros sanitários e lixões. Cerca de 63 empresas prosperam nos negócios com esse tipo de resíduo (LIXO, 2002).

Segundo o CEMPRE (2004), o Rio Grande do Sul é o estado que mais recicla plásticos no país. A coleta seletiva existe a mais de 10 anos, e também ocorreram melhorias e avanços no gerenciamento das unidades de triagem. Como a geração de resíduos ainda é muito grande, novas alternativas para a reciclagem dos plásticos se tornam importantes, pois existe muito material enviado para aterro sanitário que pode ser revalorizado.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica e Legislação

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura no que diz respeito aos conceitos básicos sobre reciclagem de plásticos, os principais componentes plásticos do resíduo sólido urbano e as principais etapas do processo de reciclagem mecânica e a legislação pertinente à reciclagem de plásticos.

3.1 Reciclagem de plásticos

O maior incentivo para a reciclagem de plástico aconteceu nos anos 70, quando ocorreu uma crise energética que resultou em falta de plásticos no mercado. Atualmente a reciclagem é incentivada pela crise de disposição final de resíduos (SPAACK, 1988).

Dentre os principais resíduos urbanos gerados, o plástico é um dos que apresenta o maior crescimento pois muitos materiais como vidro e metal foram substituídos por plásticos, diminuindo o peso das embalagens consideravelmente ou tornando-as mais resistentes. Se não houvesse esta substituição, o peso do RSU seria 4 vezes maior (CEMPRE, 2002; EULÁLIO et al., 2000; REID LEA, 1996).

Os plásticos podem ser divididos em termoplásticos e termofixos, conforme suas características de processamento. Termoplásticos são polímeros lineares ou pouco ramificados que quando aquecidos amolecem, são moldados ou formados sob pressão no estado plástico e solidificam quando resfriados mantendo a forma do molde. Uma vez que as propriedades físicas do material não se alteram, o processo é reversível e pode ser repetido. Estes ciclos de resfriamento e aquecimento podem eventualmente causar decomposição do polímero. Alguns exemplos são os PE, PP, PVC, etc. Termofixos são polímeros ramificados que formam cadeias tridimensionais através da reação de reticulação que podem ser amolecidos, moldados e endurecidos ou fixados quando aquecidos somente uma vez. São sólidos infundíveis que se decompõem quando aquecidos. O processo de endurecimento ou cura é uma reação de reticulação. Exemplos são polímeros fenólicos, epóxis e poliuretanos (EHRIG, 1992).

A vida útil das embalagens plásticas é baixa, aproximadamente 40 % dos produtos possuem vida útil menor que 1 mês (EULÁLIO et al., 2000). Segundo Brandrup *et al.* (1996), o resíduo municipal corresponde a 55 % do resíduo sólido urbano e é composto na sua grande maioria por embalagens de alimentos, normalmente de filmes de PP ou PE e PS e garrafas. O autor também mostra que os plásticos utilizados em carros ou equipamentos elétricos são dispostos após 5 ou 10 anos de uso e os plásticos de agricultura são utilizados por um período de 1 a 3 anos.

Considerado um dos vilões do meio ambiente, o plástico age como impermeabilizador entre o solo e o lixo orgânico, impedindo a decomposição natural dos detritos e contribuindo para a formação de gases tóxicos que exalam mau cheiro. É muito resistente e pela dificuldade de sua decomposição, permanece em meio ao lixo alterando as condições sanitárias de lixões e aterros (RECICLOTECA, 2002).

Os plásticos descartados são divididos em pós-industriais e pós-consumo. O primeiro é proveniente principalmente de refugos de processos de produção e transformação, aparas, rebarbas, etc., e o segundo são materiais descartados pelos consumidores, sendo a maioria proveniente de embalagens (PLASTIVIDA, 2002). Os plásticos pós-consumo normalmente são compostos por sacolas, filmes, garrafas de refrigerante, de detergentes diversos, embalagens, frascos pequenos e sujos, requerendo mais energia para coletar, separar e reciclar (BRANDRUP et al., 1996; APME, 2000), pois contém contaminantes como papel, vedações de metal, resíduos de alimentos, minerais, vidros e outros (BRANDRUP et al., 1996).

A qualidade do material reciclado depende da fonte de separação: o plástico que provém da coleta seletiva é mais limpo do que o separado nas usinas ou em lixões. Devido a alta contaminação das embalagens, o plástico reciclado não é utilizado para embalagens que entram em contato direto com alimentos ou remédios, nem brinquedos ou peças de segurança que exijam determinadas especificações técnicas (CEMPRE, 2002).

Resíduos plásticos devem ser reciclados separadamente sempre que possível, uma vez que o custo para fazer um produto de alta-qualidade e com alto valor agregado será muito menor (BRANDRUP et al., 1996).

Muitas outras medidas devem ser tomadas para que a reciclagem seja otimizada, como melhor identificação das embalagens por parte dos fabricantes, melhor separação do material nas residências, treinamento adequado do pessoal encarregado de separação, novos processos, etc.

Os plásticos podem ser reciclados de três formas: reciclagem mecânica, reciclagem para obtenção de matéria-prima e reciclagem energética.

A reciclagem mecânica significa a reutilização do material plástico para o mesmo propósito ou para um propósito diferente. Este processo consiste basicamente em refundir os plásticos, moldá-los e transformá-los novamente em um produto comercial através de processos como prensagem, moldagem ou injeção (BRANDRUP et al., 1996).

A reciclagem para obtenção de matéria-prima (também conhecida como reciclagem química ou avançada) serve para gerar monômeros, convertendo plásticos em novos produtos como petróleo, óleo cru sintético e óleo pesado. O plástico pós-consumo é reprocessado novamente na indústria através de processos como leito-fixo gaseificado com lignita, termólise dos plásticos em produtos petroquímicos, ou utilizado como agente redutor nos fornos, ou hidrogenação junto com óleo de resíduo de vácuo (BRANDRUP et al., 1996; SUBRAMANIAM, 2000). Este processo pode produzir óleo que posteriormente será refinado para produzir gasolina e querosene (MASUDA et al., 2001).

A reciclagem energética é uma alternativa para a diminuição do volume de resíduos sólidos, porém este processo acaba com a matéria orgânica e gera dióxido de carbono e água. Dependendo do processo de queima, a incineração pode gerar poluentes como hidrocarbonos leves, óxidos de enxofre e nitrogênio, poeira, dioxinas e outras toxinas, que possuem um impacto muito negativo no meio ambiente (PINTO et al., 1999). As cinzas resultantes deste processo podem conter ainda chumbo e cádmio (SHENT et al., 1999). Os produtos nocivos gerados devem ser reduzidos, o que significa que sistemas de controle de emissão de gases nocivos devem ser instalados nas plantas existentes, aumentando drasticamente seus custos operacionais (WILLIAMS, E.; WILLIAMS, P., 1997).

Os plásticos descartados no lixo são ótimos combustíveis e possuem praticamente o mesmo poder calorífico do óleo combustível e do gás natural (DMLU, 2002). O polietileno possui um valor médio de 18.700 BTUs por quilo, enquanto o lixo urbano como um todo tem poder combustível de 4.500 BTUs por quilo (CEMPRE, 2002). Nos anos 90, segundo vários estudos, a composição média do RSU era distribuída como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição percentual de polímeros no RSU

<i>Referências (Conteúdo de Plástico, %)</i>	<i>(MOOLGARD, 1995) Mundial</i>	<i>(BRANDRUP et al., 1996) Mundial</i>	<i>(BRANDRUP et al., 1996) EUA</i>	<i>(BRANDRUP et al., 1996) Europa 1992</i>
Poliiolefinas	65,0	70,0	88,0	-
PEAD	17,0	-	-	14,1
PEBD	31,0	-	-	19,3
PEBDL	-	-	-	4,6
PP	14,0	-	-	-
PS	10,0	9,0	-	7,7
PS Expandido	-	3,0	-	2,3
PET	5,0	-	-	-
PVC	-	-	-	22,0 *
Outros	5,0	7,0	-	-

* Este valor de consumo do PVC é significativo pois inclui bens de consumo duráveis como cabos, tubos, perfis, etc.

3.2 Principais tipos de plásticos encontrados no RSU

Os principais tipos de plásticos encontrados no RSU são polietileno de alta e baixa densidades, poli(tereftalato de etileno), polipropileno, poliestireno e poli(cloreto de vinila). A seguir são mostradas algumas características de cada um destes componentes, bem como suas utilizações mais comuns.

3.2.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

As principais propriedades do PEAD são baixa massa específica comparada com outros plásticos, grande rigidez e alongamento na ruptura, ótimas características elétricas e dielétricas, baixa absorção de água, alta resistência a produtos químicos, resistência ao meio ambiente. Copolímeros são mais resistentes que homopolímeros, apresentando melhor facilidade de processamento e trabalho (BRANDRUP et al., 1996).

Os principais usos do PEAD são filmes de embalagem, filmes para alta carga, filmes que encolhem, sacolas de transporte, filmes de agricultura e filmes finos. Não se degradam em aterros sanitários. São ecologicamente neutros na água subterrânea e não poluem o ar acima dos aterros sanitários (BRANDRUP et al., 1996).

3.2.2 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

O PEBD apresenta melhores propriedades de tenacidade e melhor comportamento de selagem em relação ao PEAD (BRANDRUP et al., 1996).

As principais utilidades do PEBD são sacos de lixo, sacolas de transporte, filmes para agricultura e construção, sacos de alta resistência, tubos, filmes esticáveis, etc. (BRANDRUP et al., 1996).

3.2.3 Poli(tereftalato de etileno) (PET)

As principais propriedades do PET são a economia de até 93 % de peso se comparado com embalagens de vidro, o fato de ser altamente impermeável a gases (principalmente O₂ e CO₂), excelente transparência e brilho, propriedades mecânicas altas, resistência à quebra de uma altura de 2,50 metros, resistência ao choque e dureza, boa resistência química, resistência com alimentos e prontamente reciclável (BRANDRUP et al., 1996).

O PET é um dos produtos mais versáteis do mercado polimérico. Suas aplicações variam desde fibras, filmes até embalagens para refrigerante. O principal contaminante do PET reciclado de garrafas de refrigerantes são os adesivos (cola) usados como rótulo e base (BRANDRUP et al., 1996).

3.2.4 Polipropileno (PP)

Polipropileno é dividido em 3 categorias com grande diferença nas propriedades dos materiais. São elas homopolímero isotático, copolímeros em bloco e copolímeros aleatórios. Homopolímeros isotáticos são mais rígidos e duros, moderadamente transparentes. Copolímeros em blocos possuem dureza inferior à do homopolímero, aparência leitosa e opaca e aspereza em baixas temperaturas. Copolímeros aleatórios possuem transparência muito boa e boa resistência ao impacto em baixa temperatura dependendo do comonômero contido (BRANDRUP et al., 1996).

O polipropileno é utilizado para tampas de frascos de xampu, garrafas d'água, potes de margarina ou sorvete, utensílios domésticos entre outros (BRANDRUP et al., 1996).

3.2.5 Poliestireno (PS)

O poliestireno (PS) pode ser dividido em 3 tipos; poliestireno padrão, poliestireno resistente ao impacto e poliestireno expandido (BRANDRUP et al., 1996; EHRIG, 1992).

O PS padrão é caracterizado por sua alta rigidez, alto brilho e excelente transparência. Uma característica negativa é a sua baixa resistência ao impacto (BRANDRUP et al., 1996).

O PS resistente ao impacto é resultante da adição de uma borracha, normalmente polibutadieno ao monômero estireno durante a polimerização para aumentar a resistência ao impacto em relação ao poliestireno padrão. Contudo o novo material se torna menos rígido e sua transparência e brilho diminuem (BRANDRUP et al., 1996).

O PS expandido (comercialmente conhecido como Isopor[®]) é produzido através da expansão das partículas do PS. Este material pode ser utilizado na fabricação de materiais de isolamento para a indústria de construção e para embalagens (BRANDRUP et al., 1996). É mais fácil de coletar que materiais de serviço de alimentos. Este tipo de material pode ser contaminado com itens não recicláveis como papel e outros tipos de plásticos, porém estes contaminantes em pequenas quantidades são facilmente removíveis (EHRIG, 1992).

O PS pode ser utilizado na fabricação de frascos de iogurte, bandejas de carne, potes de flores, caixas de CD, Fitas cassete de vídeo e de áudio, tampas na indústria automotiva, placas de isolamento, etc. (BRANDRUP et al., 1996).

3.2.6 Poli(cloreto de vinila) (PVC)

O principal componente do PVC é o cloro que representa 57 % do peso do polímero puro e sem aditivos. O conteúdo de cloro varia conforme a aplicação do composto polimérico, sendo de 53 % para produtos rígidos (93 % de resina PVC), 34 % em filmes (60 % de resina PVC), 25 % em cabos (44 % de resina PVC) e até 14 % para aplicações de solo. Pode conter estabilizantes do tipo chumbo, bário, zinco, cádmio, cálcio e estanho (BERNARD; JÜRGEN, 2000).

As principais características do PVC são apresentação de barreira para gases, baixo peso para embalagens de alimentos e embalagens higiênicas, proteção contra o fogo e isolamento das instalações elétricas e materiais de construção, resistência química e mecânica para usos em tubulações de água e disposição (vida útil de 100 anos ou mais), estabilidade de cor (janelas expostas às intempéries por mais de 40 anos sem manutenção), pureza do produto e baixa migração do cloro do PVC para embalagens de contato direto com alimentos e produtos médicos, processamento simples e longevidade de artefatos automobilísticos (BRANDRUP et al., 1996).

O PVC pode ser dividido em PVC Rígido e PVC Plastificado. O PVC Rígido é muito utilizado na fabricação de tubulações, perfis como de janelas, filmes, folhas, garrafas enquanto o PVC Plastificado é utilizado para filmes, folhas, roupas de couro, revestimentos, mangueiras, perfis, cabos entre outros (BRANDRUP et al., 1996).

3.2.7 Outros

Outros plásticos ainda são encontrados no resíduo sólido urbano como Terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), Poli(tereftalato de butadieno) (PBT), Nylon, Poliacetatos, Policarbonatos (PC), etc. (EHRIG, 1992).

Para que a reciclagem de plásticos produza materiais com propriedades razoáveis, o ideal é que os resíduos plásticos sejam segregados o mais eficientemente possível. Para a avaliação das quantidades existentes nos resíduos urbanos gerados, é necessária a correta identificação dos mesmos. Um breve resumo das formas de separação de plásticos é mostrado no próximo item.

3.2.8 Separação dos plásticos

No caso de plásticos, algumas técnicas podem ser utilizadas para separá-los de acordo com suas características físico-químicas. A separação assume que os componentes diferem entre si em pelo menos uma propriedade, como por exemplo massa específica, magnetismo, propriedades elétricas, propriedades ópticas, etc. (BRANDRUP et al., 1996). A seguir são descritos alguns exemplos destas técnicas.

A separação por massa específica é um dos métodos mais simples para separar poliolefinas de outros materiais plásticos. Primeiramente pode ser realizada em água, onde PP, PE e PS Expandido irão flutuar por possuírem massa específica menor que a da água e os outros materiais decantarão. Além da água também é possível utilizar sais para se obter massas específicas maiores e álcool para massas específicas menores que 1 g.cm^{-3} . Uma outra forma de separação de plásticos é o processo de flutuação e decantação em hidrociclones, porém como as massas específicas de alguns plásticos são muito similares (mistura PE/PP ou PET/PVC), a separação se torna difícil de ser realizada (BRANDRUP et al., 1996).

Algumas plantas de reciclagem na Grã-Bretanha utilizam ar para separação dos componentes leves, tais como plásticos, papel e tecidos dos materiais mais pesados, como vidro e metais. Este processo é muito eficiente no caso de reciclagem de garrafas para remover os rótulos e outros filmes plásticos (BRANDRUP et al., 1996).

Uma outra técnica utilizada é a separação eletrostática que se baseia em como os materiais plásticos desenvolvem cargas estáticas. Se os flocos forem carregados, a diferença entre suas cargas pode ser utilizada para ser separado em placas carregadas. O sucesso desta técnica depende principalmente de um pré-tratamento efetivo da superfície do floco para atingir a carga desejada. Este processo é muito efetivo para separar PET e PVC (BRANDRUP et al., 1996).

Separação por raio-X também é utilizada para a separação de garrafas (PVC e PET). Os raios-X detectam a presença de cloro no PVC e o equipamento retira as garrafas feitas deste material da corrente (BRANDRUP et al., 1996).

Polímeros com diferentes pontos de plastificação também podem ser separados, atingindo a temperatura de plastificação de um dos componentes. O material entra em contato em um tambor rotativo projetado para coletar o material fundido e rejeitar o material não fundido. Este método é comum para separação de poliolefinas e novos avanços foram feitos para materiais como o PVC. Se o PET estiver contaminado com PVC, o PVC degradará nas altas temperaturas de processamento do PET e formará coque. O PET não fundirá nas temperaturas de processamento PVC e será filtrado.

Existe ainda outro método de separação como o comportamento durante a queima dos plásticos, onde cada material possui uma característica diferenciada como coloração da chama resultante de queima, odores exalados, comportamento do material durante a queima, etc.

Em locais onde a separação é realizada por pessoas sem muita especialização, o material é separado segundo suas aplicações ou mercado, como por exemplo o fato de garrafas de refrigerante serem de PET, PS Expandido utilizado para embalagens de eletrodomésticos, sacos de leite e iogurte de PE, sacos de bolachas normalmente de PP, entre outros produtos. Brilho e ruído de amassamento também são características para ajudar na separação dos plásticos misturados.

3.2.9 Propriedades térmicas dos plásticos

Para garantir um processamento satisfatório é necessário que as temperaturas de plastificação e as temperaturas de degradação de cada um dos componentes plásticos sejam avaliadas no momento da escolha das temperaturas de processamento da mistura polimérica. A Tabela 3.2 lista os principais plásticos que formam o RSU segundo Mustafa (1993) mostrando suas temperaturas de plastificação retiradas do Handbook of Plastics, Elastomers and Composites (HARPER, 1992).

As temperaturas onde os polímeros começam a se degradar também são importantes para a avaliação das temperaturas de processamento da mistura polimérica. O PVC libera pequenas quantidades de HCl em temperaturas de processamento acima de 160°C e não pode ser processado sem a adição de estabilizadores. O PVC começa eliminando hidrogênio e cloro dos átomos de carbono adjacentes, formando o HCl em um lado e ligações duplas no outro. A reação é acelerada automaticamente pelo HCl gerado. O polieno resultante é uma estrutura

básica mais estável e começa a se ligar cada vez mais formando mais HCl. A Figura 3. que contém a temperatura de estabilidade térmica dos vários tipos de plásticos (BRANDRUP et al., 1996).

Tabela 3.2: Temperaturas de plastificação dos polímeros (HARPER, 1992)

<i>Plástico</i>	<i>Ponto de Plastificação (°C)</i>
PEBD	98 – 124
PEAD	130 – 137
PP	160 – 175
PS	74 – 105
Poliamida 6	210 – 220
Poliamida 6,6	255 - 265
Polimetil metacrilato	85 – 105
PVC	75 – 105
PC	150
PET	245 – 265

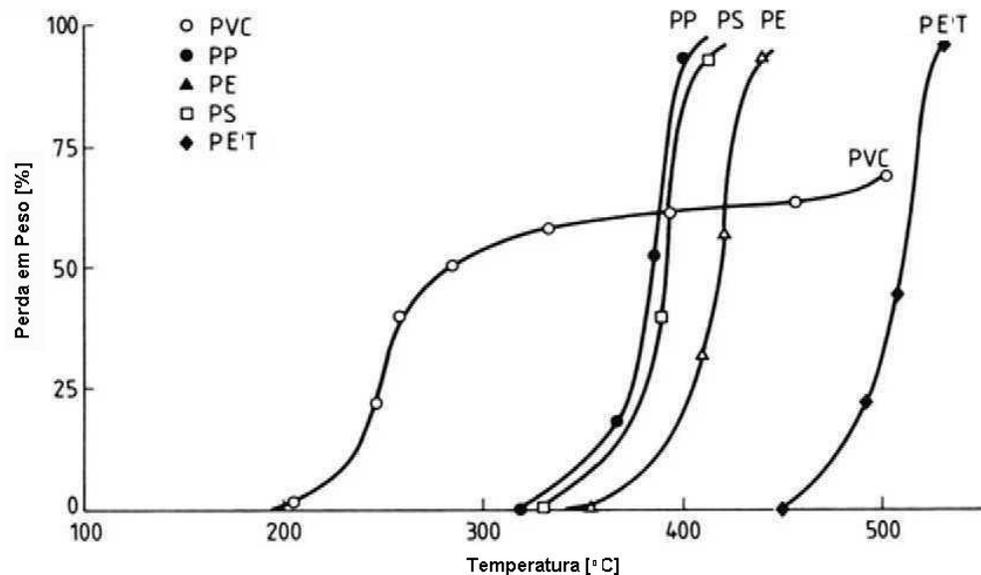


Figura 3.1: Estabilidade térmica dos vários tipos de plásticos (BRANDRUP et al., 1996)

As temperaturas de processamento dos polímeros isolados podem possuir uma diferença de até 100°C. Por exemplo, o PET possui temperaturas altas de processamento, entre 260 e 300°C, porém longo tempo de residência nesta temperatura não é apropriado para poliolefinas e PVC. O processamento em temperaturas entre 170 e 230°C é mais apropriado para as poliolefinas e PVC, porém faz com que o PET se comporte como carga, podendo piorar as propriedades do material misturado reciclado (BRANDRUP et al., 1996).

3.3 Reciclagem de Plásticos Misturados

A reciclagem de plásticos misturados é adotada quando a separação dos mesmos não é viável.

Plásticos misturados normalmente são compostos por itens de plásticos não reconhecíveis, pequenas quantidades de polímeros específicos, embalagens multi-camadas, embalagens compostas por plásticos e outros materiais, itens muito contaminados, altamente pigmentados ou com carga adicionada, polímeros com diferentes pesos moleculares, resíduos de operações de reciclagem, etc., (BISIO; XANTHOS, 1994). Além de impurezas como alimentos, metais, papel, alumínio e vidro, um outro fator importante é o fato de que o material plástico, assim como a matéria orgânica, se modifica com a passagem do tempo e com a exposição ao calor gerado por processos de degradação fotoquímica, oxidativa, mecânica e térmica. (BRANDRUP et al., 1996).

As maiores restrições no aumento da reciclagem são o desbalanço entre o resíduo coletado e potencial para utilização no mercado final de plásticos e a presença de grandes quantidades de material plástico misturado. Este último gera dificuldades e consumo de energia para separação dos materiais em frações homogêneas e a limpeza sobrecarrega o ganho ambiental da reciclagem mecânica (APME, 2000).

Nem sempre é possível se obter um material viável a partir de uma mistura aleatória de plásticos misturados. A mistura reduz a qualidade dos produtos reciclados, primeiramente devido à incompatibilidade termodinâmica entre materiais e em segundo devido à incompatibilidade de aplicação, como por exemplo, várias faixas de processamento (BRANDRUP et al., 1996).

A idéia por trás da reciclagem de plásticos misturados, como os encontrados no lixo doméstico, é combater os custos de aterramento de resíduos com uma tecnologia simples, robusta e viável para produzir materiais comercializáveis (BRANDRUP et al., 1996).

O tamanho e o comportamento termodinâmico das diferentes macromoléculas mostram que a maioria das combinações de polímeros são incompatíveis. Na prática observa-se que as misturas possuem melhor resistência mecânica quando suas partículas estão entre 0,5 e 1 μm . Para gerar um conjunto de propriedades razoáveis, cuidadosa seleção dos componentes, processamento e morfologia da mistura são necessários. As propriedades da maioria destas formulações não podem ser atingidas sem a adição de um compatibilizante específico para atingir o balanço desejado. As propriedades dos reciclados derivados dessa corrente será completamente dependente da composição de cada material e será influenciada por qualquer separação que ocorra antes do reprocessamento. Aspectos como grau de mistura, temperatura, tempo de residência em temperaturas elevadas e histórico de resfriamento na reciclagem de polímeros misturados são tão importantes como no processamento de polímeros virgens (BRANDRUP et al., 1996). Uma das formas de se aprimorar as propriedades da mistura plástica é moldar itens com ampla faixa de especificação em seções espessas para substituir aplicações de madeira ou concreto (SPAACK, 1988). O grau de miscibilidade dos polímeros depende das forças coesivas entre os materiais. O primeiro requerimento para que ocorra a miscibilidade mútua dos polímeros é que suas propriedades

sejam similares. A melhora da miscibilidade entre polímeros pode ser feita de duas formas, a primeira delas utilizando componentes miscíveis e compatibilizantes e a segunda delas, segregação preventiva por diferentes métodos como reticulação e co-cristalização (MUSTAFA, 1993). O processamento de plásticos misturados não é uma técnica simples, a maioria dos materiais plásticos são incompatíveis entre si como mostra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Compatibilidade dos diferentes termoplásticos (BRANDRUP et al., 1996)
(1=Extremamente compatível 6= Extremamente Incompatível)

	Poliestireno padrão	Poliestireno resistente ao impacto	Copolímero de Acrilonitrila-Estireno	ABS	Poliamida	Policarbonato	Polimetil Metacrilato	Poliformaldeído	Poli(cloreto de vinila)	Polipropileno	Poliétileno de baixa densidade	Poliétileno de alta densidade
Poliestireno padrão												
Poliestireno resistente ao impacto	1											
Copolímero de Acrilonitrila-Estireno	6	6										
ABS	6	6	1									
Poliamida	5	4	6	6								
Policarbonato	6	5	2	2	6							
Polimetil Metacrilato	4	4	1	1	6	1						
Poliformaldeído	6	6	6	5	6	6	5					
Poli(cloreto de vinila)	6	6	2	3	6	5	1	6				
Polipropileno	6	6	6	6	6	6	6	6	6			
Poliétileno de baixa densidade	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Poliétileno de alta densidade	6	6	6	6	6	6	5	6	6	6	1	

Compatibilização é uma cooperação entre as superfícies outrora incompatíveis a nível molecular ou entre domínios com polímeros de fases separadas. Existem vários métodos para compatibilizar as interfaces dos polímeros, entre eles formação de pontes de ligação, auxiliar de dispersão, promotores de revestimento, agente de acoplamento, químico organofuncional e funcional, modificador de superfície, tensores e agente de umidicimento químicos dupla-face e tratamentos de superfície, como o tratamento corona e de chama, modificação de plasma ou enxertamento de superfície e ainda tratamento por radiação (MUSTAFA, 1993; CZVIKOVSKY;HARGITAI, 1999).

As condições de operação devem levar em conta a composição de resíduos. A temperatura de processamento será determinada para obter um comportamento reológico adequado do fundido e de forma que evite a degradação excessiva de qualquer dos componentes da mistura. O processamento direto de uma mistura de polímeros para a produção de artigos

finais por moldagem pode produzir uma estrutura grosseiramente sintetizada, onde as partículas dos diferentes polímeros aparentam estar levemente fundidas em conjunto e por isso existe uma pequena interação entre as interfaces dos componentes da mistura. As propriedades do material obtido neste caso não são tão boas se comparadas às propriedades dos polímeros não misturados (BRANDRUP et al., 1996).

Mesmo que não sejam recicláveis com alta pureza como os metais e vidros em altas temperaturas, os plásticos podem ser reprocessados termicamente, sob condições de processamento similares aquelas do material virgem. Para processar plásticos misturados e sujos, um número de processos foram desenvolvidos e processos convencionais foram modificados. Estas tecnologias são divididas basicamente em processo extrusão, moldagem por injeção e moldagem por transferência e moldagem sinterizada. De acordo com o material e o processo empregado, produtos com grande superfície, grande espessura ou ainda produtos de um plástico determinado podem ser produzidos. Os reciclados podem ser pintados, laminados, pigmentados ou revestidos para melhorar a qualidade da superfície e sua aparência. (BRANDRUP et al., 1996). Existem vários métodos para melhorar a interação de uma mistura polimérica. Na Tabela 3.4 são mostrados os métodos que influenciam na miscibilidade de 2 polímeros.

Tabela 3.4: Métodos que influenciam na miscibilidade de 2 polímeros (BRANDRUP et al., 1996)

<i>Método</i>	<i>Efeito</i>
Adição de polímeros de baixo peso molecular	Melhora a miscibilidade de uma mistura mas afeta negativamente suas propriedades mecânicas, pois estes reagem quimicamente com os polímeros.
Efeito da temperatura	Existe uma faixa de composição a uma dada temperatura onde as 2 misturas são miscíveis.
Ligação química	Quando 2 polímeros se unem para formar ligações químicas, uma fase homogênea é formada.
Formação de redes de interpenetração	As moléculas de dois ou mais polímeros incompatíveis são ligadas de forma a interpenetrar uma na outra. Isto impede a separação de fases.
Ligação	Método de vulcanização onde os componentes são misturados em altas temperaturas.
Transesterificação e transamidificação	Pode ser feita por meio de catalisador. Processo utilizado para converter poliéster ou poliamidas incompatíveis em uma mistura homogênea por transesterificação ou transamidificação.
Conversão de dois polímeros incompatíveis em polímeros mutuamente miscíveis por modificação química mínima	Adaptação dos parâmetros de solubilidade de ambos os polímeros. O método é muito caro e não é viável na prática.
Adição de iomonômero	Incorporação de interações polares pela adição de monômeros com ligações incorporadas covalentes e polares. Normalmente utilizado para a mistura poliéster/poliamida.

<i>Método</i>	<i>Efeito</i>
Adição de cargas	Adição de cargas que reajam quimicamente com um ou ambos os componentes da mistura.
Formação de sal	Normalmente ocorre entre 2 polímeros incompatíveis. Isto é causado pela sulfonação/carbonificação com adição subsequente de estearato de zinco.
Processo de reação	Os diferentes polímeros são ativados quimicamente através de enxerto nos grupos reativos. Um polímero reage com outro durante o processo de mistura. É um processo com baixo custo e muito utilizado.
Adição de compatibilizantes multi-propósito.	Agem como se dissolvessem a mistura formando uma só fase.

3.4 Reciclagem mecânica de plásticos

Na etapa de processamento, os seguintes métodos devem ser utilizados para o tratamento de resíduos: detecção de metais, redução de tamanho (compatibilização de filmes, fitas ou fibras, se necessário), armazenamento do material contaminado e cominuído, limpeza, separação de impurezas, secagem mecânica e térmica, estocagem e em alguns casos, plastificação e homogeneização, ou ainda degaseificação, mistura, filtração e granulação (BRANDRUP et al., 1996).

A reciclagem mecânica de plásticos possui várias vantagens se comparada a outros processos como disposição em aterro, reciclagem química ou energética. Uma das mais significativas é sobre a incineração no que diz respeito aos resíduos de PVC e de outros compostos clorados, estabilizadores metálicos e outros heteroátomos formados durante a queima de gases. Estes compostos são danosos ao meio ambiente, pois quando submetidos a aquecimento, liberam substâncias tóxicas, e o tratamento destas é muito caro, elevando mais ainda os custos de produção do material. O PS Expandido também é uma grande preocupação para disposição, pois é composto por apenas 2 % em peso de material e o restante do volume é ar (BRANDRUP et al., 1996). O outro motivo é que a quantidade de plástico enviada a aterros sanitários que poderiam ser transformados em produtos com valor agregado é grande e pode se tornar uma atividade lucrativa. .

Um exemplo das etapas de reciclagem mecânica de poliolefinas é mostrado Figura 3.2 a seguir.

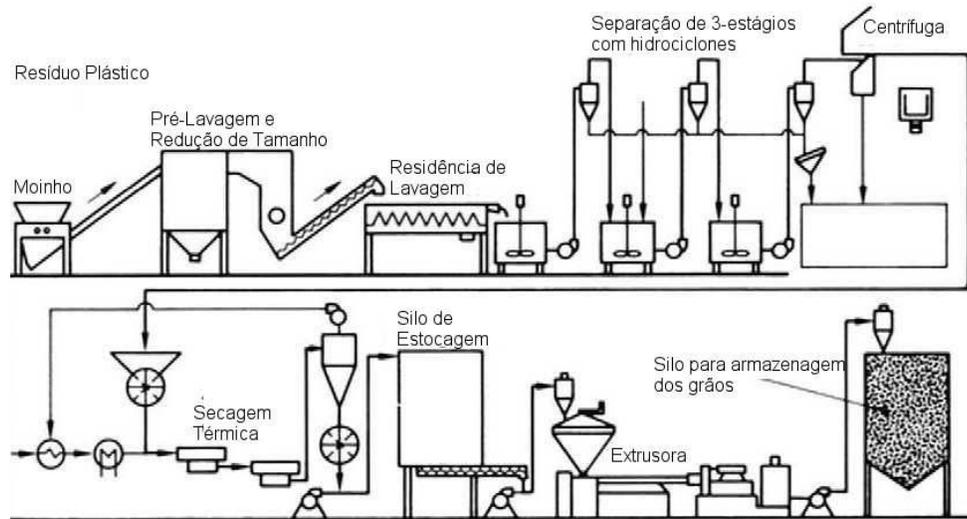


Figura 3.2: Reciclagem mecânica de poliolefinas (BRANDRUP et al., 1996)

A seguir são exemplificados os equipamentos básicos para estabelecer uma planta de reciclagem mecânica (MUSTAFA, 1993):

- Moinhos: para diminuir o material a um tamanho específico
- Separadores de metal e minerais: pode ser uma classificação com ar para remover metais, sujeiras e papel
- Pré-lavagem e granulação: para separar adesivos, rótulos de papel, etc.
- Segundo estágio de lavagem: pode ser feita à quente e com uma solução de detergente
- Moagem mecânica e remoção de sujeiras: os plásticos ficam no topo de uma peneira no tanque de lavagem e a sujeira passa por entre a peneira. A solução de lavagem é filtrada, lavada e sua lama disposta como resíduo. Depois o material lavado vai para um tanque de enxágüe, onde é bombeado para um hidrociclone.
- Separação em hidrociclones: Separa os materiais como PET de materiais como PE e PP.
- Secagem: as duas frações com material mais pesado que a água e mais leve são escorridas e secas com ar quente.
- Processamento com plastificação

Segundo Bisio e Xanthos (1994), processos mais refinados de reciclagem de plásticos misturados normalmente requerem 7 passos: a) cominuição úmida para redução do tamanho de partícula e limpeza de sujeiras e resíduos alimentícios; b) separação por flutuação, para reduzir metais e outras contaminações pesadas; c) secagem para redução dos contaminantes voláteis que podem causar poros e odores no produto final; d) fluxo em uma extrusora com filtro de fundido para remover partículas não fundidas até um número e tamanho não crítico; e) degasagem em uma zona de vácuo para redução de voláteis e odores; f) composição em vários estágios para uniformizar dispersões de polímeros e adição de compatibilizantes, agentes de reforço e aditivos; g) formação através de uma série de moldes para fabricar artefatos contínuos.

A seguir são especificadas as principais etapas para reciclagem mecânica de material plástico.

3.4.1 Moagem

O estágio de moagem deve ser realizado antes, durante ou depois da lavagem, dependendo de tecnologia utilizada para reciclar e/ou do tipo de objeto a ser reciclado. No caso de plásticos do RSU, a maneira mais eficiente é realizada durante a lavagem, pois produz uma limpeza melhor enquanto o material é cominuído (EULÁLIO et al., 2000).

Antes do processamento do material plástico, o material utilizado deve estar na forma de grãos ou pó, para alimentar os equipamentos de injeção, extrusão, sopro ou compressão (BRANDRUP et al., 1996). A fluabilidade do material na etapa de lavagem também depende do tamanho da partícula, quanto menor a partícula, maior a recuperação por flutuação do material na lavagem (MARTINS; DE PAOLI, 2001). Existem basicamente 4 tipos de equipamentos para diminuir o tamanho das partículas plásticas, que são mostrados na Tabela 3.5 (BRANDRUP et al., 1996).

Tabela 3.5: Equipamentos de redução de tamanho preliminar (BRANDRUP et al., 1996)

<i>Tipo de Máquina</i>	<i>Guilhotina</i>	<i>Corte</i>	<i>Cominuidor tipo parafuso</i>	<i>Moinhos</i>
Modo de operação	A faca deslizadora é pressionada contra a barra de corte	Faca operada mecanicamente ou hidraulicamente que corta contra uma faca fixa.	Um ou mais parafusos com dentes moedores cominuem o material entre a carcaça e os parafusos	Eixos de corte ou intermalhas que moem e separam o material entre os eixos e/ou contra uma barra de faca fixa.
Tipo e forma da matéria- prima.	Produtos rígidos, fardos, torrões, blocos, etc.	Folhas, perfis, extrusados	Produtos quebradiços, esmigalháveis com alto volume, como garrafas	Quase todos os produtos podem ser cortados

Um eletroímã deve ser colocado na entrada do moinho para proteger as lâminas rotatórias e garantir que a matéria-prima esteja o mais livre de metal possível (BRANDRUP et al., 1996).

Segundo Ehrig *et al.* (1992), o material plástico deve ser moído a fim de originar um floco com diâmetro entre 3,2 e 9,5 mm para que possam ser reprocessados na granuladora. Muitos resíduos contêm material estranho e podem ser processados melhor quando estão pulverizados (grãos entre 0,05 e 0,8 mm) (BRANDRUP et al., 1996).

3.4.2 Lavagem

O processo de lavagem é definido como a remoção da sujeira (sólida ou líquida) aderida ao material que será processado. Desta forma, a lavagem influencia na pureza do material que

será reprocessado. A lavagem pode ser esquematicamente dividida em 3 etapas (BRANDRUP et al., 1996):

- Amolecimento da sujeira: quanto maior o tempo de lavagem ou a circulação da água, mais fácil será a purificação do material.
- Liberação da impureza: nesta fase ocorre separação da sujeira das partículas plásticas por intensa circulação de água.
- Separação da impureza: nesta fase o material sedimentado rico em impurezas é retirado do processo.

O formato da partícula também influencia a recuperação. Partículas compridas e irregulares possuem maior fluotabilidade que partículas redondas e angulares, se ambas possuírem a mesma faixa de tamanho (SHEN et al., 2001).

Partículas estranhas, tais como sujeira e pigmentos se inserem na estrutura do plástico e normalmente não são removidas mecanicamente, assim a maioria dos materiais reciclados devem ser repigmentados. Desta forma pode-se dizer que, quanto mais limpo estiver o material, melhores serão suas propriedades ópticas. A pureza do material lavado normalmente gira em torno de 95,2 % para filmes, 99 % para frascos e garrafas, 88,6 % para plásticos misturados (BRANDRUP et al., 1996).

A lavagem de plásticos misturados do RSU através da separação por massa específica tipo flutuação-decantação, gera uma fração mais leve que a água, constituída basicamente por poliolefinas e uma fração mais pesada que a água, composta basicamente por PET, PVC e PS Rígido (BRANDRUP et al., 1996). Na fração superior, observa-se também a presença de plásticos expandidos. A Tabela 3.6 mostra a composição das frações resultantes do processo de lavagem por flutuação/decantação.

Tabela 3.6: Composição das frações da separação por flutuação/decantação de plásticos do RSU (BRANDRUP et al., 1996).

<i>Componente (% em peso)</i>	<i>Fração leve</i>		<i>Fração pesada</i>
PEAD	33,5	} 91,0	
PEBD	59,0		
PP	7,5	3,0	
PS		6,0	41,0
PVC			49,0
PET			4,0
Outros			6,0

A presença de uma grande quantidade de poliolefinas não garante a compatibilidade da fração leve (BRANDRUP et al., 1996).

Para a maioria dos processos de reciclagem, a etapa de lavagem é essencial. A separação por flutuação utilizando água é adequada para reduzir a contaminação do material, adicionando benefícios às propriedades do material reciclado (BRANDRUP et al., 1996). Contaminantes como rótulos não são removidos totalmente por este processo. Os finos de plásticos

resultantes da operação de redução de tamanho também passam pelas telas na lavagem do material, resultando em algumas perdas do material desejado (EHRIG, 1992).

Segundo Ehrig (1992), a lavagem de poliolefinas deve ser feita em três tanques de 1135 L, confeccionados em aço carbono. O primeiro tanque e o segundo tanque para lavagem com água e um terceiro tanque com adição de detergente. O material é alimentado no primeiro tanque através de um parafuso e possui um misturador de pás. A carga que normalmente é colocada no primeiro tanque é de 60 g.L^{-1} . Durante a lavagem, os flocos decantados são recirculados por uma bomba centrífuga. O processo possui um tempo de residência de lavagem de aproximadamente 10 minutos, temperatura de solução de 82°C , uma concentração de detergente de 5 % e um agitador de 0,03 KW (EHRIG, 1992).

A separação dos plásticos misturados depende muito das propriedades físicas dos materiais. Existem duas categorias de propriedade físicas, uma são as propriedades fixas, como a massa específica e a outra é composta pelas propriedades que podem ser modificadas, como a energia de superfície, tamanho da partícula, forma e rugosidade. Porém ainda assim é difícil separar PET e PVC, pois a diferença entre suas faixas de massa específica são mínimas. Diferentes aditivos em um mesmo tipo de plástico também podem causar modificações nas suas propriedades e a contaminação também pode influenciar adversamente na separação (SHENT et al., 1999).

Outros métodos para separação de plásticos com baixa densidade por diferença de densidade também são disponíveis, como a separação em meio de baixa massa específica, com a utilização de cortiça micronizada (com densidade entre 0,20 e $0,35 \text{ g.mL}^{-1}$). Pode-se obter massas específicas de mistura entre 0,97 e $0,71 \text{ g.mL}^{-1}$. Por exemplo, uma mistura de 40% de cortiça e 60% de água em volume pode atingir uma suspensão de massa específica de $0,74 \text{ g.cm}^{-3}$. Este método possui vantagens sobre os outros pois a cortiça micronizada é 100 % reciclável, é impermeável à água, mantém sua baixa densidade com o uso e possui baixo custo. Para conseguir meios com esta massa específica baixa normalmente são utilizados líquidos orgânicos, que são caros, voláteis e muitas vezes perigosos (hexano, etanol, metanol, benzeno, xileno, tolueno, gasóleo, gasolina, etc.) (FERRARA; MELOY, 1999).

3.4.3 Análise dos efluentes resultantes da lavagem

Os parâmetros analisados neste trabalho para caracterizar o efluente resultante da lavagem na reciclagem mecânica são os seguintes: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), surfactantes, nitrogênio total, coliformes fecais, condutividade elétrica, fósforo total, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis, pH e óleos e graxas. A seguir é apresentada uma pequena descrição de cada um deles.

DBO é um método para determinar quanto oxigênio é necessário para a biodegradação do efluente, água de processo, águas poluídas, entre outros (APHA et al., 1998). Esta análise é a mais utilizada para medir o conteúdo de poluentes orgânicos nas águas de superfícies e efluentes. Esta determinação envolve a medida do oxigênio dissolvido utilizado pelos microorganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica, para determinar o tamanho das instalações para tratamento do efluente, para medir a eficiência do tratamento de

efluentes utilizado e para determinar se o efluente está de acordo com a descarga permitida pelos órgãos regulamentadores (METCAL; EDDY, 1991). O processo é constituído por uma cultura de bactérias, basicamente saprófitas, colocadas em soluções diluídas de efluente, de forma que este contenha nutrientes e oxigênio suficientes para o período de incubação, no caso de 5 dias. O oxigênio dissolvido nas amostras é medido antes e depois da incubação e a DBO_5 é dada em $mg.L^{-1}$. (METCAL; EDDY, 1991).

DQO é definida como a quantidade de um oxidante específico (normalmente um íon dicromato $Cr_2O_7^{2-}$ que se reduz a Cr^{3+}) que reage com a amostra em condições controladas (APHA et al., 1998). Utilizada para medir o conteúdo de matéria orgânica do efluente, esta medida mostra o oxigênio equivalente da matéria orgânica que pode ser oxidado através da utilização de um agente oxidante químico forte. Este teste deve ser realizado em temperaturas altas e com catalisador (normalmente sulfato de prata) para ajudar na oxidação de alguns compostos orgânicos. O valor da DQO normalmente é superior ao da DBO pois mais compostos podem ser oxidados quimicamente do que bioquimicamente. Para vários tipos de efluentes é possível se estabelecer uma correlação entre DBO e DQO (METCAL; EDDY, 1991).

Surfactantes são compostos despejados juntamente com o efluente e que combinam em uma única molécula um grupo altamente hidrofílico com um grupo altamente hidrofóbico (APHA et al., 1998). São moléculas orgânicas grandes levemente solúveis em água que causam espumas nas plantas de tratamento de efluentes. Durante a aeração do efluente, estes componentes podem formar bolhas de ar e uma espuma muito estável. A determinação deste material é realizada pela medição da mudança de cor em uma solução padrão colorida de azul de metileno (METCAL; EDDY, 1991).

Nitrogênio é essencial para o crescimento protista e das plantas, também conhecido como nutriente e bioestimulante. Traços de outros componentes como ferro, também são necessários, mas não tão importantes. O nitrogênio é essencial na síntese da proteína, logo sua quantidade é requerida para avaliar a tratabilidade do efluente. A falta de nitrogênio requer a adição deste componente ao efluente (METCAL; EDDY, 1991).

Bactérias coliformes são organismos presentes na água que podem indicar a presença de organismos patogênicos causadores de doenças. São utilizadas como indicação de poluição por resíduos humanos, pois o corpo humano descarrega entre 100 e 400 bilhões de organismos coliformes por dia. Os coliformes fecais são um grupo de bactérias (*Escherichia coli* é a mais representativa), que podem produzir gases em temperaturas de incubação elevadas ($44,5 \pm 0,2^\circ C$ por 24 ± 2 horas) (METCAL; EDDY, 1991). A estimativa é dada em MPN (Most Probable Number) que dá uma aproximação do número de microorganismos deste tipo presentes na amostra em um volume específico (APHA et al., 1998).

Condutividade k , é a medida da habilidade de uma solução aquosa de conduzir a corrente elétrica. Esta habilidade depende da concentração total de íons, mobilidade e valência, bem como da temperatura da medição. Soluções com compostos inorgânicos na sua maioria são boas condutoras. Ao contrário, moléculas de compostos orgânicos que não se dissociam na solução aquosa apresentam baixa ou inexistente condutividade (APHA et al., 1998).

O fósforo também é essencial para o crescimento de algas e outros organismos biológicos. Devido ao fato de que pode ocorrer um crescimento de algas indesejado na superfície da água, existe muito interesse em se controlar a quantidade de componentes de fósforo nos efluentes domésticos e industriais que serão descarregados nos cursos naturais de água (METCAL; EDDY, 1991).

Sólidos suspensos ou dissolvidos podem afetar adversamente a qualidade da água em inúmeras formas. Sólidos suspensos são as partículas maiores que 2.0 μm que são retidas quando o efluente é filtrado. Águas contendo uma grande quantidade de sólidos suspensos podem estar esteticamente insatisfatórias para banhos (APHA et al., 1998).

Sólidos sedimentáveis são definidos como a quantidade de material que decanta em uma amostra após um período de tempo pré-determinado. Durante a coleta é necessário se retirar a amostra o mais homogênea possível, para que não ocorram erros grotescos nos resultados (APHA et al., 1998).

O pH mede a concentração de íons de hidrogênio que é importante para a existência da maioria da vida biológica. A faixa de variabilidade do pH é restrita, para que o tratamento do efluente possa ocorrer através de meios biológicos. Se o pH do efluente não for alterado antes de ser liberado no meio ambiente, podem ocorrer alterações nas concentrações de hidrogênio das águas naturais (METCAL; EDDY, 1991).

Óleos e graxas são o terceiro maior componente dos alimentos sendo compostos de álcool (ésteres) ou glicerol com ácidos graxos. São determinados pela extração com triclorotrifluoretano (METCAL; EDDY, 1991).

3.4.4 Secagem

A secagem de partículas plásticas pode ser realizada mecanicamente ou termicamente. O método mecânico normalmente é mais barato, mas normalmente não atinge o conteúdo mínimo de umidade residual tolerável. A maioria dos sistemas são compostos de 3 estágios e incluem a secagem térmica por último. A máxima umidade tolerável para o processamento de plásticos é 1 % em peso para PEAD, PEBD, PP, ABS e PS e para materiais higroscópicos como PET e PA é de 0,1 % em peso (BRANDRUP et al., 1996).

A secagem mecânica pode ser feita por centrífugas, que separam a umidade aderida ao material utilizando as forças da gravidade ou inércia. Partículas finas dispersas no líquido também são separadas. Existem ainda outros equipamentos para retirar a umidade do material como telas fluidizadas ou secadores de alta rotação (BRANDRUP et al., 1996).

A secagem térmica pode ser realizada através de 3 mecanismos de transporte disponíveis, condução térmica, convecção e radiação. A secagem térmica faz uso principalmente de uma corrente de ar quente direcionada aos grãos plásticos, aquecendo-os gradativamente por todos os lados sem superaquecê-los. A umidade evaporada dos grãos é transportada imediatamente com o ar. A maioria dos aparatos para secagem térmica nada mais são que sistemas de transporte pneumático aumentados, com a diferença que o ar quente é que transporta o

produto. Como o plástico moído possui um baixo tempo de residência no processo, a temperatura do ar quente pode superar a temperatura de plastificação do plástico sem danificá-lo. Para reduzir os custos de produção de ar quente, queimadores de óleo e gás podem ser utilizados. A umidade residual obtida por este processo é da faixa de 1 % em peso. Materiais higroscópios devem ser secos por um período superior ao normal, devido ao processo de plastificação lento do grão. O período de secagem pode variar de 2 a 6 horas (BRANDRUP et al., 1996).

Muitas vezes, resíduos plásticos que não são separados e limpos devido ao aspecto econômico em frações individuais devem ser secados antes de submetidos a reciclagem para produção de matéria-prima. Dependendo da qualidade requerida e da composição do material, isto pode ser feito por meio de extrusoras robustas com muitas zonas de volatilização ou por sistemas de aglomeração, no qual a umidade residual do material é reduzido, e sua massa específica aparente é aumentada (BRANDRUP et al., 1996).

3.4.5 Aglutinação

Aglutinador é um equipamento utilizado para aumentar a massa específica da mistura plástica para que essa possa ser alimentada nos equipamentos de plastificação. Composto geralmente por duas facas rotativas inseridas na parte inferior de uma câmara oval onde os plásticos são inseridos e agitados até que a massa comece a plastificar. Quando uma temperatura próxima da temperatura de amolecimento da maioria dos plásticos é atingida, água é injetada para resfriar o material repentinamente fazendo com que se aglutine e então a massa é movimentada até que nenhum vapor seja desenvolvido. A massa polimérica é retirada do aglutinador através de uma porta sobre a influência da força centrífuga e então o aglutinador é preenchido novamente com plásticos. A desvantagem do aglutinador é que o processo é em batelada, as navalhas estão sujeitas a processos de desgaste e o consumo de energia é alto (BRANDRUP et al., 1996; DMLU,2002). Na Figura 3.3 é mostrado um exemplo do sistema de aglomeração para fabricação de tijolos plásticos (BRANDRUP et al., 1996).

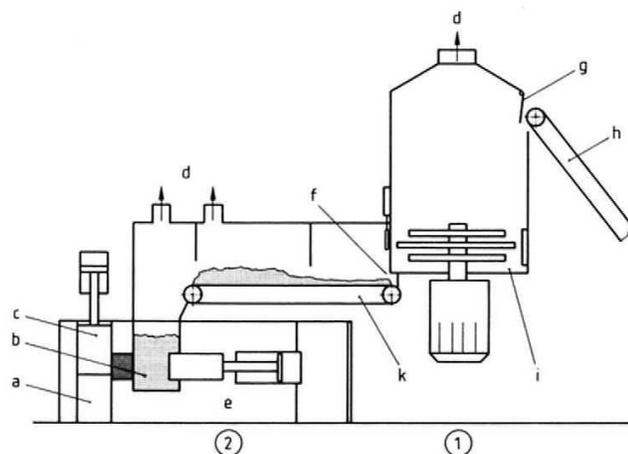


Figura 3.3: Aglutinador

O aglutinador é dividido em dois estágios. O primeiro deles, onde acontece a aglomeração contínua do material, composto pelas áreas: d) exaustor de ar, g) bandeja de alimentação, h) alimentador de material, i) aglutinador, f) bandeja de descarga e k) cinta para remoção do material. O segundo estágio, onde o material é moldado em tijolos, é composto pelas seguintes áreas: a) descarga e remoção do material, b) câmara de alimentação, c) haste de fechamento, d) exaustor de ar, e) unidade de compressão (BRANDRUP et al., 1996).

No processamento de resíduos plásticos, a aglomeração térmica é a mais utilizada na prática. O pré-requisito para aglomeração é separar antes de reduzir o tamanho das partículas plásticas, principalmente filmes. É entendido como um processo que somente afeta as partículas nas suas superfícies e as une por meio de processos de plastificação (BRANDRUP et al., 1996).

3.4.6 Processo de Prensagem

A prensagem normalmente é utilizada para manufatura de materiais com grande espessura que são tecnicamente inviáveis de serem produzidos por extrusão. O material plástico (pó ou granulado) é comprimido em um molde pré-aquecido como mostra a Figura 3.4 e então a pressão do molde é aumentada constantemente mesmo depois que o material está completamente plastificado, para que ocorra a degasagem do material (BRANDRUP et al., 1996).

Materiais parcialmente cristalinos passam por uma cristalização durante o período de resfriamento que pode afetar decisivamente as propriedades do material moldado devido à contração do material. Tempos de resfriamentos longos são necessários para prevenir tensões residuais que podem influenciar na aplicação final do material. Isto contudo aumenta o preço do produto semi acabado. Esta desvantagem pode ser parcialmente contrabalançada, contudo o material possuirá uma baixa orientação e uma tensão potencial menor, qualidade indispensável para muitas aplicações (BRANDRUP et al., 1996).

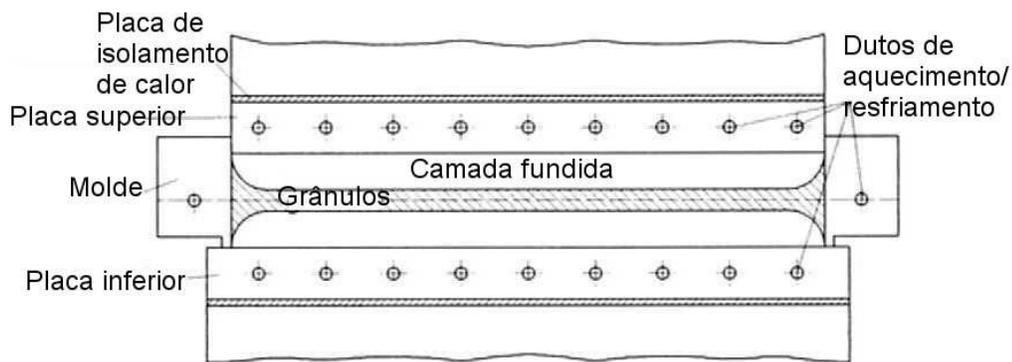


Figura 3.4: Moldagem por compressão para produção de placas feitas de materiais termoplásticos (BRANDRUP et al., 1996)

Para formar placas a partir de plásticos misturados, primeiramente é necessário se reduzir o tamanho das partículas de forma que o material possa ser facilmente plastificado. Este processo normalmente é realizado em duas etapas, na primeira os fardos são moídos em um

equipamento robusto o suficiente para lidar com os contaminantes. Este moinho normalmente é composto por duas lâminas girando em diferentes velocidades, permitindo que o corte seja realizado. Em plantas onde se deseja processar filmes e fardos de fibras, a utilização de guilhotina também se faz importante. Neste processo o tamanho final da partícula é de um palmo de comprimento. A separação de metais deve ser realizada nesta fase para não danificar os equipamentos seguintes de processamento (BRANDRUP et al., 1996).

No processamento por compressão observa-se que resfriamento lento no centro dos artigos grandes nos quais as partículas já estão solidificadas podem resultar em empenamento. Altas concentrações de poros perto do centro de peças com grande seção transversal podem ocorrer. Os poros também podem ser causados pela gaseificação da umidade, contaminantes ou polímeros degradados. Estes também influenciam nas propriedades e performance dos materiais (positivamente ou negativamente), dependendo do seu tamanho, concentração e distribuição (BRANDRUP et al., 1996).

3.4.7 Principais problemas do processamento de plásticos misturados

Um dos principais problemas da reciclagem é a alta mistura dos resíduos plásticos causada normalmente pelo baixo peso das embalagens (ex. 60 % pesam menos que 10 g), contaminação, baixa miscibilidade entre polímeros e deterioração das propriedades mecânicas devido a aditivos e plastificantes. Estes problemas se agravam quando o material é reciclado novamente (PATEL et al., 2000). As várias distribuições de massa molecular dos polímeros (largas ou estreitas) e o grau de polimerização (DP), que é o número de unidades básicas de uma cadeia polimérica) também influenciam nas propriedades finais dos polímeros (MUSTAFA, 1993).

A infinita reciclagem de plásticos não é possível, pois suas moléculas se degradam durante a repetição dos processos limitando a vida útil do material. Quando o material da corrente segregada estiver envelhecido e conseqüentemente quebradiço porque as cadeias moleculares estão menores, uma alternativa é combiná-lo com 60 a 70 % de material virgem. Para diminuir a degradação das moléculas devido à absorção de energia e auto-decomposição, pode-se utilizar estabilizantes (BRANDRUP et al., 1996).

O tamanho e o formato do grão, que são críticos para a massa específica aparente do reciclado, dependem da geometria do produto, do granulador utilizado, do diâmetro da tela e do estado das facas do moedor. Outro fator importante é o conteúdo de umidade no reciclado, que é dependente do tipo do plástico (se é higroscópico ou não) e das condições de armazenagem. Afora o tratamento de plastificação, características específicas de material também podem influenciar as propriedades do produto final, como incorporação de carga, estabilizante de calor e UV para melhorar a estabilidade às intempéries ou a resistência ao calor e pigmentos. No caso da mistura de polietileno e polipropileno, dependendo da razão desta mistura, as propriedades obtidas serão piores que as dos materiais virgens (BRANDRUP et al., 1996).

Os principais problemas no processamento de materiais reciclados para filmes são: a) descoloração aleatória do material granulado, resultante dos pigmentos de tinta; b)

escurecimento causado pela degradação dos produtos contidos no filme; c) odor intenso, resultante do produto da oxidação degradativa nos polímeros; d) aditivos em quantidade e natureza desconhecidas, que causam efeitos imprevisíveis no processamento e na durabilidade do material (BRANDRUP et al., 1996).

O processamento repetido de misturas plásticas contendo PS ou PVC acentua a deterioração das propriedades físicas do material obtido, pois estes polímeros desprendem estireno e cloro da sua cadeia polimérica quando submetidos a temperaturas superiores às de seu processamento (KHAIT et al., 2002).

Produtos originados de materiais recicláveis podem ser prensados universalmente com equipamento de maquinaria metálico. Duas características devem ser levadas em conta, a primeira delas é que os plásticos são condutores pobres de calor, desta forma o calor gerado no ponto de corte é difícil de ser removido e a segunda característica é que devido à baixa resistência ao calor do material, o amolecimento ocorre em temperaturas relativamente baixas, o que faz com que a usinagem seja difícil. Em qualquer dos casos, ferramentas de corte apropriadas, com geometrias específicas, boa remoção de rebarbas e resfriamento adequado devem ser utilizados para prevenir aquecimento excessivo. A união de peças produzidas a partir de material reciclado deve ser feita, se possível, por meio de juntas de encaixe (BRANDRUP et al., 1996).

3.5 Processos existentes para reciclagem de plásticos misturados

Muitos cientistas ainda preferem estudar somente a reciclagem de polímeros separados por acreditarem na impossibilidade de produzir artefatos de boa qualidade a partir de plásticos misturados devido à incompatibilidade entre eles. Porém, estudos mostraram que propriedades boas e consistentes são obtidas da reciclagem deste tipo de material misturado. No caso de perfis muito espessos, um fator limitante é que os polímeros geralmente possuem uma baixa condutividade térmica, que faz com que os perfis tenham um gradiente significativo suficiente para gerar diferença de cinética de cristalização. Outra consideração importante é a garantia da composição da matéria-prima que pode resultar em oscilação ou uma falha de estabilidade dimensional no produto (EHRIG, 1992).

A parcela de plásticos misturados do RSU normalmente é processada diretamente em peças moldadas. A reciclagem de plásticos misturados normalmente é associada à fabricação de “madeira plástica” (BRANDRUP et al., 1996).

Uma tecnologia eficiente para moldagem por compressão de uma mistura de plásticos foi desenvolvida na Alemanha por Erich Weichenreider e é conhecida como Recycloplast. Este processo mistura 50 a 70 % de materiais plásticos com outros contaminantes, fundindo via fricção as porções da mistura caracterizada pelos pontos de plastificação baixos e até 50% um material plástico único. Uma peneira ajustada automaticamente remove o material fundido do plastificador e o pressiona através do bocal de uma extrusora aquecido em perfis cilíndricos pré-medidos. Depois este perfil é enviado para um dispositivo de carga por pressão que preenche uma seqüência de moldes de compressão alternadamente. Então os produtos são resfriados a 40°C (EHRIG, 1992). A temperatura de processamento é em torno

dos 200°C no conjunto plastificador da injetora (MUSTAFA, 1993). Na época, este era um dos poucos processos capazes de fabricar produtos de parede fina como paletas, engradados, caixas de compostagem, etc. (BISIO; XANTHOS, 1994)

Na década de 70, surgiu a primeira tecnologia para processamento de resinas sintéticas termoplásticas misturadas, na Holanda. Desenvolvida por Edward Klobbie, para a fabricação de artigos com propriedades semelhantes à madeira, o material é colocado em uma extrusora muito longa, para moldados lineares e depois o material é parcialmente resfriado em tanque com água (EHRIG, 1992; BISIO; XANTHOS, 1994).

Nos anos 80 surgiram muitas outras companhias que reciclavam plásticos misturados, como a ART da Bélgica, a Hammer's Plastics Recycling dos EUA e a Superwood da Irlanda. Destas, somente a tecnologia ART era comercializada sem royalties (EHRIG, 1992).

No processo "ART" (Advanced Recycling Technology) de intrusão (combinação de extrusão com injeção), desenvolvido nos anos 80, filmes são alimentados ao processo após serem densificados (aglutinados). Contaminantes abrasivos, ainda que tolerados, podem acelerar o desgaste dos equipamentos (BRANDRUP et al., 1996; MUSTAFA, 1993). Este processo é realizado em uma extrusora adiabática, que é capaz de processar a maioria dos materiais termoplásticos aglutinados e misturados, admitindo até 40 % de contaminantes no material polimérico. Os 60 % restantes de material acabam encapsulando os contaminantes (EHRIG, 1992).

No processo Sicowa, o material plástico misturado pode ser alimentado com 20 a 40 % de contaminantes como papel, metal, vidro, matéria orgânica, etc. A mistura deve consistir de aproximadamente 60 a 70 % de poliolefinas, 10 a 30 % de PS e aproximadamente 10 % de outros materiais plásticos (BRANDRUP et al., 1996)

Nos anos 90, a Hammer's Plastics Recycling era provavelmente a maior produtora de madeira plástica no mundo, utilizando um processo coberto por várias patentes nos EUA, caracterizado por moldes fechados, bocais aquecidos e uma tela que serve para melhorar a pressão de moldagem superior à do processo Klobbie. Esta planta normalmente processa 65 % de PEAD, 20 % de PEBD, 5 % de PP, 5 % de PET e 5 % de outros plásticos (EHRIG, 1992).

No processo "Superwood", o material plastificado é forçado através de um grande orifício para um molde de aço, conhecido como processo de injeção sob baixa pressão. Moldes de diferentes seções transversais e mesmo comprimento são moldados horizontalmente em um carrossel que gira em um tanque grande que tem a função de resfriar o material. Os moldados são ejetados por um jato de ar. As matérias-primas do processo são principalmente PE e PP. O processamento de PET, ABS ou outros termoplásticos é possível somente em condições especiais e o processamento com PVC sem aditivos somente pode ser realizado em pequenas quantidades. O material coletado é resultante da coleta seletiva do RSU e resíduos industriais (MUSTAFA, 1993).

Existe ainda o processo Reverzer, desenvolvido pela Mitsubishi Petrochemical onde os plásticos do RSU misturados são fundidos e então misturados em uma rosca para desenvolver uma batelada bem misturada de plástico. Existem 3 sistemas para a fabricação de materiais a partir do processo Reverzer, moldagem por injeção, extrusão e moldagem por compressão (EHRIG, 1992; BISIO; XANTHOS, 1994).

Um processo mais atual chamado de S³P cria um pó plástico homogêneo através de auto-compatibilização de plásticos, sem fundi-los. Neste processo, o plástico é sujeito a alto cisalhamento enquanto o calor de fricção gerado é removido (para prevenir a plastificação). Neste processo em particular, o reprocessamento da mistura de plásticos pós-consumo não altera as propriedades físicas do produto e em alguns casos ainda as melhora (KHAIT et al., 2002).

Plantas de regranulação separavam principalmente as poliolefinas em processos de separação por massa específica e as processavam para formar grânulos. A fração pesada remanescente era disposta em aterros sanitários. Processos com baixo custo para separar, lavar, secar e granular e desenvolvimento de tecnologias que permitam que a fração pesada seja processada ou utilizada como carga para poliolefinas em plantas de regranulação para produzir materiais com características aceitáveis se tornam necessários (BRANDRUP et al., 1996).

3.6 Propriedades mecânicas do material reciclado misturado

Materiais e artigos gerados pela reciclagem de plásticos misturados requerem um ajuste de propriedades apropriado para suas aplicações. Recicladores também se preocupam com as características do processo de plastificação das correntes misturadas de lixo para que não danifiquem os equipamentos utilizados, pois isto faz com que necessitem de manutenção mais freqüentes. (BRANDRUP et al., 1996).

Propriedades mecânicas básicas incluem módulo elástico, dureza, tração e compressão, resistência ao impacto e alongamento na ruptura. Outros tipos de propriedades também são importantes tais como envelhecimento, resistência ao calor ou radiação UV ou resistência ao ataque de fungos e bactérias na peça. Propriedades como resistência ao fogo, propriedades acústicas e lixiviação em água também são interessantes de serem consideradas. Em certas circunstâncias é possível compensar os valores de propriedades baixas aumentando a espessura, limitando as dimensões e principalmente restringindo o peso que a aplicação poderá suportar. Definir os limites de tensão de ruptura na peça também são necessários (BRANDRUP et al., 1996).

No caso dos termoplásticos, quanto mais estreita for a distribuição de peso molecular, melhores são as propriedades de impacto, tração e resistência à alongação. Quanto maior esta distribuição, melhor o processamento da mistura. Polímeros com cadeias mais curtas se plastificam mais facilmente que os de cadeia mais longa. (MUSTAFA, 1993).

Quando plásticos misturados são processados com temperatura abaixo do ponto de plastificação da maioria dos componentes da mistura, grandes inclusões que mostram baixa interação com o polímero podem ocorrer. O tamanho, concentração e dispersão destas inclusões podem influenciar as propriedades de tensão e impacto do artigo reciclado, aumentando a dispersão de qualquer determinação de propriedades. Outros polímeros apresentam uma fase dispersa e contaminantes (madeira, metal e têxteis) que não foram removidos durante o processamento, que também podem contribuir para a dispersão de resultados (BRANDRUP et al., 1996).

Na Tabela 3.7 abaixo são mostradas algumas propriedades no processamento de plásticos provenientes do RSU com proporção determinada (KHAIT et al., 2002).

Tabela 3.7: Propriedades físicas da mistura PEAD/PEBD/PP/PS/PVC, na proporção 15/68/13/2/2 após o processo de S³P e moldagem por injeção (KHAIT et al., 2002)

Método de processamento	Propriedades de Flexão	
	Módulo (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
S ³ P	457	17,6
Moldagem por Injeção	530	18,9

Na Tabela 3.8 abaixo são mostradas algumas propriedades no processamento de PEAD proveniente do RSU (GEORGE; DILLMAN, 2000).

Tabela 3.8: Propriedades mecânicas do PEAD pós-consumo reciclado (GEORGE; DILLMAN, 2000)

Método de processamento	Propriedades de Tração		Flexão Módulo (MPa)	Resistência ao Impacto Izod (J.m ⁻¹)
	Módulo (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)		
Moldagem por Injeção	820	18,8	1480	100

Os dados obtidos na bibliografia são muito escassos quanto as propriedades do material reciclado misturado.

3.7 Mercado para produtos recicláveis

Os principais usos no Brasil do plástico reciclado são: utensílios domésticos (35 %), sacolas/sacos (27 %), peças/acessórios para veículos (20 %), materiais de construção (19 %),

embalagens em geral (15 %), brinquedos (13 %) e peças de plásticos em geral (11 %) (CEMPRE, 2002).

Muitos são os materiais que podem ser fabricados com plásticos misturados. Uma lista das possibilidades encontradas nos Estados Unidos encontra-se no site da American Plastic Council. Alguns exemplos de artefatos sendo fabricados com plásticos misturados (composição variando de 50 a 100 % de material plástico pós-consumo misturado) são: bancos de praça externos, postes de plástico misturado reforçados com aço para prevenir danos estruturais à construções, barricadas fabricadas com 75 a 100 % de plástico pós-consumo, paradas de estacionamento (limitadores) entre outras aplicações (APC, 2002).

Produtos derivados de plásticos misturados processados podem ser aplicados nas áreas de agricultura, marinha, recreação, jardinagem e aplicações industriais e civis (MUSTAFA, 1993).

A reciclagem mecânica pode produzir 3 tipos de artefatos: a) produtos fabricados originalmente com polímeros virgens, que podem servir para o mesmo propósito (ex. garrafa-para-garrafa) ou para propósitos diferentes (garrafa-para-fibra), b) produtos para substituição de materiais que não são confeccionados em plástico, como por exemplo madeira plástica, valas, partículas absorventes de óleo derramado no solo (PU ao invés de areia), c) produtos inovadores, como neve artificial (PATEL et al., 2000).

Produtos recicláveis podem substituir primariamente produtos como madeira, concreto e metais impregnados por pressão. Os artefatos plásticos apresentam vantagens como possuir resistência à decomposição e ter vida útil longa, sem necessidade de maiores reparos e baixo custo (EHRIG, 1992). Resistência a vandalismo como pichação ou entalhe, resistência à erosão, ausência de nós e baixo custo de manutenção também são característicos. Fibra de vidro pode ser utilizada para reforçar a madeira plástica, mas com o inconveniente de aumentar substancialmente o custo do produto. As desvantagens são o fato do custo do material ser muito mais alto, não ter boa rigidez e ser mais denso do que a madeira comum (GEORGE; DILLMAN, 2000).

Placas de superfícies e divisórias estão sendo fabricadas com plásticos misturados, sendo que a última utiliza o material com sua cor original. Bebedouros e alimentadores de vários tipos para animais também são confeccionados com este material. Piso de resíduo plástico misturado para estábulos de bezerros e porcos oferecem vantagens por serem mais resistentes do que a madeira ao ataque da urina e fezes e mais fáceis de limpar (BRANDRUP et al., 1996).

O fato do material plástico reciclado possuir uma coloração escura e ter uma superfície semelhante à da madeira faz com que este seja ideal para aplicações em jardins, parques e áreas de recreação para fabricação de bancos, mesas de piqueniques e equipamentos para recreação de crianças. O material plástico misturado e reciclado pode ser utilizado ainda para construção de elementos decorativos e funcionais de estradas, barreiras para estacionamento de carros, elementos de barreira para água, elementos de drenagem, condutores, etc. (BRANDRUP et al., 1996).

A baixa condutividade térmica dos materiais plásticos viabiliza sua utilização como isolamento térmico. Seu baixo peso também faz com que possa ser utilizado como agregado na indústria civil, sendo cimentado juntamente com a ajuda de água/matriz aglomerante. O agregado de plástico não é afetado pelo atrito mecânico de produção e transporte da argamassa seca produzida na planta ou por processamento. O grão do polímero age como suporte na matriz de argamassa e pode reduzir a quantidade de aglutinante utilizada para obter um certo grau de resistência. Contudo, não pode ser utilizado sem restrições pois são inflamáveis em geral e as propriedades são difíceis de serem estimadas sem grandes variações (BRANDRUP et al., 1996). No início do anos 60, a BASF Corporation realizou trabalhos extensivos no que diz respeito a adicionar o PS Expandido à mistura de concreto para obter um concreto de isolamento leve (EHRIG, 1992).

A madeira plástica teve sua origem nos Estados Unidos em meados dos anos 80. Métodos para testar as propriedades físicas da madeira plástica foram elaborados pela ASTM (American Society for Testing and Materials). A madeira plástica é encontrada também em piores como na Avenida Tiffany em Nova Iorque (EUA), uma ponte em Leonard Wood (Missouri, USA) para capacidade de carga de até 30 t com dimensões de 7,6 metros por 7,8 metros. O que se observa nesta aplicação é que a madeira plástica reciclada se expande e contrai muito mais que a madeira comum ou aço, com as variações de temperatura, logo este detalhe deve ser previsto no projeto. A ponte de plástico reciclado tem uma vida útil prevista de 50 anos enquanto a ponte de madeira comum requer a troca a cada 15 anos, inspeções bianuais e manutenção para troca das partes deterioradas. O material plástico custa mais que o dobro do preço da madeira e o retorno de investimento é esperado para menos que 8 anos. A ponte de madeira plástica utiliza 5.900 kg de plásticos misturados do RSU e não requer nenhum tipo de revestimento ou conservantes que podem danificar o meio ambiente com compostos orgânicos (LAMPO et al, 2000).

A madeira plástica fabricada com plásticos reciclados mantém cravos e parafusos melhores que a madeira. É um material mais denso que a madeira, sem manutenção aparente, com vida longa de pelo menos 50 anos, resistente a manchas, água e raios ultra violeta (UV) e não afetada pela maioria das substâncias. A normas ASTM estão estudando maneiras para utilizar estes materiais em aplicações estruturais e alguns produtos feitos de plásticos reciclados já estão sendo testados em campo (APC, 2002).

A madeira plástica é mais escorregadia que a madeira natural, porém não representa risco à saúde. Os plásticos se fundem com o aumento de temperatura e existe uma preocupação de que a madeira plástica não possua propriedade de tensão estrutural em um dia quente. Plásticos podem se tornar frágeis em temperatura muito baixas também, podendo ocorrer quebras do material no inverno. Também são suscetíveis à radiação UV, e por isso a madeira plástica deve ser aditivada com um inibidor de UV para proteger o material que está exposto ao sol. Retardantes de chama também devem ser adicionados. Estudos com a madeira plástica, resultante de uma mistura de plásticos e serragem, foram realizados para observar o comportamento desta em diferentes temperaturas. Os testes foram conduzidos em temperaturas de -23,3°C para simular as condições de inverno e 40,6°C para simular as condições de verão. Em todos os casos sob temperatura alta a resistência e a dureza foram

menores do que em baixa temperatura, logo os valores em altas temperaturas determinam a resistência e a dureza permitida para projetos (CARROL et al., 2001).

A utilização de madeira plástica reciclada (RPL) em estruturas civis já foi testada em um projeto realizado pelo Departamento de Energia dos EUA, que mostra que embora o custo da madeira plástica seja muito superior ao da madeira natural (20 dólares madeira e 275 dólares a RPL, para passarela com um comprimento de 1.700 pés), a vida útil da madeira é de 2 anos enquanto a da RPL é de 5 anos. Este projeto mostra que a utilização da RPL é competitiva com a utilização do aço galvanizado. Uma das utilizações é para estruturar uma espécie de passarela em Kelleys Island, Ohio, Estados Unidos e paletes para armazenamento de galões (STUSEK, 2000).

As rodovias brasileiras poderão ser construídas com o uso de diferentes plásticos pós-consumo, misturados e com suas respectivas impurezas. Além de reduzir a quantidade de certos aditivos como os ligantes, o processo aumenta em quase 100 %, a tenacidade dos concretos asfálticos que, em consequência, proporcionam um aumento da vida das rodovias. Além da maior durabilidade, há também uma redução de custos, pois os plásticos pós-consumo entram em até 50 % na composição dos agregados dos concretos (PLASTIVIDA, 2002).

No Japão, no ano de 1985, 25 municipalidades estavam tentando processar plásticos pós-consumo em artigos passíveis de venda. Contudo, em 1990, somente o município de Kusatsu ainda produzia potes para flores de material plástico misturado e reciclado. Como não existia mercado para tal produto, estes eram distribuídos gratuitamente para seus residentes. Os materiais utilizados foram PP, PEAD e PEBD. O PS pode corresponder somente a 10 % da matéria-prima e a utilização de PVC era proibida (EHRIG, 1992).

Poderia se tentar melhorar as propriedades mecânicas do material reciclado misturado através da aplicação de radiação gama para se melhorar o comportamento frágil do material, através do melhoramento das ligações de reticulação e dureza do material, como no caso de estudo de PEBD e PEAD (SUAREZ; MANO, 2000).

A reciclagem de plásticos também pode gerar papel sintético a partir de garrafas de PP, apresentando semelhança de propriedades às do papel, com menor rigidez, opacidade e impressão de tintas aquosas (MANRICH et al., 2000).

O mercado para os produtos plásticos reciclados está em franca expansão, pois existem muitos artefatos que podem ser fabricados, com grande espessura e que podem substituir materiais como madeira e vidro. O importante é definir quais as propriedades predominantes que se pode obter com a reciclagem mecânica de plásticos.

3.8 Legislação sobre reciclagem

Neste item são apresentadas algumas legislações pertinentes à reciclagem no mundo e no Brasil.

3.8.1 Legislação Mundial sobre reciclagem

A primeira lei sobre resíduos surgiu na Alemanha data de 27 de setembro de 1986 e tem como pontos principais, Redução, Recuperação e Disposição (aterro sanitário) do resíduo. Em 1992, a Alemanha também definiu os tipos de resíduos e sua disposição (BRANDRUP et al., 1996). Grande parte da legislação mundial é referente à utilização do material reciclado para novos produtos, preocupando-se com a saúde do usuário do novo material. A ASTM em setembro de 1990, definiu um guia padrão sob Designação D-5033-90 que define muitos termos e provê informações relevantes a respeito de fatores importantes do uso de plásticos reciclados (EHRIG, 1992). Uma lei sobre emissões atmosféricas derivadas de incineração surgiu na Alemanha, estabelecendo limites para os materiais orgânicos, inorgânicos e poeira, etc. (BRANDRUP et al., 1996).

Segundo Tonglet et al. (2004), o governo inglês visava reciclar ou compostar pelo menos 25% do resíduo domiciliar até 2005 e reciclar ou compostar pelo menos 30% do resíduo domiciliar até 2010.

A Diretiva de Resíduos de Embalagens e Embalagens da União Européia de 1994 tinha como objetivo atingir um percentual de recuperação entre 50 e 65 % (em peso) de todas as embalagens provenientes de qualquer tipo de fonte, e um objetivo específico de reciclar 15 % de cada tipo de embalagem até julho de 2001. A diretiva foi implementada em 1996 com um Ato Ambiental e implementada na legislação britânica em março de 1997 (SMITH et al., 1999).

A comissão européia propôs a reciclagem dos componentes de veículos em fim-de-vida (End-of-Life Vehicles), prevendo metas para 2015. Na média, um carro é composto de 70,2% de materiais metálicos em massa, 21,1% de não metálicos e 8,7% de materiais não ferrosos. Plásticos correspondem a 33% dos materiais não metálicos. Por existirem mais de 20 tipos normalmente em um carro, sua reciclagem se torna um desafio (BELLMANN; KHARE, 1999)

No ano de 1999, foi instituída a Diretiva de Aterramento da Comunidade Européia, que visa até 2010, diminuir em 25% a quantidade do resíduo biodegradável municipal produzido em 1995, e em 2013, diminuir esta quantidade em 50% (Tonglet et al., 2004)

No ano de 2001, a Comissão da Comunidade Européia desejava alcançar o valor de reciclagem de todos os resíduos gerados em 25 % (peso) e pelo menos 15 % de reciclagem de todo o material plástico consumido (SOFRES, 2000).

Regulamentações sobre materiais reciclados em contato com alimentos, água potável e cosméticos existem na Comunidade Européia, Bélgica, Dinamarca, Alemanha, França, Grã-Bretanha, Itália, Holanda, Espanha, Grécia, Áustria, Suíça, EUA, Canadá, Austrália, Brasil, Índia, Japão entre outros. Estas baseiam-se no fato de que mesmo que seja possível separar as misturas plásticas obtidas em frações utilizáveis, normalmente é impossível para o reciclador garantir a composição precisa do material e a total ausência de impurezas, como por exemplo, microorganismos/toxinas, metais pesados, substâncias derivadas do processo de reciclagem e assim por diante (BRANDRUP et al., 1996).

Na Suíça, reciclados não podem ser utilizados para artefatos que tenham contato com alimentação e em brinquedos. Nos Estados Unidos e Alemanha, materiais reciclados são proibidos para utilização médica e farmacêutica. Na Alemanha os plásticos reciclados não estão impedidos de ser utilizados na indústria da alimentação, contanto que estes atendam a norma específicas (30-32LMBG e Lei de produtos para o consumidor) (BRANDRUP et al., 1996).

Legislações sobre restrições na utilização de plásticos reciclados para brinquedos também existem na maioria dos países, sendo que na Comunidade Européia existem ainda limites sobre migração de antimônio, arsênio, bário, cádmio, chumbo e mercúrio em simulação de saliva. Na área médica não é aceita a utilização de materiais plásticos reciclados (BRANDRUP et al., 1996).

Em Portugal, o decreto-lei n.º 366-A/97 de 20 de dezembro de 1997 tem por objetivo diminuir a produção de resíduos de embalagens e, sempre que tecnicamente possível, reutilizá-las e reciclá-las, bem como desencorajar a sua eliminação por via do simples depósito em aterro. Até 31 de Dezembro de 2001 deveriam ser valorizados um mínimo de 25 % em peso dos resíduos de embalagens; Até 31 de Dezembro de 2005 deveriam ser valorizados um mínimo de 50 % em peso dos resíduos de embalagens e reciclados um mínimo de 25 % em peso da totalidade dos materiais de embalagem contidos nos resíduos de embalagem, com um mínimo de 15 % para cada material de embalagem (PORTUGAL, 1997).

A Noruega incentiva a mais de 12 anos, através do Instituto de Proteção Ambiental da Oestfold Research Foundation, vários programas de Produção Limpa e capacitação em países como Polônia, República Tcheca, Eslováquia, Rússia, China, Indonésia e Uganda, obtendo resultados consideráveis em melhoria de utilização de material, menor consumo de energia e redução de emissões atmosféricas, na água e no solo (Kjaerheim, 2003). Hanssen et al. propôs que para atingir as metas da diretiva de embalagens da União européia, quatro medidas deveriam ser adotadas: redução do desperdício de resíduos, máxima reciclagem das embalagens, mínimo transporte até a reciclagem e minimização do consumo de embalagens (Hanssen et al., 2003)

Observa-se que na maioria dos países, a principal preocupação da reciclagem é com a emissão de efluentes. Para que a reciclagem seja viável, além do aspecto econômico da produção, devem ser levados em consideração os custos e a dificuldade de controle destas emissões. O ideal seria que todos os materiais potencialmente recicláveis fossem separados por tipo nas residências melhorando assim a reciclagem dos mesmos.

3.8.2 Legislação Nacional

Neste item são listadas algumas das legislações em vigência no país pertinentes à reciclagem, principalmente de embalagens, disposição final e limitações de emissões.

De acordo com o jornal “O Estado de S. Paulo”, de 05/12/99, o preço do barril de petróleo, que em dezembro de 1998 oscilava entre US\$ 10,00 a US\$ 12,00, sofreu um acréscimo para US\$

25,00 a U\$ 26,00 em dezembro de 1999, resultando numa elevação de 132 % do preço da nafta, matéria-prima básica para a produção das resinas plásticas. Foi então instalada uma Comissão no Congresso Nacional para discutir uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, que além regulamentar os tópicos mencionados anteriormente, propôs também a criação de incentivos fiscais para a indústria de reciclagem, seguindo procedimentos adotados em países de primeiro mundo. Uma das principais inovações da Política Nacional de Resíduos Sólidos será a criação da figura de empresa exclusivamente recicladora, que contará com isenção de impostos, como IPI e ICMS. A proposta tem o objetivo de acabar com a bi-tributação dos produtos reciclados (que já pagaram impostos quando produzidos pela primeira vez) e incentivar a formalização das cooperativas de catadores (RECICLÁVEIS, 2002).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, lei n.º 6.938 de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto n.º 99.274, de 06 de junho de 1990, estabelece que o sistema de tratamento de resíduos de origem urbana, deverá dispor, no mínimo, das seguintes condicionantes: a) área coberta para o recebimento de resíduos; b) captação e tratamento dos gases da área de estocagem; c) coleta e destinação ambientalmente adequada do chorume; d) tratamento adequado dos gases para eliminação de odores (CONAMA, 1993).

A resolução n.º 275 de 25 de abril de 2001 considera que a reciclagem de resíduos deve ser incentivada, facilitada e expandida no país para reduzir o consumo de matéria-prima, recursos naturais não-renováveis, energia e água. Considera também a necessidade de reduzir o crescente impacto ambiental associado à extração, geração, beneficiamento, transporte, tratamento e destinação final de matérias-primas, que provoca o aumento do volume de lixões e aterros sanitários; Propõe que as campanhas de educação ambiental sejam providas de um sistema de identificação de fácil visualização, de validade nacional e inspirado em formas de codificação já adotadas internacionalmente, essenciais para efetivarem a coleta seletiva de resíduos, viabilizando a reciclagem de materiais e estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva: AZUL para papel/papelão; VERMELHO para plástico; VERDE para vidro; AMARELO para metal; PRETO para madeira; LARANJA para resíduos perigosos; BRANCO para resíduos ambulatoriais e de serviços de saúde; ROXO para resíduos radioativos; MARROM para resíduos orgânicos; CINZA para resíduo geral não reciclável, misturado ou contaminado não passível de separação (CONAMA, 2001).

A resolução n.º 316, de 29 de outubro de 2002 trata sobre o sistema de tratamento térmico dos resíduos de origem urbana, que deve possuir área coberta para recebimento de resíduos e sistema de coleta e tratamento do chorume. O tratamento deve ocorrer em temperaturas acima de 800°C e o tempo de residência na câmara deve ser superior a um segundo. Os limites de emissões atmosféricas também são previstos nesta resolução (CONAMA, 2002).

No Estado do Rio Grande do Sul, o decreto n.º 38.356, de 01 de abril de 1998 diz que a gestão dos resíduos sólidos é responsabilidade de toda a sociedade e deverá ter como meta prioritária a sua não-geração, devendo o sistema de gerenciamento destes resíduos buscar sua minimização, reutilização, reciclagem, tratamento ou destinação adequada. A segregação dos resíduos sólidos na origem, visando seu reaproveitamento otimizado, deverá ser implantada

gradativamente nos municípios, mediante programas educacionais e sistemas de coleta segregativa, entendida esta como o acondicionamento e coleta em separado dos materiais para os quais exista viabilidade técnica de reaproveitamento. Fica vedada a descarga ou depósito, de forma indiscriminada, de resíduos sólidos no solo e em corpos d'água (Rio Grande do Sul, 2002)

A lei n.º 3206 de 12 de abril de 1999 cria normas e procedimentos para o serviço de coleta, reciclagem e disposição final de garrafas e embalagens plásticas no estado do Rio de Janeiro. O Poder Executivo fica autorizado a estabelecer normas e procedimentos, inclusive criação de taxa específica, para serviço de coleta, reciclagem e disposição final de garrafas e embalagens plásticas. As garrafas e embalagens plásticas comercializadas no território terão impressa orientação ao consumidor sobre os riscos para o meio ambiente sobre o descarte de forma inadequada (Rio de Janeiro, 1999).

O decreto estadual do Rio de Janeiro 31.819, de 09 de setembro de 2002, informa que as empresas que exerçam atividades tais como comércio de bebidas, alimentos, produtos farmacêuticos e de limpeza, óleos lubrificantes, produtos químicos e cosméticos que utilizam garrafas e embalagens plásticas na comercialização de seus produtos são responsáveis pela destinação final ambientalmente adequada das mesmas (Rio de Janeiro, 2002).

A lei de crimes ambientais, decreto n.º 3.179, de 21 de setembro de 1999, estabelece que o descarte de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos em locais impróprios pode ser multado em valores entre R\$ 1.000,00 (mil reais) e R\$ 50.000.000,00 ou multa diária (Brasil, 2004).

A lei n.º 13.316 de 1º de fevereiro de 2002 trata da coleta, destinação final e reutilização, inclusive através de processos de economia solidária, de embalagens, garrafas plásticas e pneumáticos na cidade de São Paulo. São responsáveis pela destinação final ambientalmente adequada das garrafas e embalagens plásticas utilizadas para a comercialização de seus produtos as empresas produtoras e distribuidoras de: I - bebidas de qualquer natureza; II - óleos combustíveis, lubrificantes e similares; III - cosméticos; IV - produtos de higiene e limpeza. Esta lei considera destinação final ambientalmente adequada de garrafas e embalagens plásticas, para os efeitos desta lei: I - a utilização das garrafas e embalagens plásticas em processos de reciclagem, com vistas à fabricação de embalagens novas ou a outro uso econômico; II - a reutilização das garrafas e embalagens plásticas, respeitadas as vedações e restrições estabelecidas pelos órgãos competentes da área da saúde. - As empresas estabelecerão e manterão, em conjunto, procedimentos para a recompra das garrafas plásticas após o uso do produto pelos consumidores. É proibido o descarte de lixo plástico no solo, em cursos d'água ou em qualquer outro local não previsto pelo ente municipal competente (São Paulo, 2002).

Na data de 15 de maio de 2002 foi aprovado no Estado do Rio Grande do Sul o Licenciamento Ambiental de Sistemas de Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (FEPAM, 2002).

Muitas outras medidas devem ser tomadas para que a reciclagem seja otimizada, como melhor identificação das embalagens por parte dos fabricantes, melhor separação do material

nas residências, treinamento adequado do pessoal encarregado de separação, novos processos, etc.

Observa-se que com as leis apresentadas acima, o Brasil está bem avançado no que diz respeito à legislação. Contudo, ainda assim a reciclagem de RSU é pequena, principalmente de plásticos, porque são semelhantes visualmente e não possuem identificação em todas as embalagens.

Como a reciclagem para produção de matéria-prima e a reciclagem energética geram emissões atmosféricas poluentes, que podem intoxicar a população se não forem controladas, ainda existe uma resistência muito grande quando estes dois processos no país. Por esta razão, este trabalho é focado na reciclagem mecânica, atualmente a mais adequada à realidade brasileira pois não gera praticamente estes tipos de emissões e não degrada os plásticos a ponto de liberar algumas das substâncias tóxicas que os compõem.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Este capítulo descreve os métodos utilizados no presente trabalho para a coleta dos resíduos plásticos, sua caracterização, moagem, homogeneização, lavagem, secagem, aglutinação e processamento por compressão.

4.1 Esquema Básico da Reciclagem Mecânica

O processo de reciclagem mecânica utilizado é mostrado no esquema da Figura 4.1 abaixo.

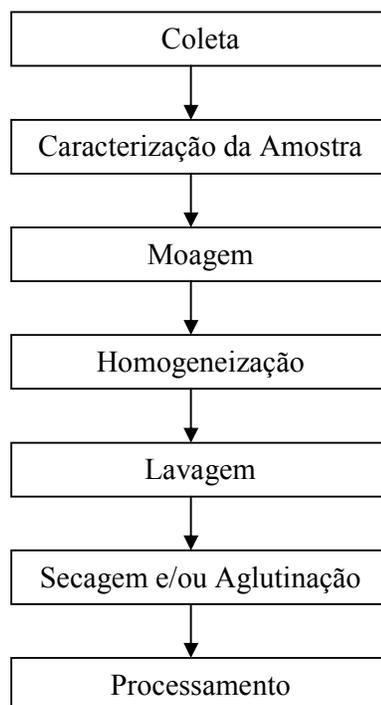


Figura 4.1: Fases do processo de reciclagem mecânica

4.2 Coleta dos Resíduos Plásticos

A matéria-prima utilizada neste trabalho é composta pela parcela do material plástico (pós-consumo) que não possui valor comercial para os centros de triagem. Os materiais considerados sem valor para o reciclador são descartados em um contêiner de rejeitos do galpão de triagem onde, uma vez por dia, um caminhão de lixo coleta estes resíduos e os levam para o aterro sanitário. Grande parte destes rejeitos é composta por plásticos, especialmente sacolas de supermercados sujas, potes de margarina e iogurte, bandejas de alimentos, etc.

4.2.1 Seleção do centro de triagem

A coleta de amostras foi realizada no Centro de Triagem do Aterro da Zona Norte da cidade de Porto Alegre. Esta unidade foi escolhida por ainda não apresentar uma separação manual muito eficaz de todo o material que recebe. Esta baixa eficiência na separação do material deve-se normalmente ao fato dos materiais estarem contaminados ou serem de difícil identificação. A falta de capacitação dos separadores do centro de triagem também foi um fator considerado. A Figura 4.2 ilustra o trabalho das mulheres na triagem do material.

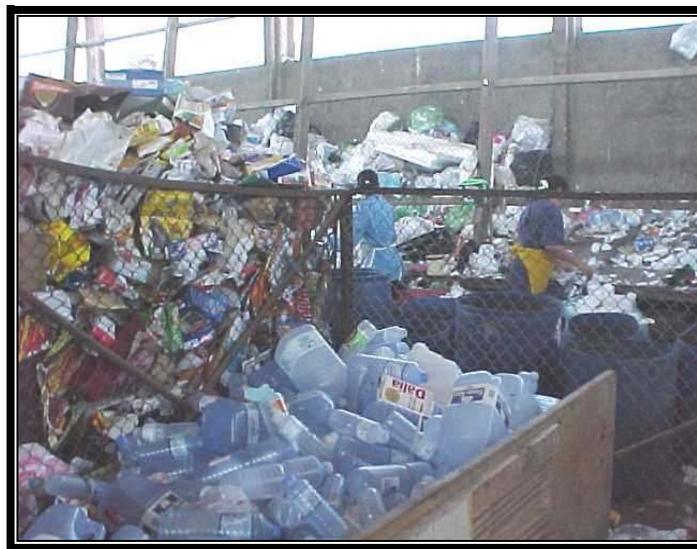


Figura 4.2: Separação de material no Centro de Triagem do Aterro da Zona Norte

4.2.2 Coleta e armazenamento das amostras

As amostras de resíduos plásticos foram retiradas manualmente do contêiner de rejeitos do galpão de triagem conforme ilustra a Figura 4.3, e o material foi colocado em sacos de lixo comuns disponíveis comercialmente.



Figura 4.3: Coleta realizada no contêiner de rejeitos do Centro de Triagem.

Os sacos plásticos fechados foram prensados e pesados no centro de triagem, obtendo-se fardos com dimensões aproximadas de 80 x 80 cm e peso aproximado de 45 kg. Cada fardo era composto por aproximadamente 25 sacos de lixo de 100L de material não prensado. O processo de prensagem do material é mostrado na Figura 4.4 abaixo e os fardos resultantes são mostrados na Figura 4.5.



Figura 4.4: Alimentação de material para a prensagem dos fardos



Figura 4.5: Fardos prensados

Os fardos foram coletados em 4 períodos diferentes e o peso de cada amostra foi definido pelas necessidades de processamento a cada etapa do presente trabalho. A quantidade e período das coletas são mostrados na **Tabela 4.1** abaixo.

Tabela 4.1: Quantidade de material coletada no contêiner de rejeitos

	<i>Peso Total (kg)</i>	<i>Número de fardos</i>	<i>Data da coleta (mês/ano)</i>
Coleta 1	71,2	1	08/2000
Coleta 2	133,4	3	12/2000
Coleta 3	45,2	1	01/2002
Coleta 4	45,0	1	02/2002

Os fardos foram transportados para o laboratório de reciclagem do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Sul (CEFET-RS), localizado na cidade de Sapucaia do Sul, onde o material passou pelos processos de caracterização, pesagem, moagem, lavagem e secagem.

4.3 Caracterização das amostras

A caracterização das 4 amostras foi realizada separadamente para determinar o tipo e a quantidade dos diferentes plásticos que as compunham e a sua sazonalidade. Os fardos foram abertos, separando-se os sacos de lixo que os compunham e retirando-se aleatoriamente pequenas quantidades de material de cada um dos sacos.

A caracterização foi feita usando separação por diferença de massa específica, análise das características da queima, além de outras propriedades como ruído, aparência e brilho característicos de cada plástico analisado, bem como o nicho de mercado ao qual pertencem.

4.3.1 Análise de massa específica

Na análise de massa específica, amostras plásticas não identificadas com dimensões aproximadas de 2 cm x 2 cm, foram colocadas em dois tipos de soluções. Na primeira, água destilada foi colocada em um Becker de 1 L e foi observado se os materiais flutuavam ou decantavam. Se o material nesta solução flutuasse, este componente seria uma poliolefina (PE ou PP) ou algum plástico expandido e se o material decantasse, este era colocado em Becker de 1 L com uma solução de água e NaCl de massa específica 1,1 g.cm⁻³ (massa específica característica do PS Rígido). Na Tabela 4.2, Ferrara e Meloy (1999) definem quais os polímeros mais comuns encontrados no RSU e suas massas específicas foram retiradas do Plastic Engineering Handbook (FRADOS, 1976).

Tabela 4.2: Massas específicas dos principais polímeros contidos no RSU (FRADOS, 1976)

<i>Tipo de Plástico</i>		<i>Massa específica (g.cm⁻³)</i>
PMP	Poli-4-metilpenteno-1	0,83
PEAD	Polietileno de baixa densidade	0,91–0,93
PEBD	Polietileno de alta densidade	0,95–0,96
PP	Polipropileno	0,90–0,91
OS	Poliestireno	1,04–1,07
ABS	Copoli (estireno-butadieno- acrilonitrila)	1,05–1,07
PU	Poliuretano	1,11–1,25
PC	Policarbonato	1,20
PVC	Poli(cloreto de vinila)	1,30–1,35
PET	Poli(etileno tereftalato)	1,37
PVF2	Poli(fluoreto de vinilidênio)	1,77
PTFE	Politetrafluoroetileno	2,10–2,30
CTFE	Clorotrifluoroetileno	2,10–2,15

Materiais de polímeros expandidos (PS, PU, etc.) quando submetidos a este método não são separados precisamente por possuírem massa específica aparente menor que a da água.

4.3.2 Análise do comportamento do plástico durante a queima

O método de análise do comportamento dos polímeros durante a queima consiste na análise da flamabilidade e aspecto da chama, comportamento do material e odores gerados pelos vapores ou fumo quando da queima do polímero. Durante a exposição à chama, a maioria dos polímeros quando afastados dela ainda apresentam uma pequena chama, com algumas exceções como o PVC e o policarbonato que são auto-extinguíveis. Por exemplo, poliolefinas (PE e PP) apresentam uma chama amarela com centro azul e queimam sem formação de fuligem, mas com fumaça branca. Seu odor é semelhante ao de parafina (vela) (MUSTAFA, 1993).

Na observação do comportamento do material é analisado se este amolece, carboniza-se, estala ou goteja durante sua queima. Os odores gerados pela queima também são importantes para se caracterizar o material. Alguns têm cheiro como o de vela, outros possuem odores característicos dos seus constituintes como HCl e estireno. A Tabela 4.3 mostra o comportamento dos principais polímeros quando submetidos à queima (CEFET, 2000).

4.3.3 Outros métodos

Outros métodos foram utilizados como auxiliares na identificação dos plásticos. São eles: reconhecimento de superfície através do toque, aparência e transparência, dureza, método de fabricação e requerimentos da aplicação (MUSTAFA, 1993). Estes métodos auxiliam, mas não são conclusivos na identificação, pois as propriedades do polímero final podem ser alteradas por aditivos.

Por exemplo, PE e PP possuem uma aparência encerada específica e, quando não pintados ou pigmentados, apresentam normalmente uma aparência opaca, especialmente nas partes mais espessas (MUSTAFA, 1993).

O PS e o PVC são normalmente utilizados para artigos moldados por termoformagem. Garrafas transparentes utilizadas para armazenamento de alimento são normalmente fabricadas de PET ou PVC, se forem opacos e coloridas são fabricadas de PE (MUSTAFA, 1993). Garrafas para água na cor azul normalmente são fabricadas de PP.

A intensidade do brilho de certos materiais e o ruído característico gerado quando estes sofrem deformações, também devem ser analisados. Alguns polímeros, tais como o polipropileno, apresentam brilho mais intenso que outros materiais. Na caracterização de filmes, o ruído provocado pelo amassamento é mais evidente em filmes de PEAD e PP do que em outros filmes.

Outras características ainda podem ser observadas como transparência e resistência à tração ou flexão. Policarbonatos possuem alta transparência e filmes de PEBD se deformam mais quando tracionados que os filmes de PEAD. O PP é um material utilizado para peças como tampas, principalmente aquelas que funcionam como dobradiças, como as de xampu que são abertas e fechadas várias vezes durante a vida útil do frasco.

Tabela 4.3: Tabela mostrando o comportamento dos polímeros quando submetidos à queima (CEFET, 2000)

Plástico	Nomenclatura	Uso	Características	Combustão	Aspecto da Chama	Comportamento do Material
PET 	Poli(etileno tereftalato)	Garrafas de refrigerantes, óleo alimentício, bandejas para microondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis, etc.	Transparente, inquebrável, impermeável, leve	Queima-se rapidamente e mantém a chama	Amarela com bordas azuis e fumaça fuliginosa	Amolece facilmente, carboniza-se, estala e goteja
PEAD 	Poli(etileno de alta densidade)	Engradados para bebidas (como de latinhas de cerveja), baldes, garrafas para álcool, garrafas para produtos químicos domésticos, bombonas, tambores, tubos para líquidos e gases, domésticos, filmes, sacolas de plásticos de supermercados (brancas e barulhentas)	Inquebrável, resistente a baixas temperaturas, leve, impermeável, rígido e com resistência química	Queima-se lentamente e mantém a chama	Azul na parte inferior e amarela na superior, com fumaça branca	Amolece e goteja
PVC 	Poli cloreto de vinila	Conexões e tubos para água, encapamentos de fios elétricos, garrafas de água mineral e para detergentes líquidos, lonas, calçados, esquadrias e revestimentos, equipamentos médico-cirúrgicos, etc..	Rígido, transparente, impermeável, resistente à temperatura e inquebrável.	Difícil de queimar, extinguindo-se a chama logo em seguida	Amarelada com toques verdes na base e libera fumaça branca	Amolece e carboniza
PEBD PEBDL 	Poli(etileno de baixa densidade)	Embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixo, lonas agrícolas, filmes, etc..	Flexível, leve transparente e impermeável	Idem ao PEAD	Idem ao PEAD	Idem ao PEAD
PP 	Polipropileno	Embalagens para massa, potes de margarina, seringas descartáveis, equipamentos médico-cirúrgicos, fibras e fios têxteis, utilidades domésticas, autopeças, etc.	Conserva o aroma de vela, inquebrável, transparente, brilhante, rígido e resistente a mudanças de temperatura	Idem aos polietilenos	Idem aos polietilenos	O odor é um pouco mais ardido do que o dos polietilenos
PS 	Poliestireno	Fabricação de aparelhos de som e TV, copos descartáveis para água e café, embalagens alimentícias, revestimento interno de geladeiras, potes para iogurtes, sorvetes, doces, frascos, bandejas de carnes, pratos, tampas, aparelhos de barbear descartáveis, brinquedos etc.	Impermeável, inquebrável, rígido, transparente, leve e brilhante Quando cai faz ruído tipo metálico.	Queima rapidamente e mantém a chama	Amarela, alaranjada, quase vermelha, com muita fumaça fuliginosa	Amolece e goteja Forma bolhas quando queima
OUTROS 	ABS/SAN, EVA e PA.	Resinas plásticas não indicadas anteriormente, produtos co-extrudados, blends poliméricas, etc.	Flexibilidade, leveza, resistência à abrasão, possibilidade de formas diferenciadas			

4.4 Moagem

A moagem foi realizada em um moinho de facas de 10 HP de potência, contendo 6 navalhas no rotor, 4 navalhas fixas e peneira de diâmetro de 8 mm. Um esquema das lâminas deste moinho é mostrado na Figura 4.6 abaixo.

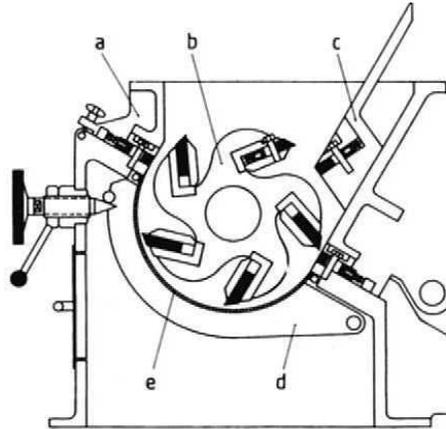


Figura 4.6: Moinho de facas composto por: a) alimentação, b) rotor, c) lâminas removíveis, d) tela de suporte, e) placa de suporte inserida (BRANDRUP et al., 1996).

O material a ser moído foi colocado na abertura de alimentação localizada na parte superior do equipamento. Para auxiliar a moagem de peças rígidas foi utilizado um recipiente plástico qualquer para empurrar o material dentro do equipamento. A visão geral do equipamento, bem como a alimentação são exibidos na Tabela 3.5 que ilustra o processo de moagem realizado.



Figura 4.7: Moagem do material

O plástico a ser moído necessitou estar isento de materiais metálicos, como tampas ou pregos, pois estes poderiam causar danos às lâminas. Estes materiais devem ser segregados no momento da coleta no contêiner, na abertura dos sacos plásticos na hora da moagem, para retirada de grampos, pilhas, tampas de garrafas, e outros pequenos objetos metálicos que não tenham sido separados na primeira seleção.

4.5 Pesagem e homogeneização

A pesagem do material foi realizada em uma balança modelo AK10 fabricada por Marte Balanças e Aparelhos de Precisão S.A., com capacidade de pesagem de 10 kg.

As amostras foram caracterizadas por tipo de polímero antes da moagem e pesadas a fim de estabelecer as proporções de cada polímero na mistura proveniente do contêiner de resíduos. Após a caracterização, o material separado foi misturado com o resto do fardo, moído, pesado e seguiu para a lavagem, para se verificar a contaminação do efluente baseado na quantidade de matéria-prima.

Todo o material moído foi misturado para que se obtivessem as condições mais homogêneas possíveis de processamento e de efluente gerado pela lavagem do material. A homogeneização foi realizada sobre uma lona preta de polietileno de 2 m de largura por 4 m de comprimento com a ajuda de pás, manualmente. Após a homogeneização o material foi ensacado novamente para posterior processamento.

4.6 Lavagem

Foi realizada a lavagem do material moído com a finalidade de remover os contaminantes presentes nas amostras. O processo foi realizado com água em dois tanques de fibrocimento com capacidade para 500 L cada. No primeiro tanque foi colocada uma cesta de tela de aço inoxidável removível com malha de 2 mm para separar a fase decantada plástica dos contaminantes presentes no material moído, como por exemplo, areia, papel, metal, etc. O tanque foi preenchido com água, de maneira que o nível após a colocação da amostra não ultrapassasse a altura da borda da cesta. O segundo tanque era utilizado como reserva ou para que a cesta do primeiro tanque, contendo o material decantado, fosse deixada para escorrer. A Figura 4.8 mostra mais detalhadamente a cesta utilizada.



Figura 4.8: Tanque de lavagem e cesta para coleta do material decantado

Os sacos do material previamente moído e homogeneizado foram abertos e o material foi colocado manualmente dentro do tanque com água. O material foi agitado manualmente utilizando-se luvas de borracha impermeáveis para impedir contato com o efluente, evitando partículas cortantes e contaminações ao operador. A solução foi deixada em repouso por um período de 15 minutos para que uma melhor separação das fases ocorresse.

A fase sobrenadante do material lavado foi retirada e colocada para secar. Após a retirada de todo o material sobrenadante, a cesta de tela foi retirada com todo o material decantado e este foi deixado para secar. O material que não foi retido pela cesta e decantou no fundo do tanque foi retirado para descarte e o tanque foi lavado para nova utilização. A Figura 4.9 ilustra o processo de lavagem.

O material decantado com partícula menor que a tela da cesta decantou para a base do tanque. O material do fundo do tanque foi submetido a um novo processo de separação, desta vez por tipo de polímero, com vários fluidos de diferentes massas específicas, para tentar determinar as quantidades de polímeros presentes nesta borra. Neste caso, água e soluções de água-álcool, água-sal foram colocadas em copos de Becker com capacidade para 2 litros e a massa específica foi medida com um densímetro. O processo realizado foi proposto por Ehrig (1992) e o esquema é mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.9: Lavagem do material moído

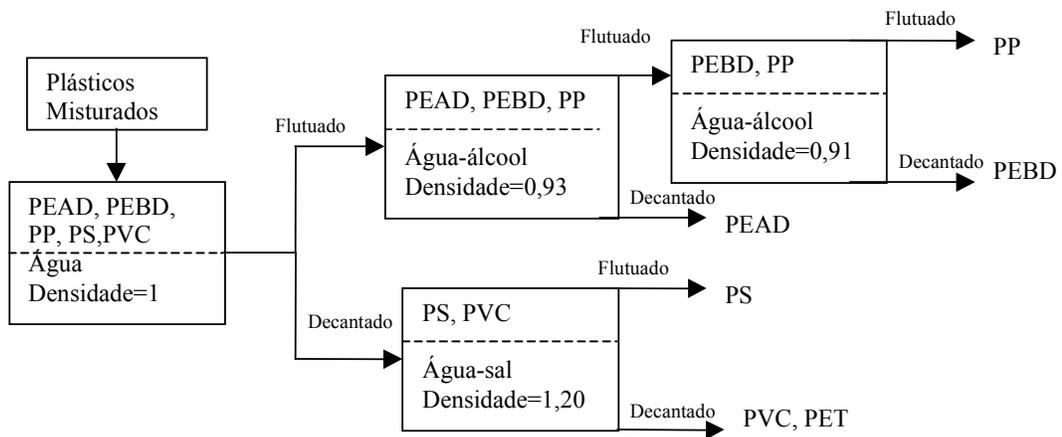


Figura 4.10: Esquema para separação flutuação-decantação em 4 estágios teóricos para resíduos plásticos misturados. (EHRIG, 1992)

4.7 Caracterização do efluente

Na caracterização dos efluentes gerados no processo de lavagem foram analisados os seguintes parâmetros: condutividade elétrica a 25°C, fósforo total, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis, pH a 20°C, óleos e graxas, demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), demanda química de oxigênio (DQO), surfactantes, nitrogênio total e

coliformes fecais. Na Figura 4.11 abaixo é mostrada a caixa onde o efluente gerado pela lavagem foi descartado para posterior análise de efluentes, bem como seu aspecto visual.



Figura 4.11: Descarga de efluente líquido

Os efluentes gerados devem obedecer aos limites impostos pelo Secretaria de Saúde e Meio Ambiente (SSMA). Estes valores variam de acordo com o tipo de atividade e efluente gerado pela indústria. Os limites foram obtidos na portaria 05/89 – SSMA e os valores máximos de DBO, DQO e sólidos suspensos são obtidos no item 6.1.3.2 para novas fontes poluidoras com vazão diária menor que 200 m³ (SSMA, 1989). Os limites de emissão impostos são mostrados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Limites de emissão de efluentes líquidos (SSMA, 1989)

<i>Parâmetro</i>	<i>Unidade</i>	<i>Limites</i>
DBO ₅	mg.L ⁻¹ O ₂	<120
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	<360
Surfactantes	mg.L ⁻¹ ABS	<2
Nitrogênio total	mg.L ⁻¹ N	<10
Coliformes fecais	N.M.P em 100 mL	<300
Condutividade a 25°C	MicroS.cm ⁻¹	-
Fósforo Total	mg P.L ⁻¹	<1
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	<120
Sólidos Sedimentáveis	mg.L ⁻¹	<1
pH a 20 °C	-	6~8,5
Óleos e Graxas	mg.L ⁻¹	<30

Na lavagem do material moído foi analisado o efluente resultante. As análises foram feitas por 2 laboratórios autorizados pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), o Laboratório de Efluentes da COPESUL e a Laborquímica. As análises feitas pelo Laboratório de Efluentes da COPESUL foram de condutividade a 25°C, fósforo total, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis, pH a 20°C e óleos e graxas. Os parâmetros avaliados pela Laborquímica foram DBO₅, DQO, surfactantes, nitrogênio total e coliformes fecais. Os efluentes gerados na lavagem do material foram analisados pelos seguintes métodos da Standard Methods (APHA et al., 1998), como mostra a Tabela 4.5 abaixo:

Tabela 4.5: Métodos para análises de efluentes (APHA et al., 1998)

<i>Parâmetro</i>	<i>Metodologia</i>
DBO ₅	SM 5210-B-98
DQO	SM 5220-B-98
Surfactantes	SM 5540-C-98
Nitrogênio total	SM 4500-NH ₃ -B-98
Coliformes fecais	SM 9221-B-98
Condutividade a 25°C	SM 2510-97
Fósforo Total	SM 3120-B-93
Sólidos Suspensos	SM 2540-D-97
Sólidos Sedimentáveis	SM 2540-F-97
pH a 20°C	SM 4500-H B-96
Óleos e Graxas	SM 5520-B-97

4.8 Secagem

Foram utilizados cinco processos diferentes para a secagem do material lavado, levando-se em conta o tempo de secagem do material em cada estrutura. São eles: secagem sobre uma lona plástica ao ar livre, secagem ao ar livre sobre uma cama com estrutura de canos de PVC, secagem ao ar livre em uma estrutura de aço inoxidável, secagem em leito fluidizado e secagem com ar forçado.

4.8.1 Secagem ao ar livre sobre lona plástica

A secagem ao ar livre foi a tentativa inicial por ser a de menor custo, consistindo simplesmente em colocar o material em uma lona de polietileno preta com dimensões de 2 m de largura e 4 m de comprimento ao ar livre e deixar o material secar.

4.8.2 Secagem sobre uma cama com estrutura de canos de PVC

Esta segunda tentativa consistiu em montar uma estrutura onde o líquido pudesse escorrer do material que estava sendo secado. Então uma estrutura de 2 m de largura por 4 m foi montada em tubos de PVC de diâmetro 4 cm e espessura 2 mm. A altura do solo foi de 30 cm. O material então foi colocado para escorrer em uma tela de polipropileno presa à estrutura, com de 2 mm de abertura, e quando a previsão do tempo fosse desfavorável, o material era coberto com uma lona de Polietileno preta. A Figura 4.12 apresenta um esquema representativo do sistema.



Figura 4.12: Esquema da secagem do material na cama de PVC

4.8.3 Secagem em estrutura metal

Uma terceira estrutura foi montada, desta vez em aço inoxidável (material disponível no CEFET-RS, para construção da estrutura). As dimensões da estrutura foram idênticas às da segunda estrutura, ou seja, 2 m de largura por 4 m de comprimento, afastada 50 cm do solo. Duas barras de apoio foram colocadas para subdividir a estrutura de forma a não permitir que o material se acumulasse somente no centro, dificultando assim a sua secagem. As barras utilizadas foram sobras de calhas de iluminação, na forma de U como mostra a Figura 4.13 (a) e com largura um pouco maior que o diâmetro externo do tubo de PVC utilizado na estrutura anterior. Como a tela já havia sido costurada aos tubos de PVC, o encaixe na estrutura de aço foi perfeito, permitindo que a tela fosse retirada da estrutura de metal para que o material seco pudesse ser melhor removido. De maneira a prevenir que a água de chuva ou do sereno se acumulasse sobre a lona que cobre e protege a estrutura contra intempéries, foram colocadas duas barras na metade da largura menor (2 m) verticalmente para que a estrutura ficasse com uma cobertura parecida com as barracas de acampar. Foi necessário também que se colocasse uma corda interligando os dois lados da estrutura de modo que a lona não criasse poças de água devido ao comprimento muito grande (4 m). A Figura 4.13 mostra detalhadamente a construção do sistema de secagem com estrutura de metal.



Figura 4.13: Secagem do material na estrutura de aço inoxidável.

As figuras acima mostram a construção do sistema de secagem: a) base em canaletas de aço inoxidável; b) tela em cima da estrutura; c) estrutura com o material plástico moído; d) cobertura da estrutura para dias de chuva e para noite.

4.8.4 Secagem em leito fluidizado

Esta etapa foi realizada com o intuito de se diminuir o tempo de secagem do material. Foi utilizada uma estrutura existente para secagem de grãos no Departamento de Engenharia Química da UFRGS para testar o tempo necessário para a secagem de o material granulado lavado. A estrutura consistia de um tubo de acrílico de diâmetro 9,61 cm e altura 150 cm. As duas extremidades são fechadas por telas de metal de 1mm de abertura. O material lavado foi colocado em uma cesta de metal feita com malha de 2 mm e altura 5 cm. Esta cesta foi inserida dentro do tubo até atingir o fundo. Então, ar foi fornecido por ventilador com vazão máxima de $1800 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o objetivo arrastar a umidade do material lavado. As Figura 4.14 a) e b) ilustram este equipamento.

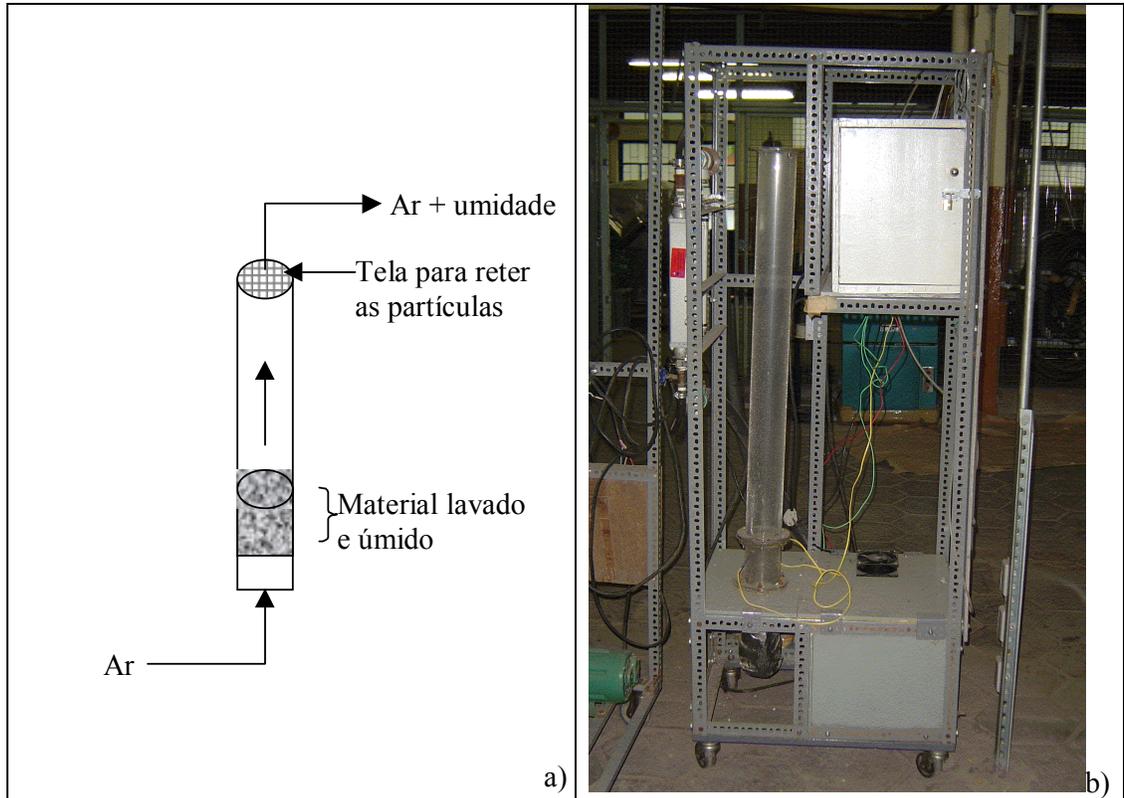


Figura 4.14: Esquema da secagem em leito fluidizado (a) e foto do equipamento utilizado (b)

4.8.5 Secagem com ar forçado

Uma quinta estrutura ainda foi proposta para secar o material no Departamento de Engenharia Química da UFRGS, com capacidade maior que a da secagem em leito fluidizado. Nesta, o material foi colocado até formar uma altura de 3 cm em um tambor de plástico de 1 m de altura e 0,6 m de diâmetro. Ar com uma vazão de até $7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ foi alimentado através de um soprador de fabricação Gema S.A. modelo RP.21.L na sua base fazendo com que ocorra a formação de um vórtice com o material. O material desumidificado ficou retido em uma tela de tecido com malha de 1 mm colocada no topo do tambor. A Figura 4.15 ilustra o método utilizado.

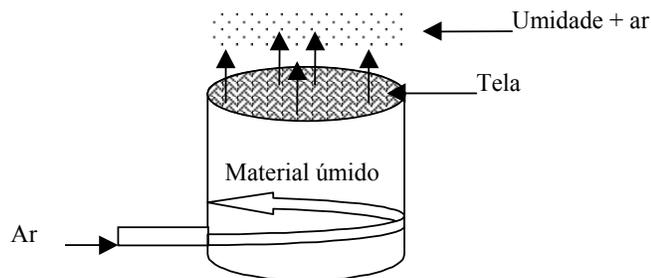


Figura 4.15: Secagem no tambor com ar

4.9 Aglutinação

Após a lavagem, o material plástico foi aglutinado para diminuir a massa específica aparente e ser processado por compressão. Este processo não necessitou que o material estivesse completamente seco, apenas que fosse deixado para escorrer. Foi utilizado um aglutinador com aproximadamente 100 cm de diâmetro e 100 cm de altura e motor de 30 HP, composto por duas facas rotativas inseridas na parte inferior de uma câmara cilíndrica. O interior do aglutinador é mostrado na Figura 4.16.



Figura 4.16: Visualização do aglutinador

Os plásticos foram inseridos no equipamento e agitados até que a massa começasse a plastificar. Água foi adicionada para resfriar a massa e para melhorar a adesão entre as partículas. Esta massa plástica foi agitada até que nenhum vapor seja liberado. Esta fase se tornou muito importante para que o material moído e lavado com massa específica menor que 1.0 g.cm^{-3} , pudesse ser alimentado nas máquinas de prensagem. A operação do equipamento é mostrada na Figura 3.3.

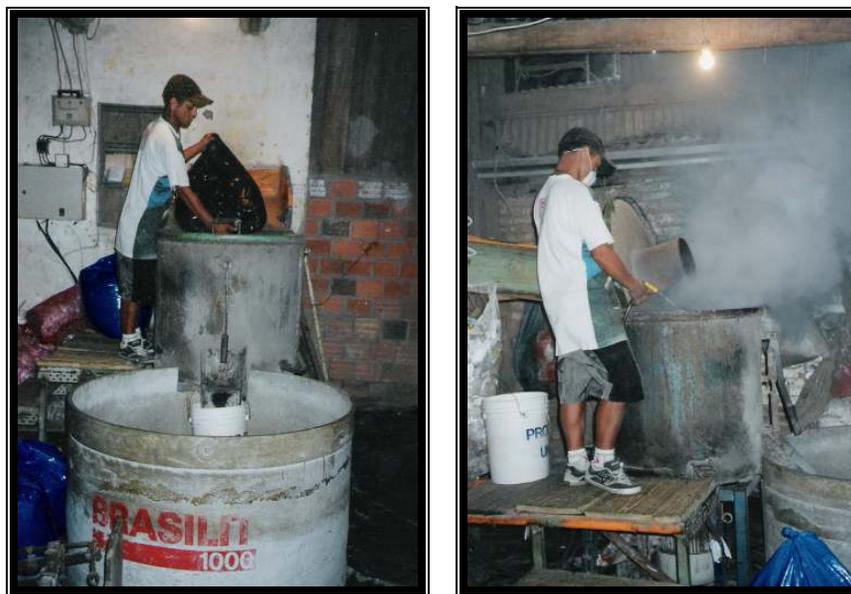


Figura 4.17: Inserção do material plástico no aglutinador e inserção de água na mistura.

Na saída do aglutinador foram colocados 3 pedaços de ímãs com altura aproximada de 10 cm e comprimento de 2 cm para que as partículas metálicas fossem retiradas da mistura e não interferissem em futuros processamentos.

4.10 Materiais processados

Os materiais estudados no presente trabalho foram divididos em 6 categorias conforme mostra a Figura 4.18 abaixo.

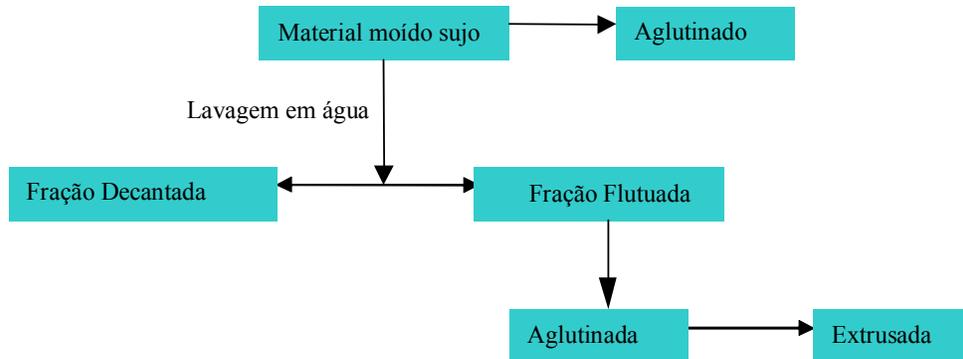


Figura 4.18: Tipos de materiais prensados

O material não lavado foi denominado no presente trabalho como "Sujo", o material decantado não aglutinado foi denominado como "Pesado" e a fração flutuada como "Leve". A Fração leve foi estudada em duas outras formas, uma aglutinada e outra que foi aglutinada e extrusada. A extrusão do material foi realizada na extrusora do CEFET-RS. Os dados são avaliados por Wassermann *et al.* (2002), e a extrusão ocorreu à uma temperatura de 120°C na primeira zona, 180°C na segunda zona, 190°C na terceira zona e 185°C na quarta zona, corrente de 17 Ampères e rotação de rosca da extrusora a 50 rpm. Demais informações estão presentes no referido trabalho.

O objetivo do presente trabalho é comparar e analisar as propriedades destes materiais.

4.11 Prensagem

O processo de prensagem foi realizado na empresa Ipiranga Petroquímica S.A. e foram necessários os seguintes aparelhos:

- Prensa 1 de fabricação COLLIN GmbH, modelo 300E com pressão hidráulica máxima de 240 bar com sistema de aquecimento ou resfriamento;
- Prensa 2 fabricada pela U.M. Cifali Construções Mecânicas Ltda, LUXOR modelo LPR com pressão máxima de 192 bar, com sistema de aquecimento e resfriamento.
- Balança com resolução de 0,1 g;
- Moldes de aço inoxidável do tipo positivo adequados aos ensaios a serem executados;

- Dispositivo para extração dos moldes;
- Termômetro digital
- Cronômetro
- Paquímetro
- Folhas de filme de poliéster e alumínio.

Primeiramente atingiu-se a temperatura desejada das placas para a prensagem do material. O tempo de aquecimento da prensa varia de equipamento para equipamento, por isso o ideal é que a prensagem seja realizada sempre na mesma máquina. Desta forma, centralizou-se todas as prensagens na prensa 1, realizando apenas as placas para testes de massa específica na prensa 2.

A amostra a ser prensada foi pesada na balança, testando-se primeiramente a quantidade padrão de 25 gramas de polietileno de alta densidade para o molde circular de raio de 17,5 cm para fabricar uma altura de placa de 1 cm. Este valor foi modificado empiricamente até que as espessuras para as placas a serem testadas mecanicamente fossem atingidas (devido à densidade aparente de cada material).

No molde vazio foi colocada uma folha de poliéster para que a amostra não se aderisse ao molde. Logo após, o material pesado foi colocado no molde e então uma nova folha de poliéster foi colocada por cima do material para que este não se aderisse à parte superior do molde após o processo de compressão. De acordo com a disponibilidade dos moldes na empresa Ipiranga Petroquímica S.A., o material escolhido era colocado em molde de aço inoxidável quadrado (QD) de 16 cm de aresta e cavidade de 20 mm de altura, em molde circular (D1) de diâmetro de 17,5 cm e altura de 20 mm ou em outro molde circular (D2) de 11,5 cm de diâmetro e 40 mm de cavidade. A Tabela 4.6 mostra a quantidade necessária para preparação de cada um dos corpos de prova.

Tabela 4.6: Quantidade necessária para fazer a prensagem no molde QD de acordo com o material utilizado

<i>Espessura (mm)</i>	<i>Extrusado (g)</i>	<i>Leve (g)</i>	<i>Sujo (g)</i>	<i>Teste mecânico</i>
1,0 ± 0,2	25	25	27	Tração
~2,0	50	50	50	Massa Específica
3,2 ± 0,2	80	80	85	Izod
4,0 ± 0,2	100	98	106	Charpy e Flexão

A prensagem do material decantado não pôde ser feita no molde quadrado (QD) por este ter cavidade muito pequena e o material não aglutinado ter massa específica aparente maior que as outras amostras. Desta forma, o material denominado "Pesado" foi prensado no molde D2 com cavidade de 40 mm para obtenção de placas com espessura superior a 2 mm e para placas de 1 mm, foi utilizado o molde D1. Os novos valores para

o molde D2 são mostrados na Tabela 4.7 abaixo. A desvantagem da utilização deste molde menor é que dependendo do número de corpos de prova necessários para os testes, uma outra placa deveria ser prensada.

Tabela 4.7: Quantidade necessária de material decantado para fazer a prensagem no molde D2

<i>Espessura (mm)</i>	<i>Decantado (g)</i>	<i>Teste mecânico</i>
1,0 ± 0,2	33 (molde D1)	Tração
~2,0	28,0	Massa Específica
3,2 ± 0,2	45,2	Izod
4,0 ± 0,2	58,0	Charpy e Flexão

O molde foi então colocado na prensa e o processo de prensagem foi inicializado. O molde deve ser justo (sem folgas no encaixe), de forma a não haver vazamento do material.

O processo de prensagem se divide em 3 etapas: aquecimento, fusão e resfriamento. Na Tabela 4.8 são mostrados os tempos das etapas de prensagem segundo a norma ASTM 1928/96 procedimento C, bem como a descrição de cada uma delas.

Tabela 4.8: Processo de prensagem

<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Tempo (min)</i>
Aquecimento do molde	Nesta etapa o molde fechado é colocado na placa inferior da prensa. Após esta atingir a temperatura de processamento desejada, o material se pré-plastifica.	4
Fusão do material	A placa superior da prensa encosta no molde e o pressiona com 10 kgf.cm ⁻² .	5
Resfriamento do molde	Neste momento, água a uma temperatura média de 30°C é circulada no molde para resfriar o material.	20

Após o resfriamento, a temperatura final da placa foi de aproximadamente 40°C para que pudesse ser manuseada pelo operador da máquina. Depois disso, o molde foi aberto com o auxílio de um extrator e a placa foi retirada com cuidado para não ser danificada.

4.12 Preparação dos corpos de prova para a determinação das propriedades mecânicas

Após a prensagem, as placas foram cortadas no tamanho estabelecido para cada corpo de prova. Os seguintes aparatos são necessários: paquímetro com precisão de 0,01 mm, serra circular, entalhadeira, micrômetro de precisão 0,01 mm, estilete e prensa pneumática.

Os corpos de prova para os testes de resistência à flexão e ao impacto Charpy e Izod, são cortados na serra circular onde suas dimensões de largura e comprimento são delimitadas conforme o estabelecido em cada uma das normas citadas no próximo item. Os corpos de prova para os testes de Izod devem ser entalhados com uma profundidade de $0,25 \pm 0,05$ mm. O entalhe é medido com o micrômetro. Após a confecção dos corpos de prova, estes devem ser rebarbados com a ajuda de um estilete, para que as rebarbas provenientes do corte pela serra não interfiram na realização dos testes.

As placas para confecção dos corpos de prova de tração e massa específica foram cortadas com gabaritos cortantes que são colocados em uma prensa pneumática. Neste caso os corpos de prova não precisam ser rebarbados. Os corpos de prova de massa específica devem ser entalhados com a serra circular até a metade do diâmetro da peça para que o teste possa ser realizado.

4.13 Avaliação das propriedades do material reciclado

Para cada uma das matérias-primas foram determinadas as seguintes propriedades: resistência à tração, resistência à flexão, determinação de massa específica média, teste de resistência ao impacto Charpy, teste de resistência ao impacto Izod. Os corpos de prova foram mantidos em uma sala climatizada com temperatura controlada de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade de $(50 \pm 5) \%$. Os testes foram realizados pelos técnicos da Ipiranga Petroquímica S.A. e propriedades foram testadas de acordo com os testes padronizados para os plásticos em geral.

4.13.1 Massa Específica

Os testes de massa específica foram realizados de acordo com a norma ASTM D792/98 em 3 corpos de prova circulares de diâmetro 2 mm e espessura aproximada de 2 mm que são imersos em um líquido, podendo ser água destilada, livre de ar ou desmineralizada. O material, antes de ser testado, deve permanecer por pelo menos 40 horas na sala climatizada (ASTM N.º 792, 1998).

4.13.2 Resistência à Flexão

Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D790/92 procedimento A, para materiais que se quebram em pequenas deflexões. Neste processo o corpo de prova é preso nas extremidades e uma força é aplicada no centro da peça. O corpo de

prova é defletido até que se quebre ou até a deformação máxima de 5 %, o que acontecer primeiro. Esta análise é realizada em pelo menos 7 corpos de prova retangulares de largura $10 \pm 0,2$ mm, comprimento 80 ± 1 mm e espessura de $4 \pm 0,2$ mm, podendo-se descartar 2 de seus valores quando o módulo de Young automático estiver mais longe do ponto médio. O material deve permanecer por pelo menos 40 horas ininterruptas em sala climatizada antes de ser testado (ASTM N.º 790, 1997).

4.13.3 Resistência à Tração

Esta propriedade serve para determinar a resistência à tração do material plástico reciclado produzido por compressão. Estes testes de resistência à tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D638/97 tipo I e tem como objetivo avaliar os corpos de prova quando submetidos a uma tensão sob condições preestabelecidas de preparo dos corpos de prova, temperatura e velocidade de tração. Esta análise é realizada em pelo menos 5 corpos de prova retangulares de largura $19 \pm 0,75$ mm, largura da seção estreita (pescoço da peça) de $13 \pm 0,5$ mm, comprimento 165 mm e espessura superior a 1 mm, podendo-se descartar 2 de seus valores quando o módulo de Young automático estiver mais longe do ponto médio. O material deve permanecer por pelo menos 40 horas ininterruptas na sala climatizada antes de ser testado (ASTM N.º 638, 1997).

4.13.4 Resistência ao Impacto Izod

Esta análise de resistência ao impacto Izod foi realizada de acordo com a norma ASTM D256/97, método “A”. Esta análise é realizada em pelo menos 8 corpos de prova retangulares de largura 13 mm, comprimento 60 mm e espessura de $3,2 \pm 0,2$ mm. O material deve permanecer por pelo menos 40 horas ininterruptas na sala climatizada antes de ser testado (ASTM N.º 256, 1997).

4.13.5 Resistência ao Impacto Charpy

Este teste de resistência ao impacto Charpy foi realizado de acordo com a norma ISO 179/1A-1982. Esta análise requer 6 corpos de prova retangulares de largura $10 \pm 0,2$ mm, comprimento $80 \pm 0,2$ mm e espessura de $4 \pm 0,2$ mm. No centro do corpo de prova é feito um entalhe triangular de base de $8 \pm 0,2$ mm. O material deve permanecer por pelo menos 3 horas ininterruptas na sala climatizada antes de ser testado (ISO 179, 1982).

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos na coleta, pré-tratamento e reciclagem mecânica do material plástico coletado no Centro de Triagem do Aterro Sanitário da Zona Norte em Porto Alegre.

5.1 Coleta dos resíduos plásticos

Observou-se que dentre os materiais rejeitados pela unidade de triagem do Aterro da Zona Norte, o volume de material plástico se sobressai em relação aos outros materiais, representando mais que 50 % do total conforme mostra a Figura 5..



Figura 5.1: Material rejeitado pelo centro de triagem

Durante a coleta, foi essencial a utilização de botas e luvas por parte do pessoal que coletava o material dentro do contêiner de rejeitos, para que não ocorresse contaminação do indivíduo por rejeitos prejudiciais à saúde, como sangue de alimentos, resíduos hospitalares, roedores mortos e outros vermes, e também para prevenir lesões provocadas por material cortante como garrafas, lâmpadas quebradas, etc.

5.2 Caracterização da amostra

As amostras coletadas foram caracterizadas conforme os métodos do capítulo anterior e apresentaram a seguinte distribuição de polímeros mostrada na Tabela 5. abaixo.

Tabela 5.1: Percentual em peso de polímero contido em cada amostra

	<i>Coleta 1</i> 08/2000 (%)	<i>Coleta 2</i> 12/2000 (%)	<i>Coleta 3</i> 01/2002 (%)	<i>Coleta 4</i> 02/2002 (%)
PP	15,14	13,79	14,73	10,23
PEAD	7,43	14,62	20,34	22,33
PEBD	34,86	22,52	27,32	21,59
PS	22,34	36,70	9,32	13,76
PVC	4,91	0,54	9,05	8,66
PET	14,75	11,82	13,64	17,31
Outros	0,57	0,00	5,61	6,14

A primeira coleta foi realizada com o objetivo de se identificar os principais plásticos que são rejeitados pelo centro de triagem do Aterro da Zona Norte de Porto Alegre.

Na segunda coleta foi recolhida do contêiner uma quantidade 3 vezes maior do que a primeira para que se pudesse realizar os experimentos de lavagem do material. Como a segunda coleta foi realizada no período que antecedia o natal do ano 2000, foi observada uma grande quantidade de PS Expandido, proveniente basicamente de embalagens. Observa-se também que a quantidade de PVC é a menor de todas as análises no mesmo período.

A terceira e quarta coletas possuem resultados diferenciados dos demais, pois foram realizadas aproximadamente um ano após as coletas iniciais. Constatou-se visualmente que houve uma melhora tanto na triagem do material que iria para o contêiner de rejeitos, como na separação do lixo seco do lixo orgânico que seguia para o Centro de Triagem, provavelmente devido a uma melhor conscientização da importância da triagem por parte da população. Ou seja, o lixo tem chegado às mãos dos recicladores cada vez mais limpo e descontaminado. Esta última amostra também foi composta, na sua maioria, por sacos plásticos, provenientes de supermercados e de embalagens de alimentos.

A composição de lixo seco enviado para cada galpão de triagem variou conforme a época do ano. As diferenças de consumo podem ser associadas com os hábitos da população. A Figura 5.2 abaixo mostra a distribuição dos materiais plásticos conforme a coleta.

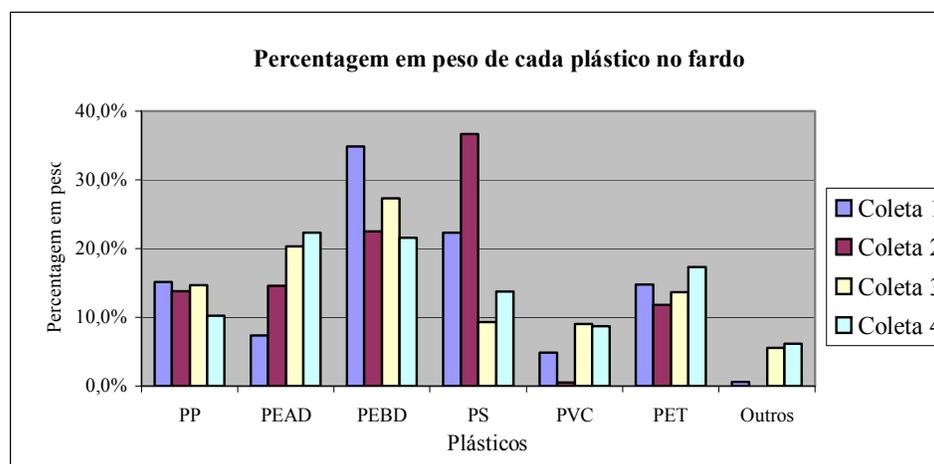


Figura 5.2: Distribuição de plásticos por coleta

A quantidade de plástico selecionada e vendida também varia conforme a capacidade de separação e identificação dos operadores de cada galpão. O material plástico é o mais difícil de ser caracterizado devido à ampla gama de polímeros do mercado e à semelhança visual entre eles. Os principais contaminantes das embalagens plásticas encontradas nos rejeitos do centro de triagem de Porto Alegre são mostrados na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2: Principais contaminantes das embalagens plásticas encontradas no rejeito do centro de triagem

<i>Material</i>	<i>Forma mais comum encontrada</i>	<i>Contaminante</i>
PP	Potes, fibras, filmes e utilidades domésticas	Margarina, sorvete, iogurte, papel, cola, etc.
PS	Bandejas de carne, potes de iogurte, copos e pratos descartáveis e embalagens de eletrodomésticos	Sangue, iogurtes, gordura, sobras de festas, metais derivados como grampos, papel, etc.
PVC	Filmes envoltivos de alimentos, frascos de material de limpeza, mangueiras, canos	Sangue, produtos químicos, papel colado aos filmes para identificação do produto, restos de comida, etc.
PEAD	Filmes, frascos, sacolas de supermercado	Todo tipo de contaminantes, pois normalmente as sacolas são utilizadas para conter todos os resíduos destinados ao galpão, como metais, vidros, papel e comida, etc.
PEBD	Sacos, lonas	Restos de pão, arroz, etc.
PET	Frascos, bandejas de ovos e sanduíches, garrafas de refrigerante	Refrigerante, produtos de limpeza, comida, etc.
Outros	Filmes co-extrudados com outros materiais	Alimentos

Ainda que encontrados no contêiner de rejeitos, materiais classificados como perigosos tais como filmes de fotografia, frascos de materiais hospitalares, seringas, lâminas de Raios-X, sacos com animais mortos (ratos), insetos, etc, não foram utilizados na reciclagem mecânica do presente trabalho.

Foi observado que apesar de existir uma legislação que incentive a utilização de números identificadores para cada tipo de resina, muitos artigos ainda não possuem identificação. Desta forma, muitos plásticos são enviados para o contêiner de rejeitos por não serem identificados. Mas a falta de identificação dos polímeros não é o único fator que determina que os materiais sejam enviados para o aterro sanitário. Também o fato de existirem muitos contaminantes faz com que não existam compradores para determinado material. Este contexto pode ser modificado, se o pessoal que separa os resíduos for mais treinado para identificar os materiais, se os fabricantes adotarem as normas de identificação de materiais e também se a população consumidora fizer uma separação mais eficiente nas suas residências.

5.3 Moagem

O primeiro fardo demorou algumas semanas para ser moído e por isso ocorreu o aparecimento de alguns vermes e insetos na amostra. Por esta razão, os demais fardos foram moídos logo após serem coletados de forma a não favorecer a proliferação destes. A alta temperatura do moinho contribuiu para que ocorresse uma degradação da matéria orgânica presente nas amostras coletadas e também não foi identificado aparecimento de vermes nas amostras moídas logo após a coleta.

Na alimentação do moinho utilizado neste trabalho, materiais constituídos de plásticos rígidos como garrafas, discos, calotas, foram colocados intercaladamente com materiais flexíveis como filmes ou potes pequenos de iogurte, pois estes “estilhaçavam”, e as vezes “saltavam” para fora do equipamento logo após alimentados, o que colocava em risco a integridade dos olhos do operador. Por esta razão, a utilização de óculos de segurança, luva e máscara é fundamental. Filmes, garrafas, potes e frascos foram moídos juntos, sem diferenciação de formas. Contrariando a expectativa da dificuldade de moer filmes, o processo foi relativamente fácil, exceto filmes muito longos, com comprimento acima de 50 cm, que se enrolavam nas lâminas do moinho e provocaram paradas no equipamento.

Algumas vezes, o moinho se aqueceu excessivamente devido ao atrito das lâminas com filmes ou pedaços de PS Expandido (isopor[®]), fazendo uma pré-plastificação do material que estava sendo processado. Isto requeria a parada do equipamento e completa limpeza de suas lâminas para que pudesse ser colocado em operação novamente. Embalagens grandes feitas de PS Expandido também dificultaram a moagem, pois a superfície plana destas embalagens tende a deslizar nas facas do moinho e parar o rotor devido à resistência do bloco.

Foi constatado que, apesar do cuidado para separar os metais (pregos, grampos, tampas e latas) do material plástico, muitas peças metálicas acabaram sendo alimentadas ao moinho, danificando suas lâminas. A presença destas partículas metálicas pode danificar os equipamentos de processamento subseqüentes como injetoras e extrusoras, logo a presença destes metais deve ser minimizada ao máximo.

Apesar da grande variedade de formas e de tipos de plásticos, rígidos ou flexíveis e embalagens confeccionadas com mais de um tipo de polímero, foi obtido material com granulometria de até 8 mm, correspondente à malha da peneira do moinho.

5.4 Homogeneização

Os fardos resultantes das coletas realizadas no Aterro da Zona Norte foram misturados e homogeneizados depois de serem moídos para que se obtivessem resultados semelhantes na lavagem.

O único inconveniente na etapa de homogeneização foi o fato de haver uma grande quantidade de material moído com peso específico muito baixo, o que fez com que esta etapa tivesse que ser feita em ambiente fechado para que o material não se dispersasse com qualquer corrente de ar existente.

5.5 Lavagem

Durante o processo de lavagem, o material se dividiu em duas fases, uma sobrenadante composta por polímeros que possuem massa específica menor que a da água ($1,0 \text{ g.cm}^{-3}$) como PP e PE, e uma fase decantada com massa específica maior que a da água, como PET, PVC e PS. O PS possui um comportamento diferenciado, pois o PS Expandido, devido à oclusão de ar neste polímero, fica retido na fase sobrenadante, com massa específica aparente menor que 1 e o PS não expandido, que possui massa específica de $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$, decanta. O material lavado foi separado em 3 partes:

- Fase sobrenadante: composta por PP, PEAD, PEBD e PS Expandido;
- Fase decantada e retida na tela de malha de 2 mm do tanque de lavagem: composta por PS rígido, PET e PVC, e algum resquício de papel e metal;
- Fase decantada que passou pela tela de malha de 2 mm e seguiu para o fundo do tanque de lavagem: composta basicamente por papel, areia e algumas partículas de material moído que atingiram granulometria menor que 2 mm. Também são encontrados restos de metais, provenientes de parafusos, tampas e grampos e restos de vidro.

Foram analisados dois tipos de lavagens, uma com o material estocado por mais de 6 meses em sacos de lixo de polietileno fechados após a moagem e outra onde o material

foi lavado alguns dias após sua moagem. Abaixo seguem os resultados obtidos em cada um destes processos.

5.5.1 Análise dos efluentes gerados pela amostra que foi armazenada por período superior a 6 meses

Estas amostras foram moídas sujas e estiveram estocadas por um período superior a 6 meses, para que as instalações dos tanques para a lavagem fossem concluídas. A Tabela 5.3 mostra os resultados das análises de efluentes resultantes da lavagem do material.

Tabela 5.3: Resultados da análise de efluentes da amostra armazenada por mais de 6 meses

<i>Parâmetro</i>	<i>Unidade</i>	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Amostra 4</i>	<i>Limites</i>
		<i>03/07/01</i>	<i>21/08/01</i>	<i>25/10/01</i>	<i>22/11/01</i>	<i>(SSMA, 1989)</i>
Quantidade lavada em 500 L	kg	8	16	23	23	
Concentração	g.L ⁻¹	16	32	46	46	
DBO 5 dias	mg.L ⁻¹ O ₂	55,0	70,0	158	184	<120
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	116,0	184,0	362	337	<360
Surfactantes	mg.L ⁻¹ ABS	0,1	0,2	2,7	2,4	<2
Nitrogênio total	mg.L ⁻¹ N	4,0	8,4	20	18	<10
Coliformes fecais	N.M.P./100 mL	<2	<2	<2	<2	<300
Condutividade à 25°C	microS.cm ⁻¹	218	310	420	455	
Fósforo Total	mg P.L ⁻¹	3	3,2	9,8	6,7	<1
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	69	77	47	60	<120
Sólidos Sedimentáveis	mg.L ⁻¹	0,5	0,2	3,5	0,9	<1
pH a 20°C	-	6,5	7,1	6,2	7,1	6~8,5
Óleos e Graxas	mg.L ⁻¹	<20	<20	214	25	<30

A primeira amostra foi lavada de forma a se testar o sistema de lavagem implementado. A quantidade de material lavado foi de aproximadamente 8 kg de material moído (correspondente ao volume aproximado de 100 L do saco de PEBD). Foi feita a análise destes parâmetros para determinar a qualidade da água de lavagem resultante. Os resultados desta análise, excetuando-se fósforo total, estão dentro dos limites estipulados pela Secretaria de Saúde e Meio Ambiente (SSMA). Nesta amostra, o volume total das duas primeiras coletas ainda não havia sido misturado, pois só era desejado saber se o processo funcionaria ou não.

Na segunda amostra lavada, o volume foi de aproximadamente 16 kg de material moído (correspondente ao volume aproximado de dois sacos de PEBD de 100 L). Nesta

amostra, tal qual na primeira, somente a análise de fósforo total esteve fora dos limites estipulados. Por isso aumentou-se mais a quantidade de material a ser lavado.

Na terceira lavagem com aproximadamente 23 kg (triplo do material utilizado inicialmente), os parâmetros observados chegam em torno do valor máximo estipulado pelo órgão ambiental. Desta forma, os demais experimentos foram realizados utilizando-se o peso aproximado de 23 kg de material lavado para cada 500 L de água (46 g.L^{-1}). Ao se comparar com os dados sugeridos para a lavagem de Ehrig (1992) que utilizou uma quantidade de 60 g.L^{-1} e tempo de residência de 10 minutos, vemos que a quantidade é bem inferior, também porque no caso da literatura, o tanque é agitado com um misturador de pás e utiliza detergente.

Com a quantidade de 23 kg de material foram detectados um número maior de parâmetros fora dos limites estipulados como surfactantes, nitrogênio total, fósforo total, sólidos suspensos e óleos e graxas. Verificou-se que o teor de óleos e graxas que aparece na amostra 3 está muito superior ao das amostras anteriores. Devido ao fato de não haver efluente reserva desta lavagem, não foi possível se verificar se houve um erro de medição nesta amostra. Os sólidos suspensos estão dentro dos valores estabelecidos.

Na quarta lavagem, utilizando-se 23 kg, os parâmetros avaliados foram similares aos da terceira lavagem. Na análise de efluentes deste material, observou-se que os limites de DBO, surfactantes não excederam em muito os limites da SSMA. Já a DQO, chegou no limite especificado pela legislação, enquanto nitrogênio total e fósforo total excederam os valores limitantes. Afora a amostra 3, todos os valores de óleos e graxas se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pela legislação.

Apesar do material de lavagem ser sempre o mesmo, observa-se que a variabilidade entre as amostras 3 e 4 são da ordem de 20 a 30%. Isto deve-se ao fato de que como o material processado é muito heterogêneo e proveniente de lixo, não existe forma de garantir que os resultados da lavagem tenham resultados mais próximos. Os resultados de surfactantes e óleos e graxas, mostram que existe uma grande quantidade de embalagens utilizadas para este propósito que não são separadas no centro de triagem do Aterro de Porto Alegre e que seguem para o contêiner de rejeitos. Uma melhora nestes resultados, significa uma melhor separação destes componentes.

O pH do efluente também não precisa ser corrigido pois se enquadra dentro dos padrões exigidos.

5.5.2 Análise dos efluentes gerados pela amostra que foi moída e lavada logo após a coleta

Este processo foi realizado como forma de verificar se existe alguma diferença entre lavar o material após ser moído ou deixá-lo estocado por algum tempo, pois a análise dos efluentes da lavagem do material estocado não estava muito fora dos padrões especificados pelo órgão regulamentador. Foi então realizada mais uma coleta de material para se testar se os valores seriam diferentes para o material lavado logo após sua coleta e moagem. Utilizando a mesma quantidade de material da lavagem anterior de 23 kg, a Tabela 5.4 mostra os resultados das análises de efluentes resultantes da lavagem do material moído dentro de um período máximo de 2 semanas.

Tabela 5.4: Resultados da análise de efluentes da amostra que foi moída e lavada logo após a coleta

<i>Parâmetro</i>	<i>Unidade</i>	<i>Amostra 1</i> <i>18/01/02</i>	<i>Amostra 2</i> <i>21/02/02</i>	<i>Limites</i> <i>(SSMA, 1989)</i>
DBO 5 dias	mg.L ⁻¹ O ₂	250	340	<120
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	815	690	<360
Surfactantes	mg.L ⁻¹ ABS	2,3	2,4	<2
Nitrogênio total	mg.L ⁻¹ N	15	16	<10
Coliformes fecais	N.M.P./100 mL	<2	<2	<300
Condutividade	MicroS.cm ⁻¹	358	393	
Fósforo Total	mg P.L ₁	3,1	3,2	<1
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	271	299	<120
Sólidos Sedimentáveis	mg.L ⁻¹	5	2	<1
pH a 20°C	-	6,9	6,7	6~8,5
Óleos e Graxas	mg.L ⁻¹	30	22	<30
Quantidade lavada	kg	23	23	

Na Tabela 5.4 observa-se que a maioria dos parâmetros excederam os limites impostos pela SSMA. Para melhor comparação entre as lavagens de 23 quilos de material, a Tabela 5.5 a seguir mostra um comparativo entre as médias obtidas de efluente do material estocado por mais de 6 meses e do material lavado em até duas semanas.

Tabela 5.5: Comparação entre as médias dos valores obtidos na lavagem do efluente armazenado por período superior a 6 meses e da lavagem em até 2 semanas com os limites impostos pela SSMA.

<i>Parâmetro</i>	<i>Unidade</i>	<i>Média Lavagem</i>	<i>Média Lavagem em</i>	<i>Limites (SSMA, 1989)</i>
		<i>após 6 meses</i>	<i>até 2 semanas</i>	
		<i>2001</i>	<i>2002</i>	
DBO 5 dias	mg.L ⁻¹ O ₂	171	295	<120
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	349.5	752.5	<360
Surfactantes	mg.L ⁻¹ ABS	2.55	2.35	<2
Nitrogênio total	mg.L ⁻¹ N	19	15.5	<10
Coliformes fecais	N.M.P./100 mL	<2	<2	<300
Condutividade à 25°C	microS.cm ⁻¹	437.5	375.5	
Fósforo Total	mg P.L ⁻¹	8.25	3.15	<1
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	53.5	285	<120
Sólidos Sedimentáveis	mg.L ⁻¹	2.2	3.5	<1
pH a 20°C	-	6.65	6.8	6~8,5
Óleos e Graxas	mg.L ⁻¹	25*	26	<30

* Descartado o valor de 214 mg.L⁻¹ de Óleos e Graxas, por ser considerado erro de medição.

Na análise de efluentes deste material moído e imediatamente lavado, observou-se que os limites de DBO e DQO excederam em muito os limites estabelecidos, representando quase o dobro dos valores da lavagem do material estocado no experimento anterior. Isto leva a supor, que para o caso em questão, a estocagem do material moído e ensacado faz com que ocorra uma degradação da matéria orgânica presente.

O nível de surfactantes excedeu levemente o limite estabelecido pela SSMA, mas pouco se diferenciou da lavagem anterior, o que faz com que se conclua que este nível de surfactantes é aproximadamente constante para a lavagem de 23 kg. Normalmente excedendo em 15% o valor estabelecido pela lei.

A variação da concentração de nitrogênio na amostra foi quase constante para as amostras estocadas e lavadas imediatamente excedendo os parâmetros da SSMA, sendo os resultados da lavagem imediata aproximadamente 15% menores que a da lavagem do material estocado.

A presença de coliformes fecais, que são os indicadores de possíveis organismos patogênicos causadores de doenças, não foi detectada em nenhum dos casos, pelo método de análise de efluente utilizado. A completa isenção de coliformes não pode ser garantida pois este método não detecta menos que 2 coliformes em 100 mL de efluente.

Observa-se uma pequena diminuição de aproximadamente 10 % da condutividade do efluente em relação à do material estocado.

Foi observada uma redução brusca na concentração de fósforo total na amostra lavada imediatamente em relação à amostra que foi estocada. A quantidade de fósforo no efluente da amostra estocada foi mais que o dobro da amostra lavada imediatamente, indicando que a quantidade de matéria orgânica presente era muito superior à da segunda lavagem.

Sólidos Suspensos mostraram uma grande variação quando relacionados com a amostra estocada e excederam muito os limites estabelecidos pela SSMA (1989). Os valores da lavagem imediata chegaram a atingir, nas condições deste experimento, um valor 5 vezes maior que a do material estocado. Sólidos Sedimentáveis mostraram uma grande variação nesta amostra, mas ainda assim, excederam o valor esperado. Os valores da lavagem imediata chegaram a atingir, nas condições deste experimento, quase o dobro dos do material estocado. Este aumento nos sólidos podem estar relacionados ao fato de uma existência maior de finos na amostra que foi lavada imediatamente.

Ambas as amostras se mantiveram dentro do limite de pH exigido pela SSMA, em torno de 6,5 a 7,1.

Óleos e graxas também se mantiveram dentro dos limites exigidos pela SSMA. Desconsiderando a Amostra 3, por suspeita de erro de medição, os valores se mantiveram entre 22 e 30 mg.L⁻¹ para a quantidade de 23 kg em 500L.

Os valores de análise de efluente apresentados anteriormente são completamente dependentes dos materiais comercializados pelo centro de triagem em questão, logo podem variar de unidade para unidade de triagem, levando-se em conta os resíduos descartados por cada um. Por exemplo, uma unidade que não comercializar as embalagens de detergente líquido para louça terá resultados superiores no nível de surfactantes do efluente de lavagem.

5.5.3 Análise da borra resultante do processo de lavagem

A parcela que atingiu o fundo do tanque, passando pela cesta com tela de malha de 2 mm, foi analisada para verificar quais as percentagens de polímeros que podiam estar contidas nelas e que seriam refugadas pelo processo. O método aplicado foi o método da flutuação-decantação (ou flutua-afunda) em 4 estágios teóricos para resíduos plásticos misturados como mostrado na Figura 4.11 do capítulo anterior. Após o preparo das soluções, a borra do fundo do tanque de lavagem foi colocada nos recipientes para se observar se a separação seria possível pelo método em questão.

A utilização deste método foi insatisfatória para a mistura de plásticos estudada neste trabalho. Como os plásticos analisados são pós-consumo, a maioria deles possuem a sua massa específica alterada por cargas adicionadas aos polímeros no momento do processamento fazendo com que sua massa específica possa ser confundida com a de

outros plásticos. Outro fator importante foi o nível de contaminação do material e o baixo tamanho da partícula (menor que 2 mm, diâmetro da malha da cesta), que poderiam fazer com que a mistura fosse arrastada para o fundo com papel, ou mesmo metais e não voltassem mais à superfície por estarem agregadas ao material. O fator de forma do grão moído também influencia na sua separação.

Observou-se a olho nu, que a borra resultante da lavagem continha basicamente papel, algumas partículas de metal e alguns finos de plásticos moídos.

Após a retirada da borra do tanque de lavagem, foi realizada a limpeza do mesmo com água corrente para posterior repetição do processo de lavagem, sem interferência de material da lavagem anterior.

5.6 Secagem

A secagem foi uma etapa limitante do processo de reciclagem. A idéia inicial era que todo o material lavado fosse seco ao ar livre para que o custo do processo se mantivesse baixo. No entanto, em períodos chuvosos, este método não mostrou ser um processo viável pois o tempo de secagem do material é muito longo.

Uma parte do material lavado foi perdida devido ao vento durante a secagem ao ar livre. Outra pequena parcela de plástico foi perdida também por conter partículas com tamanho inferior aos 2 milímetros da malha da tela de polipropileno que reveste a estrutura de secagem ao ar livre.

5.6.1 Secagem ao ar livre sob lona plástica

Foram necessárias mais de duas semanas para secar 8 kg de material utilizando este procedimento. O principal motivo desta demora para secar foi que, como a lona estava colocada simplesmente ao nível do solo, a água empoçava na parte inferior do material e, desta forma a parte superior estava seca e a parte de baixo sempre úmida.

5.6.2 Secagem sobre uma cama com estrutura de canos de PVC

Como o processo de secagem anterior não se mostrou suficientemente eficiente, um segundo procedimento foi testado. A estrutura em forma de cama, afastada 30 cm do solo cedeu devido ao peso do material úmido envergando os canos de PVC, fazendo com que a tela tocasse no chão e empoçando água sob o material como no caso anterior. Desta forma não foram secos mais que 5 ou 6 kg de material a cada batelada, num tempo aproximado de uma semana.

5.6.3 Secagem em estrutura de metal

Este procedimento foi realizado com o intuito de diminuir o tempo de secagem da batelada de 23 kg de material lavado. Neste caso, a estrutura não cedeu com o peso do material como na estrutura anterior.

Quando as condições climáticas estavam favoráveis (com temperaturas acima de 25°C), e se o material fosse coberto ao anoitecer, o tempo de secagem era de aproximadamente 4 dias. Como esta estrutura não envergava, este foi o método mais eficiente para a secagem ao ar livre.

5.6.4 Secagem em leito fluidizado

Este processo foi utilizado visando diminuir o tempo de secagem do material. O material foi colocado em uma cesta metálica com tela de malha de 1,0 mm e foi inserido ar de forma ascendente no equipamento, controlado por meio de válvula.

A quantidade seca por este processo foi muito pequena (aproximadamente 0,5 kg) por batelada. A maior dificuldade encontrada foi determinar a vazão de ar do equipamento, porque em baixa vazão o material permanecia junto à cesta arrastando apenas uma pequena quantidade de água e quando a vazão era alta (até um máximo de 1800 L.min⁻¹) todas as partículas foram arrastadas para o topo do equipamento como um êmbolo, por causa dos diferentes formatos de partículas dos materiais e diferentes densidades do material.

A dificuldade operacional de controle de vazão não permitiu uma boa secagem do material. Outra dificuldade encontrada foi que como o processo era feito em batelada, e com isso a carga e descarga do material exigiam a desmontagem e montagem do equipamento.

5.6.5 Secagem com ar em um tambor

Um dos principais inconvenientes deste processo foi que, quando colocado no tambor, o material plástico aderiu às paredes deste. Quando ar frio entrava no equipamento, este criava um vórtice e as partículas acabavam se deslocando para o topo da estrutura, que era coberta com uma tela, de forma que o material ficasse retido e a umidade passasse por ela. Neste caso a secagem também não foi bem sucedida, provavelmente porque a altura do equipamento era pequena (1 m).

Outro inconveniente neste sistema foi o fato de que este equipamento também não era de alimentação contínua, devendo ser desmontado para que o material fosse retirado da estrutura a cada batelada. Estes problemas de secagem com ar talvez possam ser solucionados com a construção de um equipamento projetado especificamente para a secagem deste tipo de material plástico.

5.7 Aglutinação

A aglutinação do material úmido foi o meio mais eficiente para resolver vários problemas encontrados na preparação do material que deveria ser utilizado no processo de compressão. O primeiro deles foi que o material lavado não pôde ser alimentado diretamente nos equipamentos de processamento, por possuir um baixo peso e grande volume, então a aglutinação, por meio do calor das lâminas do aglutinador e da água, fez com que as partículas se aglomerassem obtendo um tamanho de partícula menor e aumentando sua massa específica aparente.

Como o processo utiliza a água, então a melhor proposta para o material deste trabalho é que os plásticos sejam lavados em água e deixados escorrer por um período de 1 hora na estrutura de metal, de forma a fazer com que o material perca um pouco da água contida nele, facilitando também o transporte até o aglutinador. Com a aglutinação, a mistura plástica obtida pôde ser encaminhada aos equipamentos de processamento por compressão fazendo com que a mistura possuísse uma densidade aparente adequada para a prensagem.

Ímãs foram colocados na saída do aglutinador para que as partículas metálicas que não foram separadas manualmente fossem retidas para prevenir desgastes aos equipamentos futuros de processamento. A Figura 5.3 mostra um ímã com as partículas metálicas aderidas após a aglutinação.



Figura 5.3: Partículas metálicas aderidas ao ímã

Como se observa, as partículas metálicas atraídas pelos ímãs são normalmente cliques, grampos, pregos ou tampas de garrafas. A separação dos metais da amostra plástica é vital para o processamento em equipamentos como injetora e extrusora, pois danificam as roscas destes equipamentos e mesmo os moldes utilizados.

5.8 Moldagem por compressão

Durante o processo de prensagem, as temperaturas das placas superiores e inferiores são mostradas no monitor da prensa em graus Celsius. Para avaliar as propriedades do

material foi inserido no centro do molde um termopar, que monitorou a temperatura interna do material que estava sendo fundido. Isto se faz necessário devido ao fato dos plásticos em geral serem maus condutores de calor, possuindo temperatura no centro do moldado diferente das placas metálicas.

Após a prensagem, iniciou-se o processo de resfriamento da placa com água de um tanque de resfriamento durante 20 minutos. Neste processo é necessário que a taxa de resfriamento seja linear conforme exige a norma ASTM 1928/96 procedimento C. Para isto foi determinada experimentalmente uma vazão de água para resfriar a placa. Este valor foi medido quando a temperatura do material chegou a 150 °C (baseada no caso de polietilenos) e a cada 30 segundos foi verificado o decréscimo de temperatura do material no molde durante 4 minutos com o auxílio do cronômetro. Depois foi montada uma tabela onde o coeficiente da reta angular formada pela plotagem dos pontos deve ser de 15 ± 2 . Se o material estiver com esta especificação os corpos de prova podem ser cortados para realizar os testes mecânicos, caso contrário, deve ser descartado e realizada uma nova compressão. A temperatura da água do tanque não pode ultrapassar os 32 °C.

A vazão de água necessária para manter a taxa de resfriamento dentro do limite esperado variou conforme o tipo de molde. Para a placa testada para massa específica (espessura de 2 mm), a taxa de resfriamento não é requerida, logo a vazão foi ajustada para a máxima possível. Para as prensas utilizadas, as vazões de água de resfriamento são mostradas de acordo com o tipo de molde na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Vazões de água de resfriamento ($L.h^{-1}$) para cada espessura de placa (mm)

<i>Espessura da placa (mm)</i>	<i>Molde redondo(L.h-1)</i>	<i>Molde quadrado (L.h-1)</i>
1,0	180	300
3,2	200	350
4,0	300	400

Foram processados 6 tipos de matérias primas por compressão: material moído sujo; material moído sujo e aglutinado; material moído lavado sobrenadante; material moído lavado sobrenadante e aglutinado; material moído lavado sobrenadante, aglutinado e extrusado; material moído lavado decantado. De acordo com a caracterização média das amostras do material coletado no centro de triagem, considerou-se que a lavagem separou totalmente os polímeros por densidade. Neste caso a quantificação das contaminações não foi possível devido aos formatos diferentes, ou à aderência às partículas plásticas. A composição média de cada uma destas misturas é dada na Tabela 5.7 a seguir.

Tabela 5.7: Composição média de polímeros das amostras coletadas no contêiner de rejeitos.

<i>Polímero</i>	<i>Material Sujo</i>	<i>Fase Sobrenadante e/ou aglutinada e/ou extrusada</i>	<i>Fase Decantada</i>
PP	13,7%	25,1%	
PEAD	14,9%	27,3%	
PEBD	26,1%	47,6%	
PS	25,6%		56,4%
PVC	4,1%		9,1%
PET	13,7%		30,2%
Outros	1,9%		4,3%

Primeiramente foi realizada uma tentativa de prensar o material moído sujo, porém devido à baixa massa específica aparente, não foi possível a confecção de placas para os corpos de prova com os moldes disponíveis.

Logo após foram testadas as parcelas decantadas e sobrenadantes resultantes da lavagem que foram secas ao ar livre, sem sofrer o processo de aglutinação. Neste caso, a massa específica aparente do material sobrenadante é inferior à do material decantado. O material sobrenadante não aglutinado apresentou dificuldades de ter seu volume contido dentro dos moldes disponíveis na empresa (de até 4 cm de altura), conseqüentemente impossibilitando a confecção das placas com espessuras maiores que 1 mm para realizar os testes mecânicos. Com isso, somente o material decantado pôde ter suas propriedades avaliadas.

Foram então excluídos dos testes mecânicos, os materiais moído sujo (que não sofreu o processo de aglutinação) e o material sobrenadante limpo não aglutinado, por falta de moldes com cavidade superior à 4 cm.

Devido à sua baixa massa específica aparente, o material lavado sobrenadante e o material sujo foram aglutinados para aumentar sua massa específica aparente, tornando a confecção das placas possível.

Foram realizados testes com o material limpo sobrenadante extrusado segundo o perfil de temperatura escolhido por Wassermann *et al* (2002). Não é recomendável que material sujo (aglutinado ou não) seja extrusado sem prévia lavagem, pois uma pequena quantidade de PVC na mistura polimérica pode liberar Cloro com o aumento da temperatura de processamento e ser suficiente para danificar as partes metálicas do equipamento.

A Figura 5.4 mostra o aspecto visual de cada uma das matérias-primas que foram processadas por compressão: (a) material limpo sobrenadante (b) material limpo decantado (c) material limpo aglutinado (d) material limpo aglutinado e extrusado. O material limpo aglutinado e o sujo aglutinado têm aproximadamente a mesma aparência cinza esverdeado como no quadro c) da Figura 5.4.

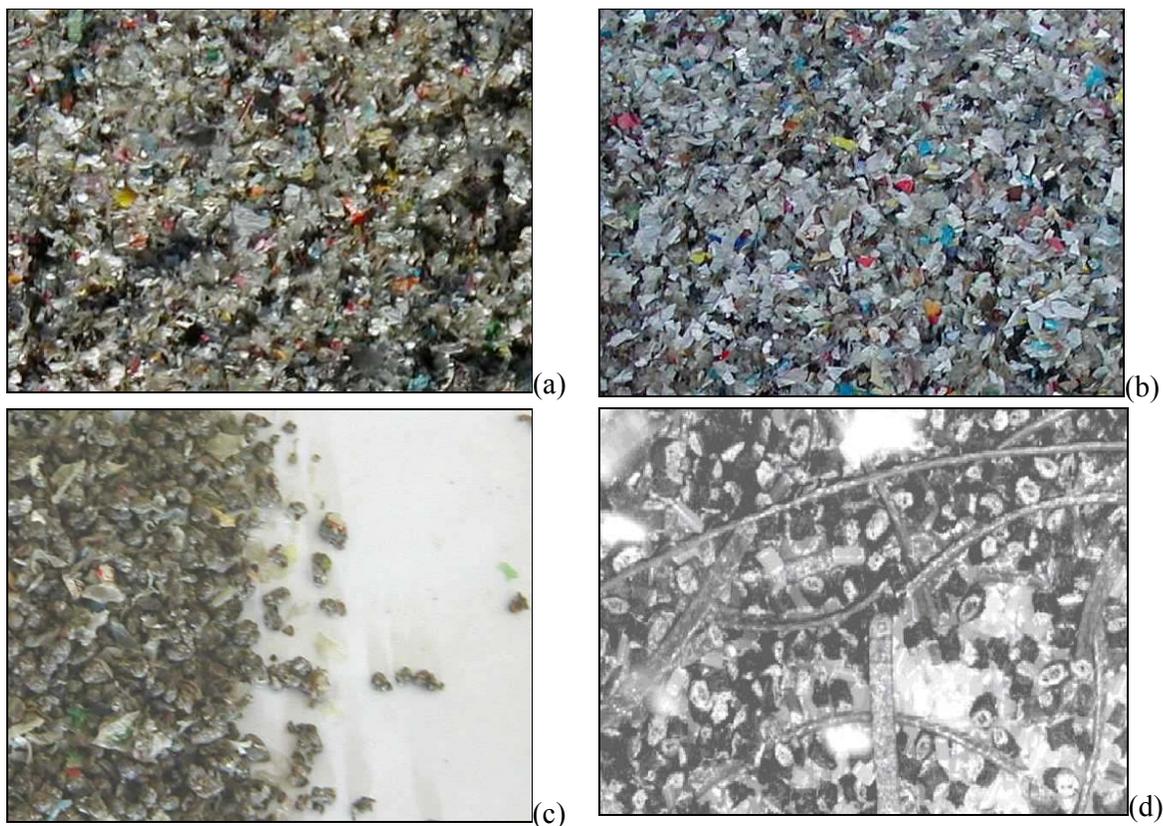


Figura 5.4: Aspecto visual dos materiais processados por compressão: (a) material limpo sobrenadante (b) material limpo decantado (c) material limpo aglutinado (d) material limpo aglutinado e extrusado.

As temperaturas de prensagem foram baseadas nos dados apresentados da Tabela 3.2 e na Figura 3.1. As temperaturas foram selecionadas de forma que quando os compostos possuísem uma grande quantidade de PVC, como no caso do material moído lavado decantado, a temperatura não fosse superior a 200°C, para que as emissões de cloro não fossem muito elevadas, pois estas degradam o PVC e podem também degradar os outros tipos de materiais presentes, além do ataque corrosivo aos moldes.

Não foi possível afirmar que no processo de lavagem, todos os materiais foram separados idealmente, devido aos seus diferentes formatos de partículas e cargas adicionadas. Em temperaturas acima de 230°C observa-se que mesmo compostos com baixo teor de PVC tendem a se degradar, desprendendo odores desagradáveis no processo de prensagem. Temperaturas abaixo de 160°C não fundem a maioria dos polímeros, não obtendo assim uma boa coesão entre as partículas heterogêneas.

As demais temperaturas dos materiais foram avaliadas de forma a que estivessem na faixa de 200 e 230°C. Como se observa na Tabela 3.2, esta temperatura não atingiu a temperatura de amolecimento do PET, o que faz com que este material atue como carga em todas as amostras recicladas, podendo piorar as características mecânicas do material final.

Para uma melhor identificação dos materiais prensados que tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas, foi adotada a nomenclatura apresentada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Materiais utilizados para compressão

<i>Sigla</i>	<i>Descrição</i>
E ₂₀₀	Material limpo sobrenadante aglutinado e extrusado à temperatura inferior (T _{inf}) : 200°C
E ₂₃₀	
L ₂₀₀	Material limpo sobrenadante aglutinado à temperatura inferior (T _{inf}) : 200°C
L ₂₃₀	
P ₁₈₀	Material limpo decantado (não aglutinado) à temperatura inferior (T _{inf}) : 180°C
P ₂₀₀	
S ₂₀₀	Material moído sujo aglutinado à temperatura inferior (T _{inf}) : 200°C
S ₂₃₀	

Para avaliação das propriedades de cada placa, admitiu-se uma variação de $\pm 10^\circ\text{C}$ para cada temperatura de processamento.

5.8.1 Material limpo sobrenadante aglutinado e extrusado (E₂₀₀ e E₂₃₀)

Esta prensagem foi a mais fácil de ser realizada pois o material que foi aglutinado já teve a sua massa específica aparente aumentada e foi homogeneizado pelo processo de extrusão, conforme processamento realizado no trabalho de Wassermann et al. (2002).

Na Figura 5.5 abaixo é mostrado o aspecto da placa que foi fabricada com a mistura plástica da fase sobrenadante da lavagem aglutinada e extrusada. O aspecto visual das placas obtidas em ambas as temperaturas de processamento é o mesmo.



Figura 5.5: Aspecto visual da placa E₂₀₀ ou E₂₃₀

A placa resultante possui uma coloração cinza esverdeada clara, e se percebe a disposição dos grãos nas placas, fundidos lado a lado. Na Figura 5.5, pode-se observar um corte realizado na placa moldada mostrando seu aspecto interno. Nota-se a existência de vários poros, observados também por Bisio e Xanthos (1994), formados por vapor d'água ou outros gases não exauridos durante o processo. Estes poros também podem ser resultantes de encolhimento e degradação dos materiais, que podem ser as gorduras que não foram retiradas da mistura no processo de lavagem ou a liberação do cloro, de uma pequena parcela de PVC que não foi separada na lavagem. Estes poros podem resultar em valores mais baixos de propriedades mecânicas, gerando um material quebradiço e fácil de esfarelar. Também observa-se que o aumento da temperatura de prensagem agrava estes problemas.

5.8.2 Material limpo sobrenadante aglutinado a 200 e 230°C (L₂₀₀ e L₂₃₀)

Esta prensagem não teve muitos inconvenientes. Na Figura 5.6 é mostrado o aspecto visual da placa obtida por moldagem por compressão a partir da mistura plástica da fase sobrenadante da lavagem aglutinada. O aspecto das placas em ambas as temperaturas de moldagem é o mesmo.



Figura 5.6: Aspecto visual da placa L₂₀₀ e L₂₃₀

A placa resultante possui várias cores, cada uma dependendo do tipo de plástico misturado. Na Figura 5.7 pode-se observar a existência de orientação radial na peça moldada a qual pode ser atribuída a diferenças na taxa de fusão do material nas superfícies inferiores e superiores da massa polimérica durante a formação da placa e também pode-se justificar pela existência de material não fundido na temperatura de processamento da moldagem.



Figura 5.7: Vista da parte inferior da placa

A Figura 5.8 apresenta os corpos de prova que foram utilizados para os testes de flexão. Observa-se que as partículas do material aglutinado se dispõem como se fossem lâminas, unindo-se aos materiais de maior afinidade. Os materiais que se fundem na temperatura escolhida de prensagem preenchem espaços antes vazios e ocupados inicialmente por ar.



Figura 5.8: Laminação na placas de material limpo sobrenadante aglutinado

Observou-se que quanto maior a temperatura de prensagem das placas, mais esbranquiçado torna-se o material e mais facilmente ele se esfarela, principalmente acima de 240°C. Este comportamento pode ser atribuído à degradação do PVC e ao seu efeito sobre as outras partículas da mistura.

5.8.3 Material decantado limpo a 180 e 200°C (P_{180} e P_{200})

Para a prensagem deste material, algumas restrições foram observadas. A primeira delas foi que o material não pode ser prensado em temperaturas superiores a 200°C, pois o PVC começou a sofrer grande degradação (vide Figura 3.1). O material limpo e decantado apresentou uma baixa contração após ser resfriado, o que significava que a sua retirada do molde devia ser realizada com cuidado para não quebrar nem esfarelar.



Figura 5.9: Aspecto das placas prensadas P_{180} e P_{200}

As placas prensadas como material decantado limpo possuem uma cor clara e brilhante, provavelmente devido à presença do PS, que tem aproximadamente 56,4% na placa. O PET não funde em temperaturas abaixo de 240°C, atuando como carga. O PVC quando degradado torna-se mais amarelado. Partículas de metal e pedaços de papel também podem ser observados na placa. As placas submetidas à temperaturas superiores a 230°C tornam-se escurecidas, como mostra a Figura 5.10.



Figura 5.10: Placa de material lavado e decantado prensado na temperatura de 230°C.

Na temperatura de 230°C, o PVC degradado começou a escurecer a placa e ocorreu também um desprendimento de cloro do material, que acabou atacando a folha de acetado que revestia os moldes de prensagem. Observa-se também que o material ficou mais quebradiço em relação ao moldado por compressão em temperaturas inferiores a 200°C, logo concluiu-se que em temperaturas superiores a 200°C, os isolantes de material para o molde utilizado devia ser folhas de alumínio.

5.8.4 Material aglutinado sujo a 200 e 230°C (S_{200} e S_{230})

A prensagem deste material não diferiu muito da prensagem do material limpo L200 e L230. A principal diferença foi que a cor da placa gerada apresentou-se mais escura provavelmente devido à presença das gorduras, restos de comida, areia, papel, sangue, etc., que com a temperatura elevada do processo de aglutinação, acabam por escurecer o material. O aspecto da placa do material sujo e aglutinado é mostrado na Figura 5.11.



Figura 5.11: Aspecto das placas prensadas S_{200} e S_{230}

Pode-se observar na placa da Figura 5.11 a presença de partículas verdes, provavelmente proveniente das garrafas de PET e as manchas brancas provenientes de embalagens de PS Expandido. As outras cores são derivadas de sacolas e frascos plásticos coloridos que eventualmente estão presentes na mistura.

5.9 Avaliação das propriedades de cada mistura

Neste item são exibidas as propriedades de massa específica, tração, flexão, resistência ao impacto Charpy e Izod das misturas poliméricas que foram avaliadas segundo procedimentos ASTM. As propriedades são avaliadas em comparação com o polímero presente em maior quantidade em cada mistura. Para isso as misturas Extrusada e Limpa serão comparadas com as propriedades do PEBD virgem (composição média de 47,6%) e a mistura Decantada será comparada aos valores do PS (composição média de 56,4%).

A mistura não lavada terá suas propriedades comparadas às do PEBD e PS, com composição presente de 26,1 % e 25,5 % respectivamente.

5.9.1 Massa específica

Os valores experimentais de massa específica encontrados são mostrados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Valores encontrados de massa específica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) para os corpos de prova

Corpos de Prova	E200*	E230	L200	L230	P180	P200	S200	S230
1	-	0,990	0,989	0,993	1,269	1,260	1,050	1,047
2	-	0,989	0,989	0,979	1,266	1,275	1,063	1,038
3	-	0,989	0,983	0,979	1,249	1,249	1,021	1,067
Média	0,989	0,989	0,987	0,983	1,261	1,261	1,044	1,051
Desvio Padrão	-	0,0005	0,0036	0,0083	0,0105	0,0127	0,0211	0,0151

* foi fornecido pela empresa Ipiranga Petroquímica somente o valor médio.

Os valores de massa específica foram relativamente homogêneos em cada tipo de material como mostra a Figura 5.12.

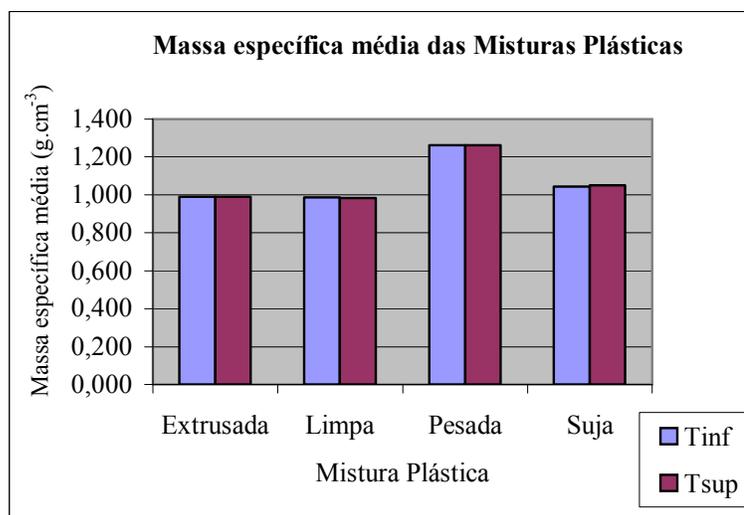


Figura 5.12: Massas específicas dos materiais prensados

Os valores encontrados de massa específica do material se comportaram como o esperado. O material extrusado limpo e o material aglutinado limpo obtiveram massa específica em torno de $0,985 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (composto basicamente de PE, PP e PS Expandido). A mistura Suja, composta por todos os polímeros encontrados no rejeito da coleta, gerou uma massa específica média de $1,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, por possuir tanto plásticos com massa específica menor que a da água (PE, PP), como com massa específica maior que a da água (PS, PVC, PET). E ainda a prensagem do material decantado no processo de

lavagem gerou um valor de massa específica aproximado de $1,26 \text{ g.cm}^{-3}$, compatível com a mistura percentual de PET, PVC e PS, conforme a Tabela 4.2 e Tabela 5.7.

A norma da ASTM esclarece que mudanças na massa específica de uma mesma amostra podem ocorrer devido à cristalinidade do material, histórico térmico, porosidade e composição (tipos ou proporções de resina, plastificantes, pigmentos ou cargas) (ASTM N.º 792, 1998).

5.9.2 Ensaio de tensão-deformação (Tração)

Neste ensaio foi aplicada uma força de tração uniaxial ao sólido, que estica na direção da força e contrai em ambas as direções laterais. Se o sólido for homogêneo, o material permanece elástico sob a ação da força aplicada, e a deformação lateral será constante à deformação axial. Na Tabela 5.10 a seguir são apresentados os dados experimentais para a tensão na ruptura expressa em MPa.

Os valores de desvio padrão só podem ser considerados para as misturas Extrusada E₂₀₀ e E₂₃₀. Os valores com pequena variabilidade deste material indicam que o material é mais homogêneo, provavelmente devido ao maior grau de mistura e compactação do material que não se fundiu nas demais misturas.

Tabela 5.10: Tensão na Ruptura (MPa)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>E₂₀₀</i>	<i>E₂₃₀</i>	<i>L₂₀₀</i>	<i>L₂₃₀</i>	<i>P₁₈₀</i>	<i>P₂₀₀</i>	<i>S₂₀₀</i>	<i>S₂₃₀</i>
1	12,60	13,60	0,00	0,20	0,70	2,40	0,10	2,80
2	12,80	14,20	0,10	3,70	2,60	0,10	0,40	0,00
3	13,10	14,00	0,10	0,60	1,80	2,20	3,20	3,20
4	13,30	13,90	0,10	5,80	1,40	0,80	2,00	4,70
5	12,30	13,10	0,20	3,50	1,10	3,00	0,10	4,50
6	12,00	14,10	4,70	0,40	1,60	0,80	-	0,10
7	12,90	11,10	0,80	0,10	2,70	2,80	0,30	3,00
8	-	-	-	-	2,70	0,30	-	0,20
9	-	-	-	-	-	-	-	3,00
10	-	-	-	-	-	-	-	0,60
11	-	-	-	-	-	-	-	4,70
12	-	-	-	-	-	-	-	1,20
Média	12,71	13,43	1,00	2,04	2,09	1,77	1,02	2,55
Desvio Padrão	0,45	1,09	1,83*	2,27*	0,77*	1,17*	1,29*	1,76*

Devido a esses fatores, somente o material extrusado é que apresentou valores constantes e homogêneos. Isso demonstra que o processo de extrusão compatibiliza os diferentes materiais da mistura, tornando-a apta para este tipo de solicitação.

Os valores do material Limpo, Pesado e Sujo se apresentam muito heterogêneos, provavelmente devido à baixa homogeneização/compactação entre os materiais misturados e o fato de que o PET sempre atua como carga (alta temperatura de amolecimento), pois em temperaturas acima de 230°C os demais materiais poliméricos começam a sofrer degradação. Isto pode ser um indicativo de que materiais como L₂₀₀, L₂₃₀, P₁₈₀, P₂₀₀, S₂₀₀ e S₂₃₀ necessitam de agentes compatibilizantes ou de adição de um polímero virgem (como PEBD) para tornar mais homogêneas as propriedades dos materiais em análise. As médias e desvio padrão destes materiais não podem ser tomadas como representativas do valor real correspondente ao material em questão, devido à grande heterogeneidade dos resultados. Tornando estes materiais não aptos para este tipo de solicitação de tração.

Os valores médios da tensão na ruptura em MPa são exibidos na Figura 5.13.

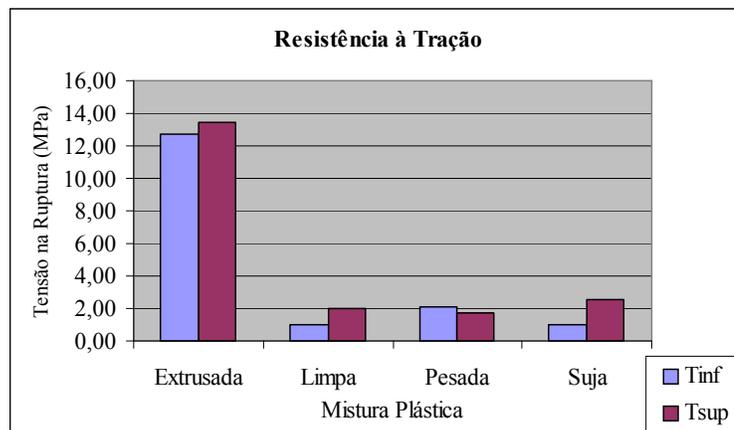


Figura 5.13: Tensão na ruptura média dos materiais

O material extrusado obteve os valores das propriedades analisadas com menor variabilidade durante este trabalho, provavelmente devido à ação da rosca da extrusora que garante uma melhor mistura do material que funde e melhor compactação do material que não funde. Mesmo com a presença de resquícios de PET atuando como carga, os valores obtidos ainda são consideravelmente superiores aos das outras placas obtidas pelo material aglutinado limpo sobrenadante, decantado limpo e sujo aglutinado, podendo suportar uma tensão até 6 vezes maior que os valores do material não extrusado.

Se os valores das misturas Extrusada e Limpa forem comparados com os valores do PEBD virgem com valor médio de tensão na ruptura entre 10 e 19 MPa (BRASKEM, 2004), observa-se que para a mistura extrusada, esta propriedade cai muito pouco, enquanto que a placa da mistura Limpa não é indicada para esta solicitação. Ao comparar com as propriedades do PS, de 36 a 51 MPa (PETROBRAS ENERGIA, 2004), observa-se que os valores obtidos para esta propriedade são relativamente inferiores.

Na **Tabela 5.11** são apresentados os valores de alongamento na ruptura das amostras expressos em percentagem.

Tabela 5.11: Alongamento na Ruptura (%)

<i>Corpos de Prova</i>	E_{200}	E_{230}	L_{200}	L_{230}	P_{180}	P_{200}	S_{200}	S_{230}
1	2,60	2,90	-	0,70	-	0,50	0,10	0,40
2	2,20	3,80	8,00	1,00	0,20	4,00	0,10	-
3	2,30	3,00	7,40	0,20	-	-	0,40	0,30
4	3,20	3,30	10,60	1,70	0,60	0,30	1,10	0,90
5	2,60	2,60	7,40	3,20	-	1,10	5,30	0,50
6	2,10	3,50	1,70	16,90	0,70	1,70	-	10,70
7	2,70	1,70	10,10	0,10	0,10	0,40	4,90	1,10
8	-	-	-	-	-	0,40	-	6,30
9	-	-	-	-	-	-	-	0,40
10	-	-	-	-	-	-	-	13,20
11	-	-	-	-	-	-	-	0,50
12	-	-	-	-	-	-	-	2,80
Média	2,53	2,97	7,53	3,40	0,40	1,20	1,98	3,37
Desvio Padrão	0,37	0,69	3,17	6,05	0,26	1,33	2,44	4,63

* Os valores de Desvio Padrão não podem ser considerados para as misturas Limpa, Pesada e Suja, por que o teste apresentou valores muito discrepantes para estes materiais.

Como na propriedade anterior, o material extrusado também obteve valores razoavelmente homogêneos no alongamento na ruptura. Os materiais P_{180} e P_{200} apresentaram valores mais baixos de alongamento na ruptura. Isto é explicado basicamente pela presença de PET, que não é fundido e não é compatível com o resto da mistura, o que faz com que este corpo de prova quando submetido à tração, se desprenda facilmente onde existirem partículas de PET, piorando seu desempenho.

Assim observa-se que avaliar as propriedades de tração em misturas poliméricas que possuam PET e PVC não são apropriadas, pois o primeiro não se funde e o segundo se degrada facilmente em temperaturas superiores a 200°C.

O material sujo também apresentou valores muito discrepantes entre si, basicamente pela presença de PET não fundido na placa e outros contaminantes como metais e papel.

Os valores médios do alongamento na ruptura (%) são exibidos na Figura 5.14 a seguir.

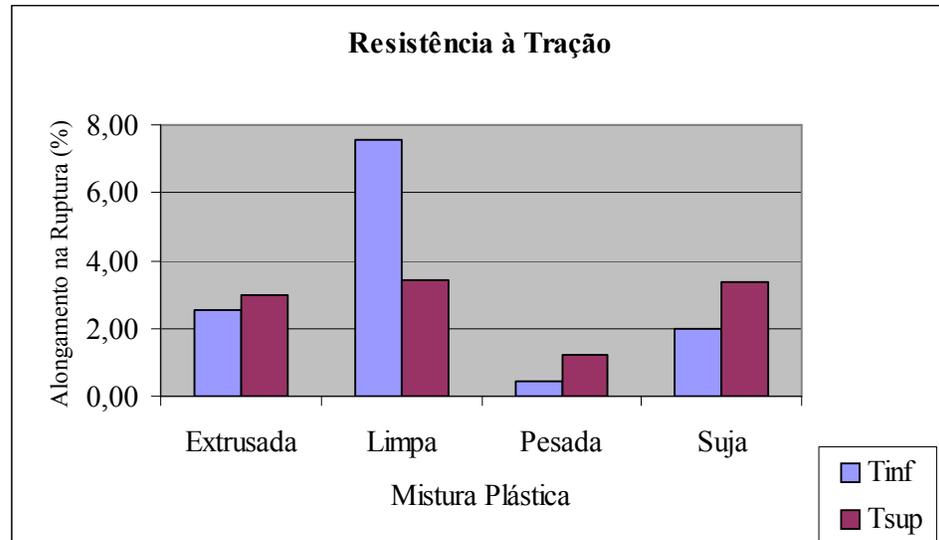


Figura 5.14: Alongamento na ruptura dos materiais (%)

Também neste caso, os corpos de prova feitos da mistura plástica extrusada foram os que obtiveram os resultados mais homogêneos. Quando prensado na temperatura de 200°C, o alongamento na ruptura foi de aproximadamente 2,5 % e quando prensado na temperatura de 230°C o alongamento na ruptura ficou em aproximadamente 3 %. Portanto, neste caso, o aumento da temperatura de prensagem parece aumentar um pouco esta propriedade do material.

No caso dos corpos de prova feitos a partir da mistura plástica lavada e aglutinada L₂₀₀ e L₂₃₀ (parte sobrenadante, composta basicamente por PP e PE), o resultado das análises foi diferente do esperado, pois achava-se que os melhores resultados também seriam para o material extrusado, porém isto não aconteceu. A propriedade de alongamento na ruptura foi mais elevada de todas as amostras na temperatura de 200°C, com um valor aproximado de 7,53 %. Quanto a temperatura foi aumentada para o patamar de 230°C, esta propriedade ficou em torno de 3,4 %, mostrando que o aumento de temperatura no processo de prensagem diminuiu as propriedades de tração do material sobrenadante limpo e aglutinado.

A fração pesada P₁₈₀ e P₂₀₀, mostrou os piores resultados para a análise dos corpos de prova. Muito provavelmente pela limitação da temperatura de processamento do PVC (acima de 180°C, ocorre a liberação de Cloro), pois o PET continua atuando como carga nos corpos de prova, e quando submetido à tração, sua partícula se soltaria facilmente da placa, uma vez que a interação do PET na mistura foi fraca.

O material sujo e aglutinado S₂₀₀ e S₂₃₀ apresentou resultados muito diferentes para os diversos corpos de prova analisados. Isto provavelmente é resultado de contaminantes como papel e metais, ou ainda PET não fundido e PVC degradado.

Os valores das misturas Extrusada e Limpa foram comparados com os valores do PEBD virgem com valor médio de alongamento na ruptura entre 611 e 715% (BRASKEM, 2004), indicando que os valores obtidos são muito inferiores para o material reciclado.

Ao comparar com as propriedades do PS, de 1,40 a 2,40% (PETROBRAS ENERGIA, 2004), observa-se que os valores obtidos para esta propriedade são muito semelhantes ao do material reciclado.

Observa-se então que o material que mais se alonga é a mistura limpa sobrenadante aglutinada e prensada L₂₀₀, obtendo os melhores resultados deste teste.

5.9.3 Resistência à Flexão

Na Tabela 5.12 abaixo seguem os dados experimentais para a tensão a 5% de deformação expressa em MPa.

Tabela 5.12: Tensão a 5% (MPa)

<i>Corpos de Prova</i>	E_{200}	E_{230}	L_{200}	L_{230}	P_{180}	P_{200}	S_{200}	S_{230}
1	0,60	0,40	9,60	11,10	3,60	6,20	3,30	1,60
2	0,20	0,20	12,00	9,70	3,50	4,70	2,10	3,20
3	0,40	0,20	6,00	10,00	2,40	4,00	4,10	3,60
4	0,10	0,20	4,60	3,50	3,10	3,00	2,60	2,00
5	0,70	0,20	6,20	11,30	3,10	3,60	2,60	1,70
6	0,60	0,10	7,50	12,70	2,30	8,80	5,40	2,10
7	0,30	0,10	5,00	9,10	3,40	4,30	2,90	1,00
Média	0,41	0,20	7,27	9,63	3,06	4,94	3,29	2,17
Desvio Padrão	0,23	0,10	2,67	2,95	0,52	1,97	1,13	0,92

Nos testes de flexão, as propriedades dos materiais se mantiveram razoavelmente constantes. O material extrusado com valores médios entre 0,20 e 0,41 MPa, o material L₂₀₀ e L₂₃₀ com valores médios entre 7,27 e 9,63 MPa, P₁₈₀ e P₂₀₀ com valores médios entre 3,06 e 4,94 MPa e S₂₀₀ e S₂₃₀ com maiores diferenças entre seus valores e uma média entre 2,17 e 3,3 MPa.

Os valores médios de tensão a 5% (MPa) de cada mistura plástica são expressos na Figura 5.15 a seguir.

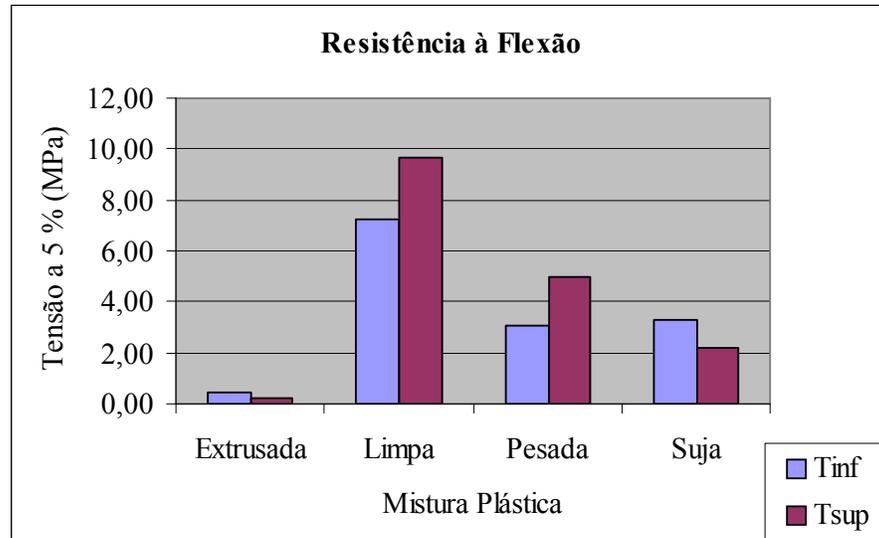


Figura 5.15: Tensão a 5%

Contrariando as expectativas de que o material limpo e extrusado fosse obter os melhores resultados em todos os testes mecânicos, observou-se no gráfico anterior que este material foi o de piores propriedades de flexão. Isto se deve ao fato de que quando o material sobrenadante aglutinado foi extrusado, ocorreu a formação de poros no interior, que quando no processo de prensagem não desapareceram completamente, criando uma placa porosa, onde se observa os grumos lado a lado no momento da fusão. Esta característica é um dos fatores que faz com que a placa apresente uma fragilidade muito maior em altas temperaturas e se esfarele muito mais fácil.

Já a mistura limpa e aglutinada L₂₀₀ e L₂₃₀, quando comprimida apresentou o melhor comportamento de todos os materiais. Na temperatura de 200°C, resultou em valores ao redor de 7,27 MPa. E quando submetida à prensagem em 230°C, mostrou um ganho de quase 30%, chegando a um valor médio de 9,63 MPa. Este valor corresponde ao esperado devido ao fato da amostra analisada ser composta basicamente por PP e PE, com resquícios de PS Expandido. Assim, concluiu-se que a fusão dos materiais é mais homogênea apresentando melhor resistência à flexão.

As frações pesadas, P₁₈₀ e P₂₀₀, mostraram resultados ruins para a análise dos corpos de prova. Muito provavelmente pela limitação da temperatura de processamento do PVC (acima de 180°C, ocorre a liberação de Cloro), porque o PET continua atuando somente como carga nos corpos de prova, e quando submetido à flexão não se flexiona, quebrando no local onde a tensão foi aplicada. Também se observa que o aumento da temperatura de 180 para 200°C, faz com que as propriedades sejam melhoradas em até 60 %, subindo de uma média de 3,06 para 4,94 MPa.

O material não lavado e aglutinado S₂₀₀ e S₂₃₀ apresentou resultados bem diferenciados quando processados nas duas temperaturas. Na temperatura de 200°C foi obtida uma média de 3,29 MPa e na temperatura de 230°C uma média de 2,17 MPa. Isto mostra que quando aumenta a temperatura de processamento do material, ocorre uma perda média da propriedade de flexão de quase 35 %. Isto provavelmente ocorre porque o material

sujo contém gorduras, que quando aquecidas formam poros ou liberam cloro do PVC, que acabam por piorar as propriedades de flexão do material.

Se os valores das misturas Extrusada e Limpa forem comparados com os valores do PEAD virgem com valor médio de tensão a 5% entre 1000 e 1600 MPa (IPIRANGA, 2004), observa-se que estes materiais não são resistentes à flexão como o PEAD. Ao comparar com as propriedades do PS, de 53 a 78 MPa (PETROBRAS ENERGIA, 2004), nota-se que os valores obtidos para esta propriedade são muito baixos.

Para peças que possam ser submetidas à flexão o melhor material a ser utilizado é a mistura plástica lavada, sobrenadante e aglutinada L₂₀₀ e L₂₃₀ em temperaturas ao redor de 230°C, favorecendo a fusão do PE e PP, juntamente com algum PS Expandido.

5.9.4 Resistência ao Impacto Charpy

Na Tabela 5.13 abaixo seguem os dados experimentais para a resistência ao impacto Charpy expressa em kJ.m⁻².

Tabela 5.13: Resistência ao Impacto Charpy (kJ.m⁻²)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>E₂₀₀</i>	<i>E₂₃₀</i>	<i>L₂₀₀</i>	<i>L₂₃₀</i>	<i>P₁₈₀</i>	<i>P₂₀₀</i>	<i>S₂₀₀</i>	<i>S₂₃₀</i>
1	2,28	2,20	5,74	5,20	4,18	4,28	4,44	6,52
2	1,82	2,19	5,61	6,52	4,28	4,55	4,75	5,25
3	1,92	1,93	5,39	5,13	3,92	5,30	4,71	3,80
4	2,12	1,85	5,17	5,14	5,17	5,10	4,03	5,50
5	2,08	1,82	5,10	5,33	5,78	4,72	5,44	5,62
6	1,90	2,09	5,65	4,84	4,46	4,44	3,10	4,23
Média	2,02	2,01	5,44	5,36	4,63	4,73	4,41	5,15
Desvio Padrão	0,17	0,17	0,27	0,59	0,70	0,40	0,79	0,99

Para o teste de resistência ao impacto Charpy, que possui suas 2 extremidades presas e o pêndulo incide na metade do corpo de prova, os valores obtidos foram relativamente homogêneos. Neste caso observa-se que a melhor resistência ao impacto Charpy foi a do material L₂₀₀ e L₂₃₀.

Os valores médios da resistência ao impacto Charpy são mostrados Figura 5.16 a seguir.

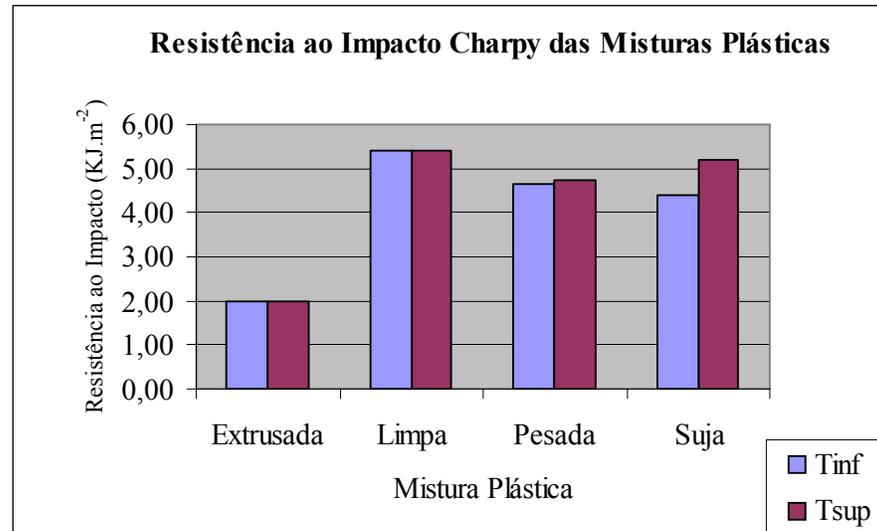


Figura 5.16: Resistência ao Impacto Charpy (kJ.m⁻²)

A resistência ao impacto do material extrusado é a mais baixa de todos os 4 analisados. O gráfico também mostra que a variação da temperatura não altera os resultados obtidos, que são de uma média de 2 kJ.m⁻², aproximadamente metade da resistência ao impacto dos outros materiais. Este mau resultado se deve provavelmente ao fato de que a mistura limpa sofreu um segundo tratamento térmico na extrusão, degradando ainda mais o material e fazendo com que existam ainda mais oclusões de gases, facilitando a quebra do corpo de prova.

Para a mistura L₂₀₀ e L₂₃₀, foram obtidos os valores mais constantes do experimento e a temperatura influi pouco na propriedade desta mistura. Observou-se também que os valores desta resistência não se alteram muito com a temperatura nos materiais P₁₈₀ e P₂₀₀. Já no caso da mistura S₂₀₀ e S₂₃₀, observou-se que com o aumento de temperatura para 230°C, ocorre uma melhora de 18 % nas propriedades do material.

Comparando-se os valores da mistura Extrusada com os valores do PEAD virgem de resistência ao impacto Charpy entre 2 e 20 kJ.m⁻² (IPIRANGA, 2004), observa-se que a mistura Extrusada apresenta valor médio igual ao valor mínimo do PEAD. As misturas Limpa, Pesada e Suja possuem valores mais expressivos em torno de 5 kJ.m⁻².

5.9.5 Resistência ao Impacto Izod

Neste teste, o corpo de prova é preso somente em uma das extremidades e um pêndulo incide em uma altura pré-determinada da peça. Na Tabela 5.13 seguem os dados experimentais para a resistência expressos em J.m⁻¹.

Tabela 5.14: Resistência ao Impacto Izod (J.m^{-1})

<i>Corpos de Prova</i>	E_{200}	E_{230}	L_{200}	L_{230}	P_{180}	P_{200}	S_{200}	S_{230}
1	15,2	14,98	40,88	54,6	34,23	67,54	45,1	40,06
2	16,41	15,9	32,06	34,12	41,74	69,30	39,47	44,95
3	14,89	16,51	33,24	35,91	56,16	68,71	32,94	35,78
4	15,81	16,21	42,29	47,18	66,37	39,47	33,23	35,17
5	16,72	16,51	42,29	48,96	47,45	40,35	30,27	38,23
6	15,81	14,98	42,06	42,43	44,14	43,40	40,06	32,11
7	15,2	15,9	46,47	35,61	45,05	59,06	33,93	31,5
8	15,81	16,51	42,06	50,74	-	43,27	42,43	35,97
9	-	15,9	-	-	-	-	-	-
Média	15,73	15,93	40,17	43,69	47,88	53,89	37,18	36,72
Desvio Padrão	0,62	0,60	4,93	7,82	10,46	13,54	5,29	4,37

Como no caso da Resistência ao Impacto Charpy, os valores de IZOD são relativamente homogêneos. Desta vez, o material Pesado P_{180} e P_{200} obteve os melhores resultados.

Os valores médios da resistência ao impacto Izod são mostrados na Figura 5.17 abaixo.

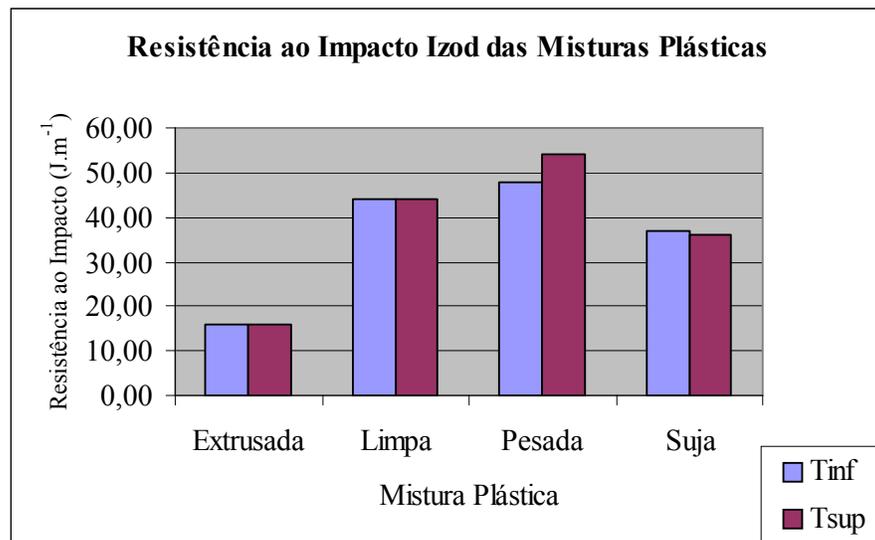


Figura 5.17: Resistência ao Impacto Izod (J.m^{-1})

Tal qual na resistência ao impacto Charpy, a resistência ao impacto Izod do material extrusado é a mais baixa de todos os 4 analisados. O gráfico também mostra que a variação da temperatura não altera os resultados obtidos do material extrusado, que são de uma média de 15 KJ.m^{-2} , aproximadamente um terço da resistência ao impacto dos outros materiais.

Os melhores resultados obtidos foram para a mistura pesada P180 e P200, provavelmente devido ao fato de que os componentes da mistura (PET, PVC e PS) apresentam maior resistência do que os componentes com PP, PE e PS.

Para as misturas E₂₀₀, E₂₃₀, L₂₀₀, L₂₃₀, foram obtidos os valores mais constantes do experimento. Observou-se também que os valores desta resistência não se alteram muito no que diz respeito aos materiais S₂₀₀, S₂₃₀. Já no caso da mistura P₁₈₀, P₂₀₀, observou-se que com o aumento de temperatura para 230°C, ocorre uma melhora de 12 % nas propriedades do material.

Se os valores das misturas Extrusada e Limpa forem comparados com os valores do PEAD virgem de resistência ao impacto entre 20 e 750 J.m⁻¹ (IPIRANGA, 2004), observa-se que o material reciclado apresenta valores significativos, tendo a mistura Extrusada valor mínimo de 15 J.m⁻¹ e o valor médio da mistura Limpa de 42 J.m⁻¹. Ao comparar com as propriedades do PS, de 19 J.m⁻¹ (PETROBRAS ENERGIA, 2004), nota-se que os valores obtidos para esta o material Pesado são entre 48 e 53 J.m⁻¹, indicando provavelmente que a presença de PET na mistura melhora muito a resistência do material. Já no caso da mistura Suja, este valor também é significativo, girando em torno dos 37 J.m⁻¹, quando comparado com os valores dos outros polímeros virgens.

5.10 Propriedades médias das misturas

Para melhor visualização dos testes realizados nas 4 misturas, foi criada a Tabela 5.15 abaixo mostrando os valores médios de todas as propriedades discutidas anteriormente.

Tabela 5.15: Valores médios das propriedades dos materiais reciclados

<i>Materiais</i>	<i>E₂₀₀</i>	<i>E₂₃₀</i>	<i>L₂₀₀</i>	<i>L₂₃₀</i>	<i>P₁₈₀</i>	<i>P₂₀₀</i>	<i>S₂₀₀</i>	<i>S₂₃₀</i>
Massa Específica (g.cm⁻³)	0,989	0,989	0,987	0,983	1,261	1,261	1,044	1,051
Tração								
Tensão no escoamento (MPa)	-	-	5,90	4,20	-	2,45	2,83	4,50
Alongamento no escoamento (%)	-	-	1,20	0,90	-	0,45	0,53	0,90
Tensão na ruptura (MPa)	12,71	13,43	1,00	2,04	2,09	1,77	1,02	2,55
Alongamento na ruptura (MPa)	2,53	2,97	7,53	3,40	0,40	1,20	1,98	3,37
Módulo Young Automático (MPa)	-	-	1461,00	1776,00	2678,00	-	2025,00	2104,00
Tensão na carga máxima (MPa)	-	-	5,90	5,60	3,10	-	3,10	4,40
Flexão								
Tensão a 5% (MPa)	0,41	0,20	7,27	9,63	3,06	4,94	3,29	2,17
Deformação a 5 MPa	0,54	0,51	0,59	0,69	0,40	0,37	0,89	0,86
Deformação a 10 MPa	1,24	1,17	1,56	1,62	1,01	0,83	-	-
Módulo Young Automático (MPa)	952,70	1004,60	918,60	738,20	1313,60	1407,00	742,20	634,90
Módulo Secante 2% (MPa)	703,00	737,10	563,00	551,00	361,00	657,00	356,00	412,00
Resistência ao Impacto Charpy (KJ.m⁻²)	2,00	2,00	5,40	5,40	4,63	4,73	4,40	5,20
Resistência ao Impacto Izod (J.m⁻¹)	16,00	16,00	44,00	44,00	47,88	53,89	37,00	36,00

Com base nesta tabela podemos fazer as seguintes afirmações quanto às propriedades de nossos produtos reciclados:

- a) Baseando-se nas Tabelas 4.2 e 5.7 e considerando-se que durante a lavagem as partículas plásticas foram separadas totalmente por densidade na água, observa-se que as densidades são proporcionais à composição das misturas poliméricas médias encontradas no RSU amostrado.
- b) O material Extrusado possui a melhor resistência à tração, provavelmente devido à maior homogeneidade da mistura.
- c) O material limpo L₂₀₀ e L₂₃₀ possui as melhores características de flexão, devido às características semelhantes do PP e PE e também à homogeneidade da mistura quando da fusão. Quando submetido à prensagem em 230°C mostrou um ganho de quase 30%. Este valor corresponde ao esperado devido ao fato da amostra analisada ser composta basicamente por PP e PE, com resquícios de PS Expandido.
- d) O material limpo L₂₀₀ e L₂₃₀ possui as melhores características de resistência ao Impacto Charpy. Como a resistência PEAD virgem varia entre 2 e 20 kJ.m⁻² (IPIRANGA, 2004), os resultados alcançados para as misturas Limpo, Pesado e Sujo de 5 kJ.m⁻² foram significativos.
- e) O material limpo P180 e P200 possui as melhores características de resistência ao impacto Izod. Esta propriedade se deve ao fato de que os componentes da mistura (PET, PVC e PS) apresentam maior resistência do que a mistura com PP, PE e PS.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes a este trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Os resultados obtidos nas 4 coletas dos resíduos plásticos do Contêiner de Rejeitos do Centro de Triagem do Aterro Sanitário da Zona Norte demonstram que existe uma grande variabilidade na composição dos plásticos do RSU levando às seguintes conclusões;

- Comparativamente com a primeira coleta realizada em agosto de 2000, observa-se um aumento súbito na quantidade de PS Expandido na coleta realizada em dezembro de 2000, justificado principalmente pela aproximação das datas comemorativas de final de ano, quando normalmente a população compra eletrodomésticos para suas residências;
- No contêiner de rejeitos notou-se que os resíduos recicláveis estão sendo melhor separados do resíduo orgânico, demonstrando que ocorreu uma melhora significativa na separação realizada na Unidade de Triagem e também que a população está separando melhor os seus resíduos;

- Os resíduos plásticos rejeitados pelo Centro de Triagem estão contaminados basicamente com sangue, restos de alimentos, papel de rótulos e metais como grampos ou tampas;
- Em visitas a outros centros de triagem, verificou-se visualmente que a composição de plásticos enviados aos centros de triagem pode aumentar se o poder aquisitivo da população for maior que em outras regiões dos Centros de Triagem.
- Existe a necessidade de utilizar equipamentos de proteção individual (EPI) para que seja garantida a saúde e segurança do pessoal que trabalha os resíduos.
- A armazenagem prolongada dos resíduos não moídos favorece o aparecimento de vermes, logo, sempre que possível, o material deve ser moído antes de ser estocado.

A moagem dos plásticos misturados e com diferentes formatos deste trabalho apresentou as seguintes conclusões:

- A inspeção visual para retirada de todo material metálico foi necessária para que não ocorressem danos às lâminas do moinho;
- Os plásticos não devem ser segredados em rígidos e filmes antes de serem moídos, a diversidade favorece a moagem. Placas de PS Expandido devem ser diminuídas manualmente a um tamanho aproximado de 20 cm de aresta, tamanhos maiores fazem com que ocorra deslizamento no moinho. Garrafas de PET e embalagens de PS devem ser moídas com atenção pois durante a moagem pequenos pedaços podem saltar pela abertura de alimentação do moinho atingido o operador do equipamento. Filmes plásticos com mais de 50 cm acabam se enrolando nas lâminas e fazendo com que o moinho deva ser parado;
- O aquecimento excessivo do moinho devido ao longo tempo de operação faz com que os plásticos alimentados sejam fundidos antes da sua moagem, retardando a velocidade de giro das lâminas, ou até mesmo parando o rotor, podendo ocasionar parada do equipamento por superaquecimento.

Na lavagem do material moído observou-se que o material foi separado em água em 2 frações. A sobrenadante composta por PP, PE e PS Expandido e a decantada composta por PVC, PET, PS. Papeis e metais ficaram retidos na cesta do tanque de lavagem. Areia, contaminantes e partículas plásticas com diâmetro menor que 2 mm (malha da tela) foram encontradas no fundo do tanque. Não é possível garantir que durante a lavagem todas as partículas plásticas tenham se separado totalmente nas amostras

sobrenadantes e decantadas, devido aos seus diferentes fatores de forma e cargas adicionadas.

Para que se possa escolher o método de tratamento de efluente mais eficaz para o processo de lavagem das amostras deste trabalho, a caracterização dos efluentes resultantes da lavagem após 6 meses de estocagem comparada com os resultados da lavagem imediata é de suma importância, e quanto a este assunto temos as seguintes observações:

- Os resultados de DQO e DBO do efluente da amostra armazenada por mais de 6 meses resultaram em valores muito inferiores ao da lavagem imediata.
- O nível de surfactantes no efluente foi em média 25% maior do que o limite esperado na lavagem da mistura após 6 meses, e diminuiu um pouco na lavagem até duas semanas.
- Nitrogênio total esteve em ambos os casos acima dos limites.
- A presença de coliformes fecais não foi detectada pelo método utilizado em nenhuma das amostras avaliadas, garantindo que a concentração destes organismos patogênicos é menor que 2 coliformes fecais por 100 mL.
- A condutividade elétrica diminuiu consideravelmente na lavagem em até duas semanas.
- Fósforo total diminuiu consideravelmente na lavagem em até duas semanas, mas mesmo assim, estes valores são muito maiores que os estabelecidos pela SSMA.
- Sólidos Suspensos e Sólidos Sedimentáveis extrapolaram muito os valores permitidos pela SSMA.
- Óleos e Graxas e o pH estiveram dentro dos limites esperados de efluente.

Em ambos os casos o tratamento de efluente das amostras se faz necessário, mas o material estocado por mais de 6 meses apresenta valores inferiores aos da lavagem em até 2 semanas, apesar de ser o método menos salubre.

O processo de separação por flutuação em 4 estágios teóricos para resíduos plásticos misturados apresentado na figura 4.11 não se mostra eficiente para plásticos misturados pós-consumo pois estes possuem vários aditivos que alteram suas massas específicas e vários formatos, o que também favorece a aglomeração entre as partículas.

A secagem foi um processo limitante da reciclagem e concluiu-se que o processo de secagem sobre telas de PP com malha de 2 mm suspensas é o mais adequado. A

estrutura deve ser feita de metal para que não ocorra empenamento como na estrutura de canos de PVC. A estrutura metálica pode agüentar até 23 kg de material para secagem, enquanto na estrutura de PVC, a quantidade seca foi de até 6 kg por batelada. A altura ideal da tela é de pelo menos 50 cm do chão. Em ambientes úmidos como o da região sul do país, é necessário que a estrutura seja coberta com um material impermeável para que as partículas não sejam molhadas novamente.

A aglutinação resolveu o problema da demora da secagem, requerendo apenas que o material fosse escorrido previamente. No processamento por compressão, extrusão ou injeção é necessário que o material seja aglutinado para diminuir a massa específica aparente dos polímeros. É importante que ocorra uma separação das partículas metálicas residuais que podem interferir em processamentos futuros.

No processo de prensagem são destacadas as seguintes características:

- As temperaturas de processamento dos materiais foram de 180 à 230°C. Como se observa na Tabela 3.2, esta temperatura não atingiu a temperatura de amolecimento do PET, o que faz com que este material atue como carga em todas as amostras recicladas, podendo piorar as características mecânicas do material final.
- Para a mistura Pesada na temperatura de 230°C, foi observado que o PVC iniciou seu processo de degradação e começou a escurecer a placa através do desprendimento de cloro do material, que acabou atacando a folha de acetato que revestia os moldes de prensagem. Nestas temperaturas é necessária a utilização de folhas de alumínio como isolante dos moldes. Observa-se também que o material ficou mais quebradiço em relação ao moldado por compressão em temperaturas inferiores a 200°C.
- O material Pesado apresenta uma baixa contração após ser resfriado, o que significa que a sua retirada do molde deve ser realizada com cuidado para não quebrar nem esfarelar a placa;
- Na prensagem de corpos de prova para realização de testes mecânicos conclui-se que ou os moldes devem ter maior altura ou o material deve ser aglutinado. Somente o material decantado pôde ser prensado nos moldes com até 4 cm de altura, os outros materiais não conseguem ser comportados no molde.

Sobre os aspectos visuais das placas prensadas pode-se concluir que:

- As placas prensadas com material sujo S₂₀₀ e S₂₃₀ tiveram aparência escura e colorida devido aos vários tipos de polímero misturados e impurezas. Também pôde-se notar as partículas de PET não fundidas;

- Placas feitas com o material aglutinado e limpo L₂₀₀ e L₂₃₀, se mostraram mais claras e com melhor adesão entre as partículas;
- Placas feitas com o material Pesado e não aglutinado P₁₈₀ e P₂₀₀, possuem uma coloração muito brilhante devido ao PET ou ao PVC que são mais cristalinos, predominando a cor transparente. Em temperaturas superiores a 230°C a placa se adere ao molde e fica escurecida, devido à degradação do PVC;
- Placas feitas com o material extrusado obtiveram uma coloração esverdeada, onde se observam os grãos agrupados lado a lado, com inclusões de ar formados por vapor d'água ou outros gases não exauridos durante o processo, que tornam a peça friável. Também podem ser resultantes de encolhimento e degradação dos materiais, que podem ser as gorduras que não foram retiradas da mistura no processo de lavagem ou a liberação do cloro, de uma pequena parcela de PVC que não foi separada na lavagem. Também observa-se que o aumento da temperatura de prensagem agrava estes problemas.

Os valores das massas específicas de cada mistura se mantiveram dentro dos padrões esperados. Os valores do material L₂₀₀, L₂₃₀, E₂₀₀ e E₂₃₀, obtiveram massa específica em torno de 0,98 g.cm⁻³, pois são compostos basicamente por PP e PE que possuem massa específica ao redor deste valor. A mistura P₁₈₀ e P₂₀₀ alcançou a massa específica de 1,261 g.cm⁻³, composta por materiais com peso específico do PS e PVC acima de 1 g.cm⁻³. E a mistura S₂₀₀ e S₂₃₀ obteve valores intermediários por conter todos os polímeros e impurezas do material coletado;

No que diz respeito às propriedades mecânicas estudadas de cada mistura reciclada neste trabalho conclui-se o seguinte:

- Os valores das propriedades mecânicas do material Limpo, Pesado e Sujo se apresentaram muito heterogêneos, provavelmente devido à baixa homogeneização/compactação entre os materiais misturados e o fato de que o PET sempre atua como carga (alta temperatura de amolecimento) na reciclagem deste trabalho, pois em temperaturas acima de 230°C os demais materiais poliméricos começam a sofrer degradação.
- Na resistência à tração, o material Extrusado E₂₃₀ obteve os melhores resultados devido ao processo extrusão que contribuiu para a maior homogeneidade da mistura. O resultado atingido foi de 12,71 MPa para a temperatura de 200°C e 13,43 MPa para temperatura de 230°C e quando comparados com os valores do PEBD virgem com valor médio de tensão na ruptura entre 10 e 19 MPa, conclui-se que se o valor se assemelha a esta propriedade do material virgem.

- Na resistência à flexão, a mistura que obteve melhores resultados foi L₂₃₀ na tensão de 5%. Quando a mistura Limpa foi submetida à prensagem em 230°C foi obtido um ganho de quase 30%, resultando em 9,63 MPA nesta propriedade mecânica em relação à prensagem em 200°C (7,27MPa). Estas propriedades se devem às características semelhantes do PP e PE e também à homogeneidade da mistura quando da fusão
- Na resistência ao impacto Charpy, a mistura L₂₀₀ e L₂₃₀ obteve o melhor resultado, em torno de 5,4KJ.m⁻². Comparando-se com os valores do PEAD virgem de resistência ao impacto Charpy entre 2 e 20 kJ.m⁻², vemos que o valor está dentro da faixa obtida para o PEAD Virgem.
- Na resistência ao impacto Izod, a mistura P₁₈₀ e P₂₀₀ obteve os melhores resultados entre 48 e 53 J.m⁻¹, por ser composta de PET e PVC que são resistentes. Ao comparar com as propriedades do PS, de 19 J.m⁻¹, conclui-se que esta propriedade obtida no material reciclado é excelente.

6.2 Sugestões para próximos trabalhos

Os seguintes pontos são sugeridos como continuação deste trabalho:

- Caracterização mensal durante um ano dos resíduos não aproveitados pelo Centro de Triagem para observar a sazonalidade e a melhora da coleta realizada pelos operadores;
- Caracterização dos resíduos de outros Centros de Triagem, para comparação da composição dos polímeros com as regiões metropolitanas atendidas pelos Centros.
- Utilizar um moinho mais robusto e de maior capacidade para evitar paradas desnecessárias devido à filmes longos ou presença de metais.
- Lavagem enzimática para observar os resultados dos efluentes gerados.
- Lavagem com agitador para comparação com os dados de Ehrig et al, que utilizou concentrações de 60 g.L⁻¹, comparando com a lavagem deste trabalho que utilizou 46 g.L⁻¹.
- Utilização da borra resultante do processo de lavagem.
- Análise da umidade residual das amostras após a secagem do material.
- Estudar a utilização de aditivos como estabilizantes, auxiliares de processamento, para verificar se ocorrem melhoras nas propriedades mecânicas das misturas.

- Testar a utilização de eliminadores de odor e pigmentos nas peças geradas.
- Fazer co-processamento com uma parcela de material plástico virgem para ver se as propriedades mecânicas podem ser melhoradas
- Determinar experimentalmente a resistência térmica do material e também a resistência à infiltração.
- Utilização de aditivos para tentar impedir que o PVC se degrade em temperaturas superiores a 180°C ou para tentar fundir o PET a uma temperatura aproximada de 200°C.
- Estudo de viabilidade econômica e técnica para produção das placas pelo processo de moldagem por compressão.

Referências Bibliográficas

- APC. AMERICAN PLASTICS COUNCIL. Disponível em: <www.plasticsresource.com> Acesso em: 06 de junho de 2002.
- APHA, AWWA, WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 20th edition*, Washington, D.C: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1998.
- APME, *Assessing the potencial for post-use waste recycling-predicting recovery in 2001 and 2006*. Ed. APME Acesso em: 20 de fevereiro de 2004 Disponível em: <www.plastinformation.com/Informationsmaterial/infomaterial_index.html>
- ASTM D 1928 procedimento C. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Preparation of Compression Molded Polyethylene Test Samples*. 1996.
- ASTM D 256, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Standard test methods for determining the Izod pendulum impact of plastics*, 1997.
- ASTM D 638 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for tensile properties of plastics*, 1997.
- ASTM D 790, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and insulating materials*, 1997.
- ASTM D 792, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*, 1998.

- ASTM D 5577, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard guide for techniques to separate and identify contaminants in recycled plastics*, 1994.
- BERNARD J., OLE H., JÜRGEN V., *The influence of PVC on the quantity and hazardousness of flue gas residues from incineration*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, April 2000.
- BELLMANN K., KHARE A. *European response to issues in recycling car plastics. Technovation 19*, Ed. Elsevier, p721-734, 1999.
- BISIO A.L., XANTHOS M., How to manage plastics waste: technology and market opportunities. Nova Iorque: Ed. Hanser Publishers, 1994. 252p.
- BRANDRUP, J.; BITTMER, M.; MICHAELI, W.; MENGES G. *Recycling and Recovery of Plastics*. München: Ed. Carl Hanser Verlag, 1996. 893p.
- BRASKEM – *Folha de dados do PEBD* – Disponível em: <www.braskem.com.br>. Acesso em: 07 de abril 2004.
- CARROL D. R., STONE R. B., SIRIGNANO A. M., SAIDON R.M., GOSE S. C., FRIEDMAN M. A. *Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 31, p241-251, 2001.
- CEFET-UNED Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Sul /RS. *Apostila sobre Análise qualitativa dos plásticos durante a queima*, 2000.
- CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM Disponível em <www.cempre.org.br> Acesso em: 27 de maio 2002 e 09 de outubro 2003.
- COLAVITTI, FERNANDA *O que fazer com o lixo*. Galileu, Ed. Globo, n.º 143, p39-50, junho 2003
- CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE .Lei n.º 9.921 de 27 de julho de 1993. *Dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos, nos termos do artigo 247, parágrafo 3º da Constituição do Estado e dá outras providências*. Disponível em: <www.fepam.rs.gov.br> Acesso em: 27 de maio 2002.
- CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução n.º 275, de 25 de abril 2001. *Estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva*. Disponível em: <www.sema.rs.gov.br> Acesso em: 27 de maio 2002.
- CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução Nº 316, DE 29 de outubro de 2002. *Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos*. Disponível em: <www.mma.gov.br> Acesso em: 15 de junho de 2004.

- CZVIKOVSKY T., HARGITAI H. *Compatibilization of recycled polymers through radiation treatment*. Radiation Physics and Chemistry, Ed. Pergamon, v. 55, p727-730, 1999.
- BRASIL, Decreto Nº 3.179, de 21 de Setembro de 1999 - Dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Disponível em <www.mma.gov.br> Acesso em 15 de junho de 2004.
- DI VITA, GIUSEPPE *Macroeconomic effects of the recycling of waste derived from imported non-renewable raw materials*. Resources Policy, Ed. Elsevier, v. 23 No.4, p179-186, 1997.
- DMLU – DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA Disponível em: <www.portoalegre.rs.gov.br/dmlu>. Acesso em: 27 de maio 2002.
- EHRIG R. J. *Plastics Recycling: Products and Processes*. New York: Hanser Publisher, 1992. 289p.
- EULÁLIO A.C., CAPIATI N. J., BARBOSA S. E., *Municipal plastic waste: alternatives for recycling with profit*. In: 58th Annual Technical Conference – ANTEC 2000, Vol 3., Society of Plastics Engineers. Orlando: 2000. 3857p.
- FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler – Disponível em: <www.fepam.rs.gov.br> Acesso em: 27 de maio 2002.
- FERRARA G., MELOY T.P. *Low dense separation media process: a new process for low density solid separation*. Powder Technology, Ed. Elsevier, v. 103, p151-155, 1999.
- FINK M., FINK J. *Plastics recycling coupled with enhanced oil recovery. A critical survey of the concept*. Journal of Analytical and applied pyrolysis, Ed. Elsevier, v.40-41, p187-200, 1997.
- FLETCHER B. L., MACKAY M.E. A model of plastic recycling: does the recycling reduces the amount of waste? Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 17, p141-151, 1996.
- FRADOS, J. *Plastic Engineering Handbook of the Society of the Plastic Industry, Inc*. München: 4th Ed. Van Nostrand Reinhold Company, 1976. 909p.
- GEORGE S. D., DILLMAN S. H. *Recycled Fiberglass composite as a reinforced filler in post-consumer recycled HDPE plastic lumber*. In: 58th Annual Technical Conference – ANTEC 2000, Vol 3., Society of Plastics Engineers. Orlando: 2000. 3857p.
- GOMES V.G., THAI N. *Recycling options for mixed plastics in automotive shredder residues*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, 1998?
- HARPER, C.A *Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*. München: 2nd Ed. Mc Graw- Hill, 1992.

- HANSSEN O.J., OLSEN A. MØLLER H. *National indicators for material efficiency and waste minimization for the Norwegian packaging sector 1995_/2001*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v.38, p123-137, 2003.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico 2000*. Disponível em: < www.ibge.gov.br > Acesso em: 27 de maio de 2002.
- IPIRANGA – *Folha de dados do PEAD* – Disponível em: <www.ipq.com.br>. Acesso em: 07 de abril 2004.
- ISO 179/1A, *Plastics -- Determination of Charpy impact properties*, 1982.
- KASEVA M.E., GUPTA S. K., *Recycling – an environmentally friendly and income generating activity towards sustainable solid waste management. Case study – Dar es Salaam City, Tanzania*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 17, p299-309, 1996.
- KHAIT K., RIDDICK E. G., TORKELESON J. M. *Effect of multiple processing cycles on post-consumer plastics recycled via solid-state shear pulverization*. In: 60th Annual Technical Conference – ANTEC 2002, Society of Plastics Engineers, San Francisco- USA 4095p.
- KIRAN, N., EKINCI E., SNAPE C. E., *Recycling of plastic wastes via pyrolysis*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 29, p273-283, 2000.
- KJAERHEIM, G., *Cleaner Production and sustainability*. Journal of Cleaner Production, Ed. Elsevier, 2003.
- LAMPO R., NOSKER T., MCLAREN M. *Demonstration installations of recycled-plastic lumber for bridges, marine pilings, and railroad ties*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, 2000?.
- LEU H., LIN S.H., *Cost-benefit analysis of resource material recycling*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 23, p183-192, 1998.
- LI S., *Junk-buyers as the linkage between waste sources and redemption depots in urban China: the case of Wuhan*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 36, p319-335, 2002.
- LIXO – Disponível em: < www.lixo.com.br >. Acesso em: 27 de maio 2002.
- LORENZETTI, CLAUDIO C. *Micro Usina de Reciclagem de Plásticos da Restinga* Instituto de Estudos, Formação e Assessoria em Políticas Sociais - Pólis - Disponível em: <<http://www.polis.org.br/publicacoes/download/arquivos/textoclaudio.doc> >. Acesso em: 08 de julho de 2004.

- MANRICH S., BEHIE L.A., BERRUTI F. *Estudos na reciclagem de resíduo plástico urbano para aplicações substitutivas de papel para escrita e impressão*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Ed. ABPol v. 10 nº3, p170-178, 2000.
- MARTINS M., DE PAOLI M. A. *Polypropylene compounding with recycled material I. Statistical response surface analysis*. Polymer Degradation and Stability, Ed. Elsevier, v.71, p293-298, 2001.
- MASUDA T., KUSHINO T., MATSUDA T., MUKAI S.R., HASHIMOTO K., YOSHIDA S. *Chemical recycling of mixture of waste plastics using a new reactor system with stirred heat medium particles in steam atmosphere*. Chemical Engineering Journal, Ed. Elsevier, v. 82, p173-181, 2001.
- MCDONALD S., BALL R. *Public participation in plastics recycling schemes*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 22, p123-141, 1998.
- METCAL & EDDY; *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse*. EUA: Ed. Mc Graw-Hill, 1991 1334p.
- MILENE B. J., BEHIE L. A., BERRUTI F. *Recycling of waste plastics by ultrapyrolysis using a internally circulating fluidized bed reactor*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Ed. Elsevier, v. 51, p157-166, 1999.
- MOLGAARD C. *Environmental impacts by disposal of plastic from municipal solid waste*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 15. p51-63, 1995.
- MUSTAFA, N. *Plastics Waste Management: Disposal, Recycling and Reuse*, New York: Ed. Marcel Decker Inc., 1993. 413p.
- NORRIE J., LAFORTUNE P., BEAUCHAMP C. J., *Characterization of waste materials originating from Quebec supermarkets and an assessment of recycling potential*. Resources. Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 19, p265-277, 1997.
- NOTÍCIAS SOBRE PORTO ALEGRE de 26 de janeiro de 2004. *Central de comercialização de materiais recicláveis beneficia catadores*. Disponível em: <<http://www.portoalegre.rs.gov.br/noticias/default.asp?proj=81&secao=367&ml=18608>> Acesso em: 29 de janeiro de 2004.
- PETROBRAS ENERGIA – *Folha de dados do PS* – Disponível em: <www.petrobrasenergia.com/documents/common/innovaHF555.pdf >. Acesso em: 07 de abril 2004.
- PATEL M., THIENEN N., JOCHEN E., WORREL E. *Recycling of plastics in Germany*. Resources. Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 29, p65-90, 2000.
- PINTO F., COSTA P., GULYURTLU I., CABRITA I. *Pyrolysis of plastic waste. I. Effect of plastic waste composition on product yield*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Ed. Elsevier, v. 51, p39-55, 1999.
- PLASTIVIDA Disponível em: <www.plastivida.com.br> Acesso em: 12 de junho de 2002.

- PORTUGAL. Decreto-Lei n.º 366-A/97 de 20 de dezembro de 1997. *Estabelece os princípios e as normas aplicáveis à gestão de embalagens e resíduos de embalagens, com vista à prevenção da produção desses resíduos, à reutilização de embalagens usadas, à reciclagem e outras formas de valorização de resíduos de embalagens e conseqüente redução da sua eliminação final, assegurando um elevado nível de protecção do ambiente, e ainda a garantir o funcionamento do mercado interno e a evitar entraves ao comércio e distorções e restrições da concorrência na Comunidade.* Ministério do Ambiente. Disponível em: <www.resol.com.br> Acesso em: 27 de maio 2002
- POST, JOHAN *The problems and Potential of Privatising Solid Waste Management in Kumasi, Ghana.* Habitat International, Great Britain: Ed. Elsevier Science, v. 23 No. 2, p201-215, 1999.
- RECICLÁVEIS Disponível em: <www.reciclaveis.com.br>. Acesso em: 27 de maio 2002.
- RECICLOTECA Disponível em: <www.recicloteca.org.br/in-reap.htm>. Acesso em: 27 de maio 2002.
- REID LEA W. Plastic incineration versus recycling: a comparison of energy and landfill cost saving. *Journal of Hazardous Materials*, Ed. Elsevier, v. 47, p295-302, 1996.
- RIO DE JANEIRO. Lei n.º 3206, de 12 de abril de 1999. *Autoriza o poder executivo a criar normas e procedimentos para o serviço de coleta, reciclagem e disposição final de garrafas e embalagens plásticas no estado do Rio de Janeiro.* . Disponível em: <www.resol.com.br>. Acesso em: 27 de maio 2002.
- RIO DE JANEIRO. Decreto estadual n.º 31.819, de 09 de setembro de 2002. Estabelece normas para destinação final de garrafas plásticas e dá outras providências. . Disponível em: <www.resol.com.br>. Acesso em: 27 de maio 2004.
- RIO GRANDE DO SUL. Decreto n.º 38.356, de 01 de abril de 1998. *Aprova o Regulamento da Lei n.º 9.921, de 27 de julho de 1993, que dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul.* Disponível em: <www.sema.rs.gov.br> Acesso em: 27 de maio 2002.
- SAKAI S., HIRAOKA M. *Municipal solid waste incinerator residue recycling bythermal processes.* Waste Management, Ed. Elsevier, v. 20, p249-258, 2000.
- SÃO PAULO. Lei n.º 13.316, de 01 de fevereiro de 2002. *Dispõe sobre a coleta, destinação final e reutilização de embalagens, garrafas plásticas e pneumáticos, e dá outras providências.* Disponível em: <www.resol.com.br> Acesso em: 27 de maio 2002.
- SHEN H., FORSSBERG E., PUGH R. J. *Selective flotation separation of plastic by particle control.* Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 33, p37-50, 2001.
- SHENT H., PUGH R. J., FORSSBERG E. *A review of plastics waste recycling and the flotation of plastic.* Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 25, p85-109, 1999.

- SIKKA P., *Plastic waste management in India*. In: 5th World Congress on Integrated Resources Management (R'2000) Toronto, 2000.
- SMITH D.N., HARRISON L.M., SIMMONS A.J. *A survey of schemes in the United Kingdom collecting plastic bottles for recycling*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 25, p17-34, 1999.
- SOFRES T. N. *Cost Efficiency of packaging recovery systems – The case of France, Germany, the Netherlands and the United Kingdom*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, 2000.
- SPAACK A. *Technical update on constructive reclamation of plastic waste*. In: 46th Annual Technical Conference – ANTEC 1988, Society of Plastics Engineers. Atlanta, 1988.
- SSMA. SECRETARIA DE SAÚDE E MEIO AMBIENTE. Portaria nº. 05/89. *Dispõe sobre critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lancem seus efluentes nos corpos d'água interiores do estado do Rio Grande do Sul*. Disponível em: <www.fepam.rs.gov.br> Acesso em: 06 de março de 2001.
- STUSEK D., KRISHNASWAMY P., LOEBICK B., *Demonstration of recycled plastic lumber in structures*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, 2000?.
- SUAREZ C. M., MANO E. B. *Brittle-ductile transition of gamma-irradiated recycled polyethylenes blend*. Polymer Testing, Ed. Elsevier, v. 19, p607-616, 2000.
- SUBRAMANIAN P.M. *Plastic recycling and waste management in the US*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 28, p253-263, 2000.
- TILMAN C., SANDHU R. *A model recycling program for Alabama*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, v. 24, p183-190, 1998.
- TONGLET M., PHILLIPS P., BATES M.P. *Determining the drivers for householder pro-environmental behaviour: waste minimization compared to recycling*. Resources, Conservation and Recycling, Ed. Elsevier, 2004.
- WASSERMANN A. I., ESPÍNDOLA L. C., CASTILHOS A. F., HOLZ N., CARDOZO N. S. M. *Análise da Processabilidade na Reciclagem de Plásticos Misturados*. In: Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul – (SULMAT 2002)
- WENISCH S., ROUSSEAU P., MÉTIVIER-PIGNON H. *Analysis of technical and environmental parameters for waste-to-energy and recycling: household waste case study*. International Journal of Thermal Sciences, Ed. Elsevier, v. 43, p519-529, 2004.
- WILLIAMS E. A., WILLIAMS P. T. *Analysis of products derived from fast pyrolysis of plastic waste*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Ed. Elsevier, v. 41, p347-363, 1997.