

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

**Processamento e Características Mecânicas
de Resíduos Plásticos Misturados**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Adriana Inés Wassermann

Porto Alegre

2006

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

Processamento e Características Mecânicas de Resíduos Plásticos Misturados

Adriana Inés Wassermann

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

Área de concentração: Reciclagem de Plásticos

Orientador:

Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Co-orientadores:

Prof. Norberto Holz

Prof. Assis Francisco de Castilhos

Porto Alegre

2006

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 *Processamento e Características Mecânicas de Resíduos Plásticos Misturados*, elaborada por Adriana Inés Wassermann, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Arq. Mayra Hias Moreira Huergo

Prof. Dr. Nilson Romeu Marcílio

Prof. Dr. Ricardo Baumhardt Neto

Prof. Dr. Telmo Francisco Manfron Ojeda

Dedico esta dissertação aos meus pais, Guillermo e Teresa, e aos meus irmãos, Gustavo, Federico, Maria Teresa, German e Virginia. Eles estão e estarão sempre comigo nas minhas orações.

Agradecimentos

À Deus pela perseverança, determinação, luz e força para prosseguir e finalizar esta dissertação.

Ao meu Orientador, Nilo Sérgio, pelos ensinamentos, compreensão, orientação, paciência e “mão na massa” quando foi preciso.

Ao meu pai, Guillermo, ao German e ao Gustavo, pelas correções e ensinamentos.

À grande amiga Letícia Christmann Espíndola, pela amizade, ajuda, força, companheirismo e sinergia.

À Ipiranga Petroquímica S.A., nas pessoas de Eros, Rosina, Vitor, Gabriela, Carlos Lima, Elton Taborda, Moisés, Márcia, Adriana e aos Analistas, pela ajuda, paciência e cooperação. Agradeço também ao Flávio, pelo apoio e incentivo.

Ao CEFET/RS, nas pessoas dos professores Assis, João, Peixoto, Rafael e aos bolsistas Alexandre e Diego. Um agradecimento especial ao Assis, pelos ensinamentos, apoio, amizade e determinação.

Ao DMLU e às pessoas que trabalham no Centro de Triagem Aterro da Zona Norte.

Aos meus grandes amigos, pelo apoio, incentivo e compreensão, e, em especial ao Rafael pela ajuda e livros emprestados.

Ao meu fiel amigo, pelo companheirismo durante a escrita desta dissertação.

“...para preservar a natureza é preciso pensar primeiro no ser humano. O desenvolvimento sustentável é hoje o caminho possível para preservar a comunidade, sua cultura, sua economia e assim salvar a floresta.”

Guilherme Imhoff (02/01/1976 - 29/07/2004)

Resumo

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um dos grandes problemas da atualidade. Ferramentas como a coleta seletiva e a reciclagem tornam mais fácil a reintegração de materiais que seriam descartados, não retornando à cadeia produtiva. Dentre estes materiais, os plásticos misturados apresentam maior dificuldade de reciclagem devido à presença de diferentes tipos de plásticos e ao elevado nível de contaminação dos RSU, constituindo-se nas principais causas para o seu descarte em aterros sanitários. As amostras utilizadas neste trabalho, compostas principalmente por plásticos misturados, foram retiradas do resíduo não comercializado por uma das Unidades de Triagem pertencente ao programa de Coleta Seletiva de Porto Alegre. PEBD, PEAD, PP, PET, PVC e PS são os maiores componentes das amostras, sendo testadas diferentes estratégias de processamento. Uma delas foi a injeção direta das amostras não lavadas e a outra o processamento, tanto por injeção direta quanto por extrusão seguida de injeção, da fração sobrenadante obtida durante a lavagem (Fração Leve), constituída principalmente por poliolefinas. As amostras foram analisadas quanto à resistência ao impacto Izod, resistência à tração, resistência à flexão, temperatura de amolecimento Vicat e analisadas por microscopia. O processo de injeção direta da Fração Leve apresentou-se como a melhor alternativa de processamento, permitindo obter produtos com níveis de propriedades mecânicas similares àquelas correspondentes às resinas virgens.

Abstract

The management of municipal solid waste (MSW) is one of the biggest problems nowadays. Strategies such as selective collection and recycling make waste material reintegration easier, sending them back to the productive chain. Among these materials, commingled plastics present more difficulties to recycling due to the mix of different plastics and MSW high contamination level, becoming one of the main reasons to be disposed on landfills. The samples used, composed mainly of commingled plastics, were taken from non commercialized residue from the selective unit which belongs to Porto Alegre's selective collection program. LDPE, HDPE, PP, PET, PVC and PS were the major components of the samples. Two different processing approaches were tested. One was the direct injection of the unwashed samples, and the other the processing, either by direct injection or extrusion followed by injection, of the floating fraction obtained during washing (light fraction), which was constituted mostly by polyolefins. The samples were analyzed by microscopy and tested for Izod impact resistance, tensile and flexural strength, and Vicat softening temperature. The direct injection of the light fraction was the best alternative, providing products with mechanical properties similar to the virgin resins.

Sumário

Introdução	1
1.1 Estrutura do Trabalho.....	2
Revisão Bibliográfica	3
2.1 Preocupação com o Meio Ambiente	3
2.1.1 A problemática dos resíduos	4
2.2 A reciclagem	10
2.3 Resíduos plásticos e sua reciclagem	12
2.4 Tipos de reciclagem de plásticos.....	15
2.5 Reciclagem de plásticos pós-consumo.....	17
2.5.1 Separação e lavagem.....	17
2.5.2 Influência do processamento sobre as propriedades dos polímeros.....	18
2.6 Reciclagem de plásticos misturados – Desenvolvimento de alternativas	19
2.6.1 Processo Klobbie.....	21
2.6.2 Processo ART	21
2.6.3 Processo Superwood	22
2.6.4 Processo de Extrusão contínua.....	22
2.6.5 Processo Reverzer	22
2.6.6 Processo Recycloplast.....	23
2.6.7 Outros métodos ou tecnologias de processamento.....	23
2.7 Propriedades e estrutura de plásticos misturados.....	25
2.8 Resíduos plásticos misturados em Porto Alegre	29
Materiais e Métodos.....	30
3.1 Escolha da Unidade de Triagem, coleta e caracterização da amostra.....	30
3.1.1 Escolha da Unidade de Triagem para a coleta das amostras.....	30
3.1.2 Procedimento da coleta	32
3.1.3 Caracterização das amostras coletadas.....	34
3.2 Estratégias de processamento utilizadas	37
3.3 Preparação da amostra.....	39
3.3.1 Moagem	39
3.3.2 Lavagem.....	40
3.3.3 Secagem	41
3.3.4 Aglutinação	42
3.4 Testes preliminares de processamento	43
3.4.1 Processamento por extrusão.....	43
3.4.2 Processamento por injeção.....	43
3.5 Preparação dos corpos-de-prova para determinação das propriedades mecânicas	44
3.6 Propriedades mecânicas	46
3.6.1 Resistência ao impacto Izod.....	46
3.6.2 Resistência à tração e resistência à flexão.....	47
3.6.3 VICAT	48

3.7 Morfologia por Microscopia	49
Resultados e Discussão.....	50
4.1 Preparação da amostra.....	50
4.1.1 Caracterização	50
4.1.2 Moagem	51
4.1.3 Lavagem.....	52
4.1.4 Secagem e aglutinação	53
4.2 Testes preliminares de processamento	54
4.2.1 Processamento por extrusão.....	54
4.2.2 Processamento por injeção.....	57
4.3 Testes para definição das condições de processamento na preparação dos corpos-de-prova para determinação de propriedades mecânicas.	59
4.4 Propriedades mecânicas	61
4.4.1 Resistência ao impacto Izod.....	62
4.4.2 Resistência à tração	63
4.4.3 Resistência à flexão.....	64
4.4.4 VICAT	65
4.5 Morfologia por Microscopia	67
Conclusões.....	73
5.1 Conclusões deste trabalho	73
5.2 Propostas para trabalhos futuros	74
Referências Bibliográficas.....	75
Anexos.....	82
7.1 Resistência ao impacto Izod.....	82
7.2 Resistência à tração	83
7.3 Resistência à flexão.....	84

Lista de figuras

Figura 3.1:	Unidade de Triagem Aterro da Zona Norte.....	31
Figura 3.2:	Triagem de materiais e separação por tipo nas bombonas	31
Figura 3.3:	Coleta da amostra no recipiente de rejeitos	32
Figura 3.4:	Prensagem do fardo	33
Figura 3.5:	Fardos prontos para a comercialização.....	34
Figura 3.6:	Etapas do trabalho	38
Figura 3.7:	Moinho de facas	39
Figura 3.8:	Tanque com a cesta para lavagem da amostra.....	40
Figura 3.9:	Secagem do material em estrutura de aço inoxidável.	41
Figura 3.10:	Equipamento para resistência ao impacto Izod (IPQ, 2003).....	46
Figura 3.11:	Pêndulo caindo sobre o corpo de prova.....	46
Figura 3.12:	Corpo de prova após o impacto do martelo.....	46
Figura 3.13:	Corpos de prova para Izod antes e após o teste.....	47
Figura 3.14:	Máquina universal de ensaios.....	48
Figura 3.15:	Equipamento utilizado no teste Vicat.....	48
Figura 4.1:	Percentagens em peso de cada polímero após a homogeneização	51
Figura 4.2:	Após a lavagem, percentagens de cada polímero na Fração Leve e Fração Pesada	53
Figura 4.3:	Instabilidade durante o processamento por extrusão.....	55
Figura 4.4:	Material após a granulação.....	55
Figura 4.5:	Perfis da peça injetada em A e B.....	58
Figura 4.6:	Estrutura interna porosa da peça.....	59
Figura 4.7:	Polímero fundido da saída da extrusora	60
Figura 4.8:	Peça injetada	62
Figura 4.9:	Análise de normalidade dos dados de VICAT com todos os resultados e sem a posição 3.....	66
Figura 4.10:	Temperatura de amolecimento VICAT dos Processo E-I e I.....	67
Figura 4.11:	Imagens de amostras dos processos E-I e I (aumento 60 vezes).....	67
Figura 4.12:	Imagens de amostras dos processos E-I e I (aumento 250 vezes).....	68
Figura 4.13:	Imagens de amostras dos processos E-I e I (aumento 5000 vezes).....	68
Figura 4.14:	Imagens de amostras dos processos E-I e I (aumento 25000 vezes).....	68
Figura 4.15:	Imagens de amostras dos processos E-I e I, aumento 40000 vezes)	69
Figura 4.16:	Imagens de amostras dos processos E-I e I - elétrons retoespalhados (aumento 250 vezes).....	69
Figura 4.17:	Imagens de incrustações encontradas nas amostras (aumento 60 vezes).....	69
Figura 4.18:	Comparação entre as amostras dos processos E-I (acima) e I (abaixo). ...	71
Figura 4.19:	Comparação das superfícies das amostras dos processos E-I (acima) e I (abaixo).	72

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Definições de “lixo” encontradas na literatura	5
Tabela 2.2: Classificação do Resíduo	6
Tabela 2.3: Municípios, total e com limpeza urbana e/ou coleta de lixo, por natureza dos serviços, (IBGE, 2002).....	7
Tabela 2.4: Quantidade Diária de Lixo Coletado (t/dia) (IBGE, 2002).....	8
Tabela 2.5: Tipos de disposição final do lixo no Brasil e no RS, em peso.....	8
Tabela 2.6: Número de municípios com limpeza urbana e/ou coleta seletiva, por situação da coleta seletiva (IBGE, 2002).....	11
Tabela 2.7: Tipos de reciclagem de plásticos	15
Tabela 2.8: Propriedades físicas e mecânicas de PEAD virgem e pós-consumo usado em embalagens de leite (EHRIG apud GIBBS, 1992).....	19
Tabela 2.9: Tipos de amostras analisadas (SCOTT, 1994).....	27
Tabela 2.10: Comparação das propriedades das amostras (SCOTT, 1994).....	27
Tabela 2.11: Produtos produzidos a partir de resíduos plásticos misturados pós-consumo (MUSTAFA, 1993).	28
Tabela 2.12: Unidades de Triagem de Porto Alegre, mais a Unidade de Triagem e Compostagem.(DMLU, 2006).....	29
Tabela 3.1: Coletas realizadas na Unidade de Triagem Aterro da Zona Norte.	32
Tabela 3.2: Principais propriedades de queima dos plásticos. (CEFET, 2000; GRISON, 1985)	35
Tabela 3.3: Densidade dos plásticos mais comuns (FERRARA, 1999).....	37
Tabela 3.4: Temperatura de Fusão para plásticos. (PEACOCK, 2000).....	39
Tabela 3.5: Parâmetros da extrusora.....	45
Tabela 3.6: Parâmetros da injetora.....	45
Tabela 4.1: Caracterização da amostra por tipo em porcentagem em peso.	50
Tabela 4.2: Fração da amostra após lavagem, em porcentagem.	52
Tabela 4.3: Perfis de temperatura e corrente da extrusora.....	54
Tabela 4.4: Características da extrusão da Fase Leve.....	56
Tabela 4.5: Perfis de temperatura da injetora e características final do produto.	57
Tabela 4.6: Perfil de temperaturas usado na extrusão.....	60
Tabela 4.7: Perfil de temperaturas utilizado na injetora	61
Tabela 4.8: Resultados de Impacto Izod dos processos E-I e I.....	62
Tabela 4.9: Valores de impacto Izod típicos das resinas virgens (IPQ, 2003).	63
Tabela 4.10: Resultados do teste de tração dos processos E-I e I.....	64
Tabela 4.11: Resistência à tração de resinas virgens (IPQ, 2003; MARK, 1999, ASTM, 2002, SAECHTLING, 1995).....	64
Tabela 4.12: Resultados do teste de flexão dos processos E-I e I.....	65
Tabela 4.13: Resultado Vicat com todas as amostras dos processos I e E-I, em °C.....	65
Tabela 6.1: Resultados de Trabalho, em J das amostras dos Processos I e E-I	75
Tabela 6.2: Resultados de Impacto Izod	76
Tabela 6.3: Resultados de resistência à tração das amostras do Processo I.....	76
Tabela 6.4: Resultados de resistência a tração das amostras do Processo E-I.....	77
Tabela 6.5: Resultados de resistência a flexão das amostras do Processo I.....	77
Tabela 6.6: Resultados de resistência a flexão das amostras do Processo E-I.....	78

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABS	Terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno
APME	<i>Association of Plastics Manufacturers in Europe</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEFET/RS	Centro Federal de Educação Tecnológica
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
DMLU	Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre
EPR	Borracha de etileno e propileno
EVA	Polietileno acetato de vinila
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPQ	Ipiranga Petroquímica S.A.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopia Eletrônica por Varredura
NBR	Normas Brasileiras
NITSE	Extrusora dupla rosca <i>não-intermeshing</i>
NJCT	<i>New Jersey Curbside Tailings</i>
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de baixa densidade linear
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
PVC	Poli(cloreto de vinila)
RSU	Resíduo Sólido Urbano
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Capítulo 1

Introdução

Os materiais poliméricos são cada vez mais utilizados no dia-a-dia em diferentes produtos, desde simples embalagens até utilidades nobres, como peças de automóveis, eletrodomésticos, etc.. Além disso, o plástico vem substituindo muitos materiais caros e mais pesados. Sendo assim, em consequência do grande volume de aplicações dos plásticos, a sua percentagem entre os componentes do lixo urbano tem apresentado um crescimento contínuo.

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um dos grandes problemas da atualidade. Ferramentas como a coleta seletiva e a reciclagem tornam mais fácil a reintegração de materiais que seriam descartados, não retornando à cadeia produtiva. Dentre estes materiais, os plásticos misturados apresentam maior dificuldade de reciclagem devido à presença de diferentes tipos de plásticos e ao elevado nível de contaminação dos RSU, constituindo-se nas principais causas para o seu descarte.

A prevenção ou solução do problema da poluição ambiental proveniente de lixo plástico é cada vez mais importante. Podemos citar dois tipos de soluções: 1) antes da geração do lixo, com a redução da quantidade de plástico da embalagem, programas de incentivo à redução de lixo, taxações em embalagens; porém estas alternativas apresentam alto custo de implantação e necessidade de conscientização da população e do meio industrial; 2) pós-consumo, com programas de reciclagem, aterros sanitários e a céu aberto e incineração (MANO, 1994).

No caso de sistemas de Coleta Seletiva, o problema diminui, mas ainda está presente. Porto Alegre conta com um Programa de Coleta Seletiva através do qual são coletadas diariamente 60 toneladas de Lixo Seco. Este material é distribuído entre Unidades de Triagem (ver Tabela 2.12), onde os materiais são separados, enfardados, armazenados e comercializados (LIXO, 2002). Destas 60 toneladas, cerca de 45% em peso não são comercializados, sendo encaminhados aos Aterros Sanitários para descarte (DMLU, 2006).

A fração polimérica do descarte dos Centros de Triagem caracteriza-se pela presença de uma grande variedade de tipos de resinas (com seus diferentes *grades*) e tipos de produto, como embalagens flexíveis (filmes), rígidas (potes e frascos), expandidas (Isopor) e espumadas, bem como pela elevada contaminação, sendo os principais contaminantes óleo, terra, restos de comida, entre outros. O fato de diferentes resinas, e inclusive *grades* diferentes de uma mesma resina, requererem condições diferenciadas de processamento, além do elevado nível de contaminação da fração polimérica de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são fatores que dificultam o seu reaproveitamento por reciclagem mecânica, constituindo-se nas principais causas para o seu descarte em aterros sanitários. No entanto, a grande quantidade de material que é atualmente descartado justifica esforços para alterar esta realidade. Deve-se lembrar que a reciclagem permite economia de matérias-primas e de recursos naturais, ao aumentar o ciclo de vida útil dos materiais.

A grande maioria dos processos propostos para o reaproveitamento de frações de lixo compostas por plásticos misturados envolve processos complexos de separação (TOBIM, 1996). Na maioria dos casos, o custo elevado destes processos de separação inviabiliza economicamente a utilização destas técnicas de reciclagem.

Neste sentido, esforços visando diminuir o número de etapas e reduzir custos no processamento de plásticos misturados, constituem aspectos tecnológicos de grande interesse, no que diz respeito à problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos.

O presente trabalho está inserido neste contexto, sendo seu objetivo o estudo de diferentes estratégias para o processamento de plásticos misturados provenientes do rejeito da Coleta Seletiva da Cidade de Porto Alegre.

1.1 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação apresenta-se dividida em sete capítulos, sendo que o conteúdo dos capítulos seguintes está disposto da forma descrita abaixo.

O capítulo dois apresenta alguns conceitos importantes bem como o Estado da Arte da reciclagem de plásticos misturados, do processamento de polímeros e suas propriedades mecânicas, abordando de forma sucinta os principais trabalhos publicados.

O capítulo três apresenta os materiais e métodos de pesquisa utilizados neste trabalho dividido em 3 seções, sendo que a primeira aborda os passos para a coleta da amostra. Na segunda seção os processos realizados no CEFET/RS são descritos, apresentando as etapas de preparação da amostra e testes preliminares de processamento. Na terceira seção são abordadas as atividades realizadas na Ipiranga Petroquímica S.A., como os testes de avaliação das propriedades mecânicas do material e as análises de microscopia.

O capítulo quatro apresenta uma discussão dos resultados obtidos, sendo organizado de maneira equivalente ao capítulo três. No capítulo cinco, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, o capítulo seis apresenta a revisão bibliográfica e o capítulo sete, os anexos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo aborda a problemática da geração de resíduos, as alternativas para a sua utilização e exemplos de reciclagem, com enfoque nos resíduos plásticos misturados pós-consumo, seu processamento, caracterização e propriedades mecânicas finais.

2.1 Preocupação com o Meio Ambiente

Cada vez mais o tema “Meio Ambiente” está presente no dia-a-dia das pessoas e populações. A preocupação com as novas gerações, a sua qualidade de vida e a escassez crescente de recursos naturais tem gerado conscientização e busca de soluções para os problemas ambientais. Neste contexto, a partir da década de 1970 surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável (APME, 2004) o qual consiste na busca de desenvolvimento considerando paralelamente aspectos ambientais, sociais e econômicos. Na década de 90, o conceito de desenvolvimento sustentável se estabilizou como o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro (WWF, 2007; Petrobrás, 2007; VAN BELLEN, 2004).

De acordo a esta perspectiva, o desenvolvimento sustentável de uma cidade tem como foco a proteção ao meio ambiente, satisfazendo as necessidades da população e levando em consideração o bem-estar das gerações futuras. Isto requer o gerenciamento simultâneo de questões como habitação, consumo de energia e água, geração e destino de resíduos, entre outros fatores, focando a minimização de impactos ambientais a fim de servir de modelo na redução do desperdício de recursos naturais.

Um dos requisitos para o desenvolvimento sustentável é que todo material retirado do meio ambiente seja utilizado ao máximo, o que faz com que a problemática da geração e destino de resíduos assuma um papel fundamental na sociedade moderna. Em termos de impacto

ambiental, é importante garantir que o total de recursos naturais utilizados na reciclagem dos resíduos não exceda os benefícios ambientais que o produto reciclado traz.

A partir da década de 1960, foram realizadas iniciativas visando a proteção ambiental, como o Clube de Roma e a ECO-92. Acordos internacionais foram fechados, como o Protocolo de Montreal, em 1987, sobre o fim das emissões de Cloro-Flúor-Carbono (CFC) e o Protocolo de Kyoto, em 1997, sobre a diminuição das emissões de gás carbônico. Nas décadas de 1970 e 1980, na tentativa de valorizar produtos cujas etapas de fabricação são menos nocivas, foram criados alguns rótulos ambientais, ou selos verdes, na Alemanha (1977), Canadá (1988), Japão (1988) e Brasil (1997), entre outros. Em 1992, foi criada a norma inglesa BS 7750, certificando que o processo produtivo é ambientalmente correto. A comunidade europeia criou a EMAS (*Eco Managemet and Audit Scheme*) e iniciaram-se os estudos de uma norma ISO ambiental, sendo criada a ISO 14000, que é considerada um certificado de qualidade ambiental das empresas, demonstrando que estas respeitam as leis e regulamentações, procedem um contínuo aprimoramento ambiental do processo produtivo e do sistema de gestão, treinam seus funcionários e se submetem a auditorias periódicas. Com estes conceitos surgiu a Análise do Ciclo de Vida do Produto (ACV) (ver seção 2.1.1). Em dezembro de 2002, existiam no Brasil 900 empresas com certificado ISO 14001 (ZANIN, 2004).

Nos Estados Unidos, a legislação americana prevê cotas mínimas de reciclagem para cada município, sem levar em consideração a flutuação de preços dos materiais, o que leva à estocagem destes em depósitos de materiais reciclados para a posterior venda com preços mais competitivos (LOUIS, 2005).

Na legislação brasileira, o início ocorreu em 1981, com a Lei 6938, inaugurando a Política Nacional do Meio Ambiente e a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Em 1985, a Lei 7347 prevê Ação Civil Pública junto ao Ministério Público para ocorrências ambientais. Em 1986 instituiu-se a obrigatoriedade de realização prévia de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) para uma série de atividades potencialmente impactantes. A Constituição Brasileira de 1988 possui um capítulo especial (Capítulo IV) que aborda o assunto, incluindo entre os direitos do cidadão e da sociedade o meio ambiente ecologicamente equilibrado, sendo por isso considerada uma das mais modernas do mundo para o meio ambiente. O licenciamento ambiental é um dos principais mecanismos da legislação ambiental brasileira, pois estabelece regras para o projeto, a instalação e a operação de empresas que vão poluir o ambiente ou utilizar recursos naturais. Em 1988, foi aprovada a Lei 9605, de crimes ambientais, que estabelece multas, prestação de serviços à comunidade ou até prisão para os infratores (ZANIN, 2004; BRASIL, 1988).

2.1.1 A problemática dos resíduos

Algumas definições encontradas na literatura para lixo, refugo e lixo domiciliar são mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Definições de “lixo” e “refugo” encontradas na literatura

Autor	Definição
CARLOS MINE, apud GRIPPI (2001)	“Lixo é matéria-prima fora do lugar. A forma com que uma sociedade trata do seu lixo, dos seus velhos, dos meninos de rua e dos doentes mentais atesta o seu grau de civilização. O tratamento do lixo doméstico, além de ser uma questão com implicações tecnológicas, é antes de tudo uma questão cultural”.
CALDERONI (2003)	“O lixo é um material mal-amado. Todos desejam dele descartar-se. Até pagam para dele se verem livres. (...) O que é pior, o lixo é inevitável”. Lixo é todo material inútil, é aquele que se “joga fora”.
CALDERONI (2003)	Lixo domiciliar é todo material sólido cujo proprietário não lhe atribui mais valor e dele deseja descartar-se, atribuindo ao poder público a responsabilidade pela sua disposição final.
CALDERONI (2003)	Refugo significa sobra de processo produtivo, geralmente industrial.
ABNT (1993)	Lixo é material desprovido de utilidade pelo seu possuidor

No início do século XXI, com uma população mundial estimada em 6,2 bilhões, a geração de lixo é de mais de um bilhão de toneladas de resíduos sólidos por ano (ZANIN, 2004). Em 2000, o Brasil produziu o dobro do lixo que produzia 15 anos antes (BORGES, 2000).

Nos últimos 30 anos, a análise da interação do homem com a Natureza tem levado a temas como a capacidade limitada de recursos energéticos e materiais do planeta, o aumento do volume de resíduos e sua destinação, a transformação do meio físico e a perspectiva de crise energética e de água potável, entre outros tópicos. A visão anterior, de que a Natureza é fonte inesgotável de recursos materiais e energéticos, e ainda que possui capacidade infinita de deposição, está sendo substituída por um modelo com base no ciclo de vida e integração da gestão de resíduos. Este conceito requer a montagem de um sistema complexo de procedimentos e ações em que a quantidade de resíduos a ser reaproveitada dentro de um sistema produtivo ou de consumo seja cada vez maior e a quantidade a ser disposta, menor (ZANIN, 2004).

Toda poluição é desperdício, logo é preciso pensar em não gerar resíduos antes da questão de tratamento ou a reciclagem (BORGES, 2000). Sob esta ótica, a palavra lixo, associada a qualquer coisa imprestável, nociva e que não tem valor, passa a ser substituída por resíduo, com uma conotação de que se não tem utilidade para uns, possui valor para outros.

Nesta perspectiva, as alternativas em relação aos resíduos são:

- Evitar ou, quando não for possível, diminuir a produção de resíduos;
- Reutilizar ou, quando não for possível, reciclar os resíduos;
- Utilizar a energia presente nos resíduos;
- Inertizar e dispor os resíduos sem valor.

O conceito de Análise do Ciclo de Vida (ACV) completa o esquema acima, considerando o efeito de um produto, processo ou serviço no Meio Ambiente em todas as etapas envolvidas, como a concepção mercadológica, planejamento, extração e uso da matéria prima, gasto com energia, transformação industrial, distribuição e transporte, uso, reuso, manutenção e reciclagem, até sua disposição final, isto é, do berço ao túmulo. Neste contexto, a opção mais nobre dos resíduos é a sua reutilização.

A classificação do resíduo é regulamentada pela NBR 10004 – Classificação de Resíduos sólidos, seguindo os critérios dos riscos potenciais ao meio ambiente (BORGES, 2000), sendo descrita na Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Classificação do Resíduo

Tipos de Resíduo	
Classe I	Resíduos perigosos, com potencial de riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Tem como características: inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, reatividade e patogenicidade. São exemplos: as baterias e produtos químicos.
Classe II	Substâncias não inertes, cujas características são biodegradabilidade, solubilidade ou combustibilidade. São exemplos: a matéria orgânica e o papel.
Classe III	Substâncias inertes, como rocha, tijolos, vidro e plásticos e borracha que não se degradam rapidamente.

Estima-se que em 1989, os resíduos perigosos aterrados (Classe I) representavam 68% do total gerado no Canadá e nos Estados Unidos e 50% na Europa. Por vários anos, foi utilizado o conceito de fim de tubo, isto é, o tratamento dos resíduos perigosos após a sua geração. Este conceito está sendo alterado, direcionando o foco para modificações e melhorias nos processos produtivos visando a redução dos resíduos perigosos antes da sua geração (CHAABAN, 2001).

As ações para o combate da crise ambiental devem focar a destinação adequada dos resíduos sólidos, pois são geradas cerca de 125 mil toneladas de lixo domiciliar e 36,5 mil toneladas de lixo público por dia no Brasil, sendo a gestão da limpeza urbana e dos resíduos sólidos gerados de responsabilidade dos municípios (IBGE, 2002; GRIPPI apud CHEVALIER, 2001).

Para poder analisar mais claramente a situação atual no país com relação ao destino de resíduos, é conveniente apresentar primeiramente os seguintes conceitos:

- Vazadouro a céu aberto (Lixão): local utilizado para disposição dos resíduos, em bruto, sobre o terreno sem qualquer cuidado ou técnica especial, sem proteção ao meio ambiente ou à saúde pública;
- Vazadouro em áreas alagadas: locais (corpos d'água) utilizados para lançamento do lixo, em bruto;
- Aterro controlado: local onde são despejados os resíduos e após são cobertos com uma camada de terra, com a finalidade de reduzir os impactos ambientais;

- Aterro sanitário: local preparado para a disposição final do lixo, com normas operacionais específicas para a garantia da segurança do aterro, no que diz respeito à poluição ambiental e saúde pública;
- Aterro de resíduos especiais: local onde são dispostos os resíduos sólidos dos serviços de saúde, como hospitais, postos de saúde, bancos de sangue, entre outros, sendo antes tratados com a finalidade de esterilização e redução do seu volume; a coleta deste resíduo é realizada de maneira separada, chamada de coleta de lixo especial;
- Estação de compostagem: instalação especializada onde a matéria orgânica existente nos resíduos é lentamente transformada em composto e após empregada na agricultura;
- Estação de Triagem é o local onde ocorre a separação e posterior venda de materiais recicláveis;
- Unidades de Incineração: instalação especializada onde se processa a combustão controlada de resíduos entre 800°C e 1200°C, com a finalidade de transformá-los em matéria estável e inofensiva à saúde pública, reduzindo seu peso e volume;
- Locais não fixos: locais diversos e não apropriados à destinação do lixo;
- Coleta de lixo especial: coleta de lixo industrial, de unidades de saúde, radioativo e lodos provenientes de estação de tratamento de água e esgoto, além do lixo de portos, aeroportos e rodoviárias.

De posse destas definições, pode-se então apresentar dados do IBGE (2002) relativos à destinação de resíduos sólidos no Brasil em 2000. A Tabela 2.3 apresenta o número total de municípios, os municípios brasileiros com limpeza urbana e/ou coleta de lixo, por natureza dos serviços, segundo as Grandes Regiões, destacando o RS, Porto Alegre e sua Região Metropolitana. Verifica-se que o Sul e o Sudeste são as regiões com o maior número de municípios que apresentam coleta seletiva e reciclagem de resíduos.

Tabela 2.3: Municípios, total e com limpeza urbana e/ou coleta de lixo, por natureza dos serviços, (IBGE, 2002)

	Total de Municípios	Municípios c/ limpeza urbana	Limpeza Urbana	Coleta de Lixo	Coleta Seletiva	Reciclagem	Remoção Entulhos	Coleta Lixo Especial
Brasil	5.507	5.475	5.461	5.471	451	352	4.690	3.567
Norte	449	445	442	445	1	2	334	192
Nordeste	1.787	1.769	1.769	1.767	27	23	1.512	1.049
Sudeste	1.666	1.666	1.666	1.666	140	115	1.468	1.283
Centro-Oeste	446	446	446	446	9	19	413	286
Sul	1.159	1.149	1.138	1.147	274	193	963	757
Rio Grande do Sul	467	459	457	459	138	105	379	274
Porto Alegre	1	1	1	1	1	1	1	1
R.Metrop.POA	28	28	28	28	17	17	27	24

A Tabela 2.4 apresenta os dados de quantidade de lixo coletada por dia, por unidade de destino final do lixo coletado no Brasil, segundo as Grandes Regiões, destacando o RS, Porto Alegre e sua Região Metropolitana (IBGE, 2002) enquanto que na Tabela 2.5 apresentam-se os sumários dos dados da Tabela 2.4 e os índices referentes ao ano de 1989, a título de comparação.

Tabela 2.4: Quantidade Diária de Lixo Coletado (t/dia) (IBGE, 2002).

	Total	Vazadouro céu aberto (lixão)	Vazadouro áreas alagadas	Aterro controlado	Aterro sanitário	Estação composta- gem	Estação de triagem	Incine- ração	Locais não fixos	Outra
Brasil	228.413	48.322	233	84.575	82.640	6.550	2.265	1.031	1.230	1.566
Norte	11.067	6.279	56	3.134	1.469	5	-	8	96	20
Nordeste	41.558	20.043	45	6.072	15.030	74	93	22	128	50
Sudeste	141.617	13.756	87	65.851	52.542	5.438	1.263	945	781	953
Centro- Oeste	14.297	3.131	8	4.684	5.553	686	77	26	105	27
Sul	19.875	5.112	37	4.834	8.046	347	833	30	120	516
RS	7.468	1.147	20	2.049	2.864	127	697	16	34	515
POA	1.610	-	-	-	1.050	-	60	-	-	500
R. Metr. POA	3.566	76	-	754	1.963	9	250	10	-	505

Tabela 2.5: Tipos de disposição final do lixo no Brasil e no RS, em peso

Ano da Pesquisa	% Brasil		% RS
	1989	2000	2000
Vazadouro céu aberto (lixão)	75,41	21,16	15,36
Vazadouro áreas alagadas	0,65	0,10	0,27
Aterro controlado	12,45	37,03	27,43
Aterro sanitário	9,34	36,18	38,35
Estação de compostagem	1,20	2,87	1,70
Estação de triagem	0,87	0,99	9,33
Incineração	0,08	0,45	0,21
Locais não fixos	-	0,54	0,46
Outros	-	0,69	6,90

Analisando os dados da Tabela 2.5, 21,16% dos resíduos sólidos urbanos do Brasil são despejados a céu aberto (lixões) e 37,03% em aterros controlados (depósitos periodicamente cobertos), sendo estes considerados locais ecologicamente incorretos devido ao potencial de poluição atmosférica, hídrica e de solos. Por outro lado, são considerados locais ecologicamente corretos de disposição dos resíduos sólidos urbanos coletados: os aterros

sanitários (36,18%), as estações de compostagem (2,87%), as estações de triagem (0,99%) e as unidades de incineração (0,45%) (IBGE, 2002; ZANIN, 2004).

Embora o panorama de destinação final de resíduos esteja muito aquém do desejado, nota-se uma melhora acentuada em relação à pesquisa realizada em 1989 pelo IBGE, onze anos antes. Na época, 75,41% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil eram despejados a céu aberto (lixão), 0,65% em áreas alagadas, 12,45% em aterros controlados, 9,34% em aterros sanitários, 1,20% em estações de compostagem, 0,87% em estações de triagem e 0,08% em unidades de incineração (ZANIN, 2004).

Comparativamente, observa-se que de 1989 para 2000 houve um aumento do uso das alternativas consideradas ecologicamente corretas, como aterros sanitários e estações de compostagem, incineração e triagem. O aumento dos aterros controlados deve-se provavelmente à cobertura de antigos lixões. Vale a pena ressaltar que os dados da Tabela 2.5 apresentam valores médios para todo o país, sendo que o resultado pode variar de região para região.

São cada vez mais escassas as áreas para aterros sanitários nas áreas urbanas, sendo que, no futuro, corre-se o risco de não haver soluções práticas ambiental e economicamente viáveis. A tendência mundial é a de diminuir ao máximo possível o material aterrado. Deste modo, com a conscientização ambiental crescente, ocorre a redução da quantidade de lixo jogada nos aterros e lixões a céu aberto e o aumento no reaproveitamento dos resíduos através do reuso e da reciclagem do lixo gerado. A destinação final do lixo coletado no Brasil em 2000, em peso, é distribuída em 47,2% a utilização de aterros sanitários, 22,3% aterros controlados e 30,5% lixões, sendo que em número de municípios, somente 32,2% dos municípios brasileiros dispõem seus resíduos em aterros adequados (13,8% em aterros sanitários e 18,4% em aterros controlados), 63,6% dos municípios dispõem seus resíduos em lixões e 4,2% em outros locais. De qualquer maneira, estes números estão melhores que os de 1989, quando apenas 10,7% dos municípios brasileiros depositavam seus resíduos em aterros adequados. (IBGE, 2002).

O crescimento descontrolado do consumismo provoca um aumento na geração do lixo, sendo que as alternativas tradicionais de disposição deste lixo em aterros sanitários estão cada vez mais caras, mais raras e mais distantes. (CALDERONI, 2003).

Existem vários programas de reciclagem que visam a redução da destinação inadequada de resíduos, como os de algumas empresas, como a Xerox, IBM, DuPont, entre outras que estão modificando seus processos, visando produtos que possam ser reutilizados e reaproveitados para outros fins.

Todos os aspectos recém discutidos mostram a importância da reciclagem, desde o ponto de vista do aumento do ciclo de vida de materiais até a diminuição da quantidade de resíduos para disposição final.

2.2 A reciclagem

Reciclagem, aplicada a lixo ou resíduo, é definida como um processo onde um material já utilizado para seu propósito, descartado e separado do lixo seja reprocessado, reintroduzido ao processo produtivo e transformado em um novo produto, que pode ser semelhante ou com características diferentes ao inicial (CALDERONI, 2003).

Como benefícios da reciclagem, Grippi (2001) cita:

- Redução do lixo aterrado sem necessidade;
- Preservação de recursos naturais;
- Economia de energia;
- Redução da poluição ambiental;
- Geração de empregos diretos e indiretos.

O conceito de reciclagem de lixo urbano está ligado à redução das áreas para disposição em aterros sanitários, seguido pela criação de novo valor a um material assim que este perde seu valor original. (COSTA, 2000).

Quando se levam em consideração os resíduos urbanos, um dos aspectos principais com respeito à reciclagem é a maneira como os resíduos recicláveis são coletados. As duas alternativas que surgem neste sentido são a coleta bruta e a coleta seletiva. Na coleta bruta, os materiais são coletados e enviados a uma usina de lixo para triagem e segregação dos recicláveis, sendo uma gestão governamental. A coleta seletiva é a separação, na própria fonte geradora, dos componentes que podem ser recuperados, mediante um acondicionamento distinto para cada componente ou grupo de componentes nas Unidades de Triagem. Neste contexto, as Unidades de Triagem e a coleta seletiva apresentam-se como alternativa viável para o gerenciamento do lixo urbano, propiciando a reintegração de materiais recicláveis à cadeia produtiva.

Outra abordagem sobre a reciclagem de materiais do Resíduo Sólido Urbano (RSU) indica duas alternativas, a primeira é a separação manual dos resíduos, tais como: aço, alumínio, vidro e papel, nos sacos de lixo. Neste tipo de coleta, o importante é recuperar o material limpo suficiente para satisfazer os compradores dos resíduos, sendo separados em materiais recicláveis e o resto de materiais misturados e sujos. A segunda alternativa é a separação dos resíduos recicláveis nas residências, alternativa que possui como vantagem a minimização da contaminação dos materiais recicláveis e a facilidade de separação posterior mais detalhada, como o vidro por cor, o papel por tipo, entre outros (MUSTAFA, 1993).

Conforme a ABNT, Coleta Seletiva é a coleta que remove os resíduos previamente separados pelo gerador, tais como papéis, latas, vidros e outros. (ABNT, 1993)

Entre as vantagens da coleta seletiva, podem ser citadas (GRIPPI, 2001):

- Qualidade dos materiais a serem reciclados é superior, pois se apresentam menos contaminados que na coleta comum;
- Estímulo à cidadania, através da participação e envolvimento da população;
- Benefícios sociais, bem como geração de empregos diretos e indiretos e geração de renda com a venda dos materiais reciclados;
- Parcerias com catadores, cooperativas, empresas, associações ecológicas, escolas, sucateiros entre outros;
- Redução do volume do lixo disposto no aterro sanitário, aumentando a vida útil deste.
- Economia de energia elétrica e matéria-prima virgem;

A Tabela 2.6 apresenta o número de municípios brasileiros com serviço de limpeza urbana e/ou coleta seletiva, por situação da coleta seletiva nos municípios, e a quantidade de lixo coletado por dia em toneladas, segundo as Grandes Regiões, destacando o RS, Porto Alegre e sua Região Metropolitana (IBGE, 2002). Destaca-se nesta Tabela, a grande quantidade de municípios da Região Sul e Sudeste que possuem coleta seletiva em atividade.

Tabela 2.6: Número de municípios com limpeza urbana e/ou coleta seletiva, por situação da coleta seletiva (IBGE, 2002).

	Total de Municípios	Situação da coleta seletiva no município			Quantidade de lixo coletado (t/dia)
		Em atividade	Interrompido	Não há coleta seletiva	
Brasil	5.475	451	50	4.974	4.290
Norte	445	1	1	443	-
Nordeste	1.769	27	4	1.738	199
Sudeste	1.666	140	20	1.506	2.225
Centro-Oeste	446	9	4	433	189
Sul	1.149	274	21	854	1.677
RS	459	138	13	308	597
POA	1	1	-	-	60
R. Metr. POA	28	17	2	9	276

Do total de municípios que possuem coleta seletiva de lixo no Brasil, nem todos recuperam todos os tipos de materiais. Dos 451 municípios brasileiros que possuem coleta seletiva, 436 destes recuperam papel e papelão, 422 recuperam plástico, 412 municípios recuperam vidro, 387 municípios recuperam metais ferrosos e não ferrosos e 44 destes recuperam outros tipos de materiais (IBGE, 2002).

Além dos programas de coleta seletiva, uma significativa parcela dos resíduos destinados à reciclagem é oriunda da ação dos catadores de lixo. Em função disto, a problemática da gestão de resíduos apresenta também um forte caráter social, sendo que na opinião de muitos o primeiro passo para o desenvolvimento sócio-ambiental sustentável é reconhecer o catador como o principal agente do processo de transformação (MIRANDA, 2000). Segundo IBGE (2002), os serviços de limpeza urbana empregam cerca de 317,7 mil pessoas em todo o país, sem contar os cerca de 24 mil catadores que atuam na coleta de lixo em lixões.

Por outro lado, o crescimento na implantação de programas de coleta seletiva e o aumento gradual na participação do produtor dos resíduos na disposição dos mesmos e na educação ambiental da população têm aumentado o interesse na reciclagem, fazendo com que esta ocupe um papel muito importante nas ações de gerenciamento de resíduos.

2.3 Resíduos plásticos e sua reciclagem

A preocupação com a poluição ambiental gerada por resíduos plásticos começou logo após a Segunda Guerra Mundial, quando se registrou um aumento significativo na produção mundial de plásticos.

Com relação à sua natureza, o descarte do plástico é classificado em pós-industrial e pós-consumo. O plástico pós-industrial provem principalmente de refugos de processos de produção e transformação, aparas, rebarbas, etc.. No caso do plástico pós-consumo, os resíduos são descartados pelos consumidores, sendo a maioria proveniente de embalagens. (COSTA, 2000).

Em se tratando de plásticos, torna-se importante o conceito de reciclabilidade, que é a habilidade que o material tem de readquirir as propriedades originais do seu estado virgem, após processamento. Os metais apresentam alta reciclabilidade, pois a segunda aplicação (após a reciclagem) é a mesma da primeira (matéria prima virgem), o mesmo não ocorrendo com o papel, a borracha e a maioria dos polímeros, que apresentam baixa reciclabilidade, pois a segunda aplicação é inferior à primeira, resultando em menor valor agregado. Como exemplo, o polietileno, cuja segunda aplicação é a produção de sacos de lixo, sendo originalmente parte de peças de valor agregado mais elevado (VILLALBA, 2002).

Por outro lado, a participação do plástico no lixo é maior nos países mais desenvolvidos em comparação com os países menos desenvolvidos, devido aos hábitos alimentares, sendo o consumo de plástico na Alemanha de cerca de 70 kg/habitante/ano, nos Estados Unidos e no Japão cerca de 50 kg/habitante/ano e no Brasil cerca de 10 kg/habitante/ano (AGUIAR apud ABIQUIM, 1998). Em São Paulo no ano de 1927, 82,5% dos resíduos sólidos da cidade eram compostos por matéria orgânica, caindo para 64,4% em 1993. Neste ano, a parcela de plásticos representava 12,1% do lixo urbano, inexistindo no ano de 1927 (ZANIN, 2004).

Dos plásticos produzidos no Brasil, 16,5% são reciclados em média, o que equivale a cerca de 200 mil toneladas por ano. Em média, o material corresponde a 29% do total de plásticos separados pelas cidades que fazem coleta seletiva. A taxa de reciclagem de plástico na Europa

há anos está estabilizada em 22%, sendo que em alguns países a prática é impositiva e regulada por legislações complexas e custosas para a população local, diferentemente do Brasil, onde a reciclagem acontece de forma espontânea. O Brasil ocupa o 4º lugar na reciclagem mecânica do plástico, ficando atrás, apenas da Alemanha, Áustria e EUA. Em 2004 a Europa reciclou o equivalente a 48 mil toneladas (CEMPRE, 2006).

A composição do lixo plástico sofre influências de alguns aspectos como: a época do ano em que estes resíduos são coletados e o poder aquisitivo dos moradores do bairro da coleta. (MANO, 1994).

Os resíduos plásticos podem causar ao ambiente sérios impactos relacionados aos extremos da sua cadeia produtiva: o esgotamento da matéria-prima não renovável e o acúmulo de resíduos de difícil degradabilidade (ZANIN apud TEIXEIRA, 2004). Devido à difícil degradabilidade, a disposição de plásticos em aterros gera camadas impermeáveis que afetam a troca de líquidos e gases no interior do aterro, prejudicando a decomposição dos materiais biologicamente degradáveis, além de dificultar a compactação. Além disso, a queima destes plásticos pode liberar gases tóxicos (GRIPPI, 2001).

A Análise do Ciclo de Vida dos Plásticos, desde a sua concepção até o término da vida útil, com seu descarte ou recuperação, varia de região para região e depende essencialmente da finalidade e aplicação deste plástico, devido aos aditivos incorporados, que servem para melhorar suas propriedades e aumentar seu tempo de vida útil. Dependendo do tipo de aplicação deste plástico, sua vida útil pode ser de 1 a 2 anos, como nas embalagens descartáveis, de 3 a 5 anos, para utensílios domésticos e brinquedos; 6 a 9 anos em recipientes e componentes de automóveis e de eletroeletrônicos e mais de 10 anos para tubos, fios, móveis e materiais para construção civil (PIVA, 2004).

A reciclagem de plásticos exige uma postura pró-ativa por parte da indústria, pois é preciso capacitar fornecedores, estabelecer parcerias, pensar no plástico pós-consumo como matéria prima e não como lixo sem valor. As atividades de preparação da matéria-prima, como coleta, separação, moagem e lavagem devem ser valorizadas, a fim de agregar valor ao material que será processado, sucateiros, catadores, industriais. Desta maneira, representa uma oportunidade para que os catadores sejam inseridos no mercado de trabalho, através das atividades de preparação do material para a reciclagem como a moagem e lavagem do material. (AGUIAR, 1998).

No Brasil, não é clara a política de incentivos fiscais para as empresas recicladoras. Desta maneira, o preço do material reciclado, muitas vezes supera o valor do material virgem, como por exemplo o papel reciclado, que é mais caro que o papel branco. No caso dos plásticos, não há qualquer incentivo fiscal para a sua reciclagem, e, quantas vezes o resíduo plástico for descartado e reciclado, tantas vezes este será tributado (SINO RETO, 2000).

Como a reciclagem é considerada atividade industrial, a tributação provoca o seu incentivo ou desestímulo. Os recicladores consideram injusto o conceito acima, na medida em que a reciclagem é a continuação do processo industrial anterior, já tributado. Em 2002, o plástico

reciclado, assim como as aparas e as sobras de plástico foram isentos do Imposto Sobre Produtos Industrializados (IPI, de esfera nacional), com exceção do PET, cujo IPI reduziu de 15% para 10%. Porém pouco tempo depois, a tributação foi novamente imposta, 15% para o PET e 5% para as demais resinas, porém com um mecanismo de ressarcimento para a venda de produtos fabricados com resíduos plásticos já tributados. Outro tributo é o Imposto Estadual Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS, de esfera estadual), cuja alíquota sobre materiais reciclados varia de 7% até 18% na maior parte do país, com exceção de Tocantins e São Paulo, isentos. O Imposto Sobre Serviços (ISS, de esfera municipal), também dificulta a reciclagem, tributando os trabalhadores autônomos membros de associações e cooperativas de catadores (ZANIN, 2004). Em suma, até o momento o Brasil não possui uma legislação que estabeleça uma política nacional de resíduos.

Como exemplo, a política de resíduos da Alemanha repassa para os fabricantes dos produtos a responsabilidade pela destinação dos resíduos e pela reciclagem de uma parcela dos materiais (reversão de responsabilidades) (AGUIAR, 1998). Devido às dificuldades operacionais e de mercado, o plástico é o material com maior custo de coleta e reciclagem na Alemanha, aproximadamente US\$ 1,00 por quilo de plástico contra US\$ 0,10 por quilo de vidro, sendo que a coleta e reciclagem de embalagens do lixo movimentam US\$ 2,5 bilhões anuais.

A prática adotada em países como Bélgica, Suécia, Holanda, Alemanha e Japão segue uma rota cíclica, onde o consumidor compra o produto plástico e, quando não o quer mais, o devolve à loja onde comprou, que por sua vez direciona o produto à fábrica que o produziu, para que esta última promova a reciclagem do produto plástico. Nestes casos, as indústrias têm incentivos do governo para aplicar esta prática, como subsídios e descontos nos impostos. (LUCENA, 2001).

Os países europeus possuem um programa de coleta e reciclagem de resíduos de embalagens pós-consumo. Em 2000, doze países possuíam um sistema denominado Ponto Verde (*Green Dot*), onde as empresas empacotadoras pagam taxas a uma empresa nacional de recuperação de embalagens e outros dois países possuíam convênios onde os produtores se responsabilizavam pela coleta e reciclagem de seus produtos (ANSEMS, 2000).

Em 2003, o panorama de materiais reciclados no Brasil apresentava os seguintes percentuais: papel, 22%; papelão, 72%; plástico, 15%; lata de alumínio, 78%; latas de aço, 35%; vidro, 42%; pneus, 20%; PET, 26%; embalagem longa vida, 15% e lixo orgânico, 1,5% (ABRELPE, 2003). Na época, existiam no Brasil cerca de 300 indústrias de reciclagem de plástico, que faturavam cerca de R\$ 250 milhões e geravam até 20 mil empregos diretos. Graças à iniciativa dessas empresas, 15% do plástico consumido retornava à produção como matéria-prima, equivalendo a 200 mil toneladas por ano (ABRELPE, 2003). Estima-se que, dos plásticos consumidos no Brasil, 400 mil toneladas/ano são plásticos reciclados e destes, 12 mil toneladas/ano são provenientes de resíduos pós-consumo.

As recicladoras de plásticos, na sua maioria de pequeno porte, não têm condições para aproveitar todo o potencial da matéria prima. Seus produtos são de baixa qualidade, sem especificações definidas e conseqüentemente, vendidos a preços baixos. (AGUIAR, 1998).

Por isso, o plástico reciclado tem má fama de ser material irregular, com características extremamente variáveis, de baixa confiabilidade e sem flexibilidade para cores, restringindo a aplicação dos plásticos reciclados a mercados pouco exigentes e a produtos com pouca responsabilidade.

2.4 Tipos de reciclagem de plásticos

A Tabela 2.7 mostra dois tipos de classificação de reciclagem do plástico, normalizadas pela ASTM. A primeira divide-se em mecânica, energética e química e classifica a reciclagem por tipo de processamento (GRIPPI, 2001; SINO RETO, 2000; ZANIN, 2004; PIVA, 2004). O segundo tipo de classificação divide a reciclagem de plásticos em primária, secundária, terciária e quaternária, (GRIPPI, 2001; MANO, 1994; ZANIN, 2004; PIVA, 2004). conforme definido na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Tipos de reciclagem de plásticos

Classificação	Definição
Reciclagem Mecânica	Transforma resíduos plásticos industriais e pós-consumo em grânulos, que são posteriormente utilizados na fabricação de sacos de lixo, solados, pisos entre outros.
Reciclagem Energética	Incineração dos resíduos plásticos, com reaproveitamento da energia gerada sem danos ao meio ambiente.
Reciclagem Química	Quebra das moléculas do plástico, gerando monômeros, óleo e gases que são aproveitados como matéria prima na indústria petroquímica, utilizando o processo de pirólise, hidrólise, etc...
Reciclagem primária ou pré-consumo	Recuperação dos resíduos na fonte geradora, indústria ou empresa transformadora. Os resíduos são reciclados por processos convencionais, produzindo materiais com propriedades e características semelhantes ao produto original. O produto final desta reciclagem, em grânulos, é novamente processado gerando novos produtos manufaturados.
Reciclagem secundária ou pós-consumo	Recuperação dos resíduos plásticos oriundos do lixo, encontrados em lixões, usinas de compostagem, coleta seletiva, sucata, entre outros. Este tipo de reciclagem se aplica principalmente a termoplásticos, onde representam cerca de 80% do total de plásticos, devido a sua facilidade para remoldagem e reutilização. No caso dos plásticos termorrígidos, são utilizados mais comumente como carga, após a sua moagem, em novas formulações.
Reciclagem terciária	Recuperação dos resíduos plásticos pela conversão destes em matérias-primas, como monômeros e oligômeros, utilizadas para formar novamente resinas virgens ou outras substâncias, como gases e óleos. Este processo ocorre por pirólise, conversão catalítica entre outros.
Reciclagem quaternária	Destruição dos resíduos plásticos, por combustão, com a finalidade de obter energia térmica.

A reciclagem energética ou incineração, na qual aproveita-se o potencial energético do plástico (1 kg deste representa 1 kg de óleo combustível), representa 15% da reciclagem de plásticos da Europa Ocidental. Um exemplo deste tipo de reciclagem é a usina de Saint-Queen, em Paris, onde são geradas 15.400 MW por ano, abastecendo de energia elétrica 70 mil pessoas. No caso da Reciclagem Química, degradam-se os plásticos em insumos básicos, porém este processo é inviabilizado pelo alto custo de processamento, existindo poucas plantas do gênero no mundo, sendo um exemplo desta tecnologia a Veba Oel, na Alemanha (SINO RETO, 2000). Outro exemplo de reciclagem química é um processo que dissolve os *flakes* de PET e depolimeriza-os em monômeros que podem ser usados para produzir novo PET (MARSHALL, 2003).

A reciclagem primária, como o aproveitamento de aparas e produtos fora de especificação, ocorre na maioria das vezes nas próprias indústrias geradoras com a finalidade de redução dos custos de produção, gerando produtos com as mesmas propriedades dos produzidos a partir das resinas virgens. Com base neste conceito, a reciclagem primária muitas vezes não é considerada como reciclagem propriamente dita. Já na reciclagem secundária, também chamada de pós-consumo, os materiais plásticos muitas vezes estão sujos e misturados, necessitando de etapas intermediárias de classificação, lavagem, entre outras, porém este tipo de reciclagem possui um papel muito importante, pois evita a disposição do resíduo pós-consumo em aterros (SAMMARCO, 1999).

Uma hierarquia de processamento de plásticos é baseada na manutenção ao máximo das qualidades e propriedades de cada material. Esta inicia pela reciclagem mecânica de apenas um tipo de polímero, seguida de misturas e por último a reciclagem química. A primeira alternativa seria a reciclagem mecânica de materiais puros ou reestabilizados, sem misturá-los a outro tipo de material ou cargas e/ou aditivos. Este tipo de prática, em relação aos resíduos urbanos, é dificultado tanto pelo nível de contaminação com sujeira e com outros tipos de materiais, quanto pela diversidade de tipos de polímeros existentes. Em segundo lugar, estaria o reprocessamento de dois polímeros juntos, formando uma blenda, indicada quando há dificuldade de separação destes, como o caso de resíduos pós-consumo ou quando há a predominância de dois tipos de plásticos. Segue a hierarquia a reciclagem mecânica de plásticos misturados, de diversos tipos, primeiramente sem e após com compatibilizantes, para facilitar a mistura da blenda. Após estas alternativas, vem a reciclagem química, que promove a depolimerização dos plásticos e o último meio de reciclagem seria a queima do polímero, com o reaproveitamento da sua energia (ZANIN, 2004).

A reciclagem terciária, ou química, converte resíduos plásticos em seus monômeros originais ou outros produtos químicos valiosos, que são usados como alimentação de processos industriais ou como combustíveis. Existem três tipos de processos: depolimerização, oxidação parcial e craqueamento (térmico, catalítico ou hidrocraqueamento). Na depolimerização, os polímeros são divididos em dois tipos, polímeros de condensação, como as poliamidas e poliésteres são depolimerizados através de reações de síntese reversa, e os polímeros de adição, como as poliolefinas, que não são facilmente depolimerizadas. A oxidação parcial utiliza oxigênio ou vapor, gerando uma mistura de hidrocarbonetos e sintetiza gás CO (Monóxido de Carbono) e Hidrogênio. No processo de craqueamento, as cadeias poliméricas são quebradas gerando compostos de menor peso molecular, o que pode ocorrer por reações

com hidrogênio (hidrocraqueamento), por reações em atmosfera inerte (pirólise), que pode ser craqueamento térmico ou craqueamento catalítico (GARFORTH, 2004). Um exemplo de reciclagem química dos resíduos plásticos misturados pós-consumo em misturas com PEAD é apresentado por Ding (1997) e Walendziewski (2005), em processo de depolimerização térmica e catalítica para a produção de hidrocarbonetos básicos.

A reciclagem mecânica é o processo de reciclagem mais utilizado no Brasil. Esta reciclagem, quando advinda de resíduos urbanos (coleta seletiva, catadores nos lixões ou usinas de triagem), aumenta a complexidade em razão das diferentes contaminações presentes, envolvendo operações específicas de separação, pré-lavagem, lavagem, enxágüe, moagem, secagem, cuidados com efluentes, entre outras.

Um estudo realizado pela APME (*Association of Plastics Manufacturers in Europe*), utilizando cenários para o gerenciamento de resíduos na Europa Ocidental, envolvendo reciclagem mecânica de plásticos separados e misturados, reciclagem química de plásticos misturados e recuperação energética. Nestes cenários, o percentual de reciclagem (mecânica + química) foi de 0%, 15%, 25%, 35% e 50%, sendo estes avaliados quanto ao impacto ambiental e os custos envolvidos. O resultado mostra que a reciclagem é sempre preferencial à recuperação energética dos resíduos, devido aos altos custos envolvidos e ao alto impacto ambiental desta opção. O aumento da taxa de reciclagem de 15% para 50%, combinado com a recuperação energética, aumenta os custos três vezes, com pequenos benefícios ambientais, mostrando que o melhor cenário é uma taxa de reciclagem de 15% (reciclagem mecânica + química) (MAYNE, 2002).

2.5 Reciclagem de plásticos pós-consumo

Os altos custos dos métodos tradicionais de coleta seletiva, dificuldade de separação e alteração das propriedades a cada ciclo de processamento são os principais problemas da reciclagem de misturas de materiais. Estes pontos são discutidos a seguir (AGUIAR, 1998).

Um estudo realizado em 39 municípios da grande São Paulo com 180 recicladores, em 1999, mostra que metade do mercado de reciclagem é proveniente de resíduo pós-consumo (PIVA apud PLASTIVIDA, 2004).

2.5.1 Separação e lavagem

O gargalo tecnológico-operacional aparece na etapa de preparação dos materiais para reciclagem mecânica. A produtividade e a qualidade dos materiais dependem das etapas de separação, moagem e lavagem, pois os equipamentos para processamento do material moído já apresentam tecnologia padrão conhecida. No caso da reciclagem de recipientes produzidos com resinas não facilmente identificáveis, a etapa de separação é a mais difícil e mais cara do seu processo de reciclagem (EHRIG, 1992).

Dos resíduos plásticos pós-consumo, após a separação da fração de plásticos facilmente identificáveis e recicláveis (PEAD não pigmentado e o PET branco e verde), resta uma fração

de plásticos misturados composta, por exemplo, por itens plásticos não identificáveis, poucas quantidades de plásticos específicos, embalagens plásticas multi-camadas, itens compostos de plásticos e outros componentes, itens muito contaminados, itens altamente pigmentados ou com recheios, itens com o mesmo polímero de diferentes taxas de fluidez, resíduos recuperados, entre outros (BISIO, 1994). O PEAD e o PET são vendidos diretamente para os recicladores e os restos provavelmente enviados aos aterros sanitários ou servem de matéria prima para a fabricação de produtos plásticos misturados (EHRIG, 1992).

Algumas dificuldades apresentadas pela reciclagem secundária são: a presença de vários tipos de plásticos, muitas vezes incompatíveis entre si, heterogeneidade de composição do resíduo plástico, as misturas de materiais em embalagens, como plásticos com papel e plásticos com metais (MANO, 1994).

As embalagens rígidas, como garrafas produzidas a partir das poliolefinas, apresentam vantagens na sua reciclagem pois utilizam na sua produção, através de extrusão por sopro, resinas de propriedades similares. Logo mesmo se tratando de matéria-prima pós-consumo, as propriedades finais do material reciclado são similares às propriedades da matéria prima utilizada e o processo de reciclagem é mais estável e facilmente controlado, sendo o mesmo efeito verificado com as garrafas feitas de PET. Outra vantagem das embalagens rígidas tipo garrafas é que os rótulos são facilmente retirados. Vários métodos de separação, lavagem, secagem e processamento são apresentados pelo autor, contemplando as embalagens rígidas de poliolefinas e PET, previamente separadas ou não, como os processos CPRR (Centro de Pesquisas em Reciclagem de Plásticos da *Rutgers University*), *Clean Tech*, *Graham Recycling* e *M.A. Industries*, *Parquet*, *Plastics Recycling Alliance*, *Plastics*, *Resource Group*, *Quantum Chemical*, entre outros (EHRIG, 1992).

Os filmes produzidos com poliolefinas podem ser monocamada ou multicamada, estes últimos com uma maior dificuldade de reciclagem, devido às camadas normalmente serem coextrusadas com diferentes tipos de resinas para proporcionar propriedades especiais ao filme, além do alumínio, que serve como barreira. A primeira linha de reciclagem deste tipo de filme nos Estados Unidos iniciou em 1991, pela *Union Carbide Chemicals and Plastics Company* (EHRIG, 1992).

2.5.2 Influência do processamento sobre as propriedades dos polímeros

Durante o processamento de resinas poliolefinicas, ocorrem alterações na estrutura molecular, devido a altas temperaturas, atmosfera oxidativa e cisalhamento, causando reações de alterações de cadeias como reações de *cross-linking*, gerando cadeias de maior peso molecular, diminuindo a fluidez, e reações de cisão de cadeia, gerando cadeias de baixo peso molecular, levando a alterações na distribuição de peso molecular e nas propriedades reológicas da resina. Estas alterações geralmente estão associadas à redução das propriedades mecânicas e térmicas do material (MUSTAFA, 1993). A exposição da resina ao processamento térmico é conhecida como a história termo-mecânica da resina. O comportamento da resina virgem exposta a múltiplas histórias térmicas não é geralmente um

bom preditor do comportamento das resinas recicladas pós-consumo, devido à utilização de aditivos e a possíveis contaminações (EHRIG, 1992).

Ehrig apud Gibbs (1992) descreve um trabalho realizado com polietileno de alta densidade (PEAD) virgem e pós-consumo usado em recipientes de leite. Os resultados mostrados por este autor (Tabela 2.8), indicam que houve pouca variação nas propriedades da resina pós consumo e a resina virgem após o processamento, com exceção do alongamento na ruptura, provavelmente devido a presença de contaminantes na primeira. Outra observação foi quanto à presença de bolhas e furos em peças de paredes finas produzidas com a resina pós-consumo.

Tabela 2.8: Propriedades físicas e mecânicas de PEAD virgem e pós-consumo usado em embalagens de leite (EHRIG apud GIBBS, 1992).

Propriedade	Resina reciclada pós-consumo	Resina Virgem	Resina virgem reprocessada
Índice de Fluidez (g/10min)	0,53	0,77	0,79
Densidade (g/cm ³)	0,961	0,963	0,961
Módulo de Flexão (MPa)	1540	1510	1510
Impacto Izod (J/cm)	1,5	1,3	0,9
Tensão no alongamento (MPa)	29,2	29,6	30,0
Tensão na ruptura (MPa)	22,0	15,2	17,2
Elongação na ruptura (%)	103	555	613
Tensão de Impacto (kJ/m ²)	152	172	178

Um estudo da Quantum Chemical Corporation mostra que a reciclagem de *grades* de extrusão de PEAD mantém as boas propriedades da resina, como o módulo de flexão, resistência à baixas temperaturas, tensão ao escoamento e à ruptura, e que a reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo de PEAD, após lavagem e granulação, possui adequada processabilidade, podendo ser utilizada em diversos processos de extrusão. Porém, verificam-se também perdas consideráveis nas propriedades de alongamento na ruptura, perdas moderadas na tensão de impacto, odores desfavoráveis e inaceitáveis níveis de contaminação, o que provoca furos em peças de paredes finas (EHRIG, 1992).

2.6 Reciclagem de plásticos misturados – Desenvolvimento de alternativas

Na Europa, em 2000, apenas Alemanha, França e Áustria processavam plásticos misturados. A composição e a qualidade do resíduo depende do sistema de coleta do resíduo e das etapas seguintes de separação e lavagem. Após a separação dos plásticos “pesados”, como PS, PET, PVC, o que resta é composto basicamente por PE e PP. Os avanços na tecnologia de reciclagem mecânica dos resíduos plásticos pós-consumo são direcionados à automação dos processos de separação mecânica e tecnologias de extrusão e aditivação que levem a melhoria da qualidade do produto final. Tecnologias de identificação em tempo real, como a análise por

infravermelho junto a algoritmos baseados em inteligência artificial, integração da lavagem e separação por hidrociclones, são exemplos promissores neste campo (ANSEMS, 2000).

Na Alemanha, os plásticos misturados são recolhidos juntos, processados e aglomerados, sendo enviados para reciclagem química ou a reciclagem mecânica. Os plásticos misturados e aglomerados podem ser processados de diversas maneiras, geralmente em produtos de paredes grossas, bastante adequados para a aplicação a que se propõe. Intrusão, um tipo de extrusão a baixas pressões, pode ser usada para produzir perfis com dimensões específicas. Moldagem por transferência é outra maneira de processar os plásticos misturados aglomerados diretamente em produtos finais. O material aglomerado, com pressão e temperatura, é fundido e alimentado diretamente em um molde com o formato do produto final. Este processo é geralmente grosseiro, robusto e utilizado para moldar produtos como placas grossas, paletes para transporte, elementos para isolamento acústico de paredes, entre outros (ANSEMS, 2000).

Outro desenvolvimento é a tecnologia de pulverização por cisalhamento em estado sólido (S³P), que transforma os resíduos plásticos misturados em pó, podendo ser utilizado diretamente no processamento de moldagem ou extrusão (ANSEMS, 2000; KRUSE, 2005; LYONS, 2005).

Um problema encontrado com a reciclagem de plásticos misturados é a variação da composição do resíduo sólido pós-consumo, o que dificulta o alcance de uma qualidade constante do produto final. No entanto, a cada ano novas tecnologias de processamento destes materiais reciclados são desenvolvidas, melhorando a qualidade da matéria prima. Levando em consideração o aspecto econômico da reciclagem de plásticos misturados, temos um aumento da oferta e demanda de produtos produzidos com estes materiais o que leva a redução dos custos. Um exemplo é a Áustria, onde o custo de reciclagem destes produtos, por tonelada, reduziu 60% em 6 anos, de 510 euros em 1993 para 215 euros, em 1999 (ANSEMS, 2000).

Para a reciclagem bem sucedida de plásticos misturados, os equipamentos utilizados devem apresentar algumas características especiais. O equipamento deve ser capaz de processar a mistura de plásticos a uma alta taxa de cisalhamento com alta temperatura, por um período de tempo curto. Processar o material a altas taxas de cisalhamento é necessário a fim de obter uma boa dispersão. O tempo curto de residência é requerido a fim evitar a degradação do material causada por altas temperaturas. O produto tem que ser produzido em apenas uma etapa, pois o custo de um processo em duas etapas (homogeneização e extrusão/granulação) é geralmente muito elevado e não se torna economicamente atrativo. O material a ser processado deve ter uma composição razoavelmente constante, com a finalidade de produzir produtos com propriedades constantes. Isto pode ser alcançado obtendo materiais da mesma fonte geradora. As vazões elevadas de produção são necessárias para minimizar custos tais como o tempo e as despesas dos equipamentos. As propriedades mecânicas dos produtos plásticos misturados são geralmente baixas. Devido à variedade de cores e problemas de acabamento superficial, o material final freqüentemente não apresenta uma boa aparência, o que dificulta a competição dos produtos plásticos misturados com os produtos feitos a partir

de materiais virgens. Entretanto, podem competir com uma variedade de produtos de madeira e concreto, onde estas propriedades são aceitáveis. Em muitos casos os produtos plásticos misturados oferecem propriedades que são superiores aos materiais originais.

Diversos processos estão sendo desenvolvidos especialmente para processar plásticos misturados. Estes processos são capazes de produzir produtos a partir de uma variedade de misturas de plásticos contendo heterogeneidades macroscópicas, todas com algum grau de contaminação. Devido à natureza heterogênea destas misturas, processos misturados (*commingled processes*) são limitados a produzir produtos de maior espessura em comparação com os processos convencionais, onde pequenas imperfeições internas não impactam de maneira expressiva na perda de propriedades mecânicas (EHRIG, 1992; BISIO, 1994).

Também podem citar-se alguns processos industriais, conforme a seguir.

2.6.1 Processo Klobbie

O processamento de misturas de resíduos plásticos envolve a utilização destes resíduos assim como são descartados, o que o difere de um processo convencional de reciclagem, que necessita separação e lavagem. O processamento de misturas é normalmente associado a “madeira plástica” produzida através do processo de moldagem por extrusão Klobbie, que possibilita processar resíduos plásticos misturados e contaminados moldados diretamente em perfis lineares, produzindo artigos de aplicação e propriedades semelhantes às da madeira. O plástico alimentado no sistema Klobbie pode ser altamente contaminado com papel, metais leves, sujeira ou plásticos termorrígidos.

Este processo, desenvolvido na década de 70 por Eduard Klobbie na Holanda, denominado de Processo de Intrusão, por ser uma junção de extrusão com injeção, se propôs a transformar resinas termoplásticas não separadas em produtos cujas propriedades sejam parecidas às da madeira. O sistema, também chamado de moldagem por intrusão, consiste em uma longa extrusora com moldes lineares de larga seção transversal montados em um carrossel rotatório submerso parcialmente em um tanque com água. A extrusora funde o material misturado, até o preenchimento de um dos moldes, então o carrossel gira uma posição para possibilitar o enchimento do molde seguinte. O molde passa lentamente pela água, sendo a peça resfriada e retirada do molde. Vários outros processos foram baseados no equipamento desenvolvido por Klobbie, como os desenvolvidos por Superwood International Ltd., na Irlanda e Advanced Recycling Technology - ART, na Bélgica (EHRIG, 1992; BISIO, 1994).

2.6.2 Processo ART

Uma extrusora desenvolvida através da tecnologia ART processa misturas com até 40% de contaminações na forma de materiais que não amolecem, como polímeros termorrígidos, e materiais como papel, vidro, sujeira, metal, entre outros. Os outros 60% são poliolefinas que fundem durante o processamento, encapsulando os contaminantes (EHRIG, 1992).

Sob o nome de ET/1 e ET/2, produzem “madeira plástica” e produtos similares, com alimentação de resíduos plásticos pós-consumo e industriais. Para este processo é importante

um conhecimento aproximado da composição da alimentação, a fim de melhorar o controle da qualidade final dos produtos. Quanto à alimentação, é necessária a descompactação prévia do filme plástico, não sendo desejável que tenha altos teores de contaminantes. O material granulado é alimentado no funil de uma extrusora, onde é fundido e bombeado a baixas pressões para um molde cilíndrico com a forma da madeira. A extrusora trabalha adiabaticamente, com uma rosca curta de velocidade variável. O desenho da rosca, assim como a alta rotação, levam a baixos tempos de residência, o que minimiza o risco de degradação e queimados. Os materiais processados são as poliolefinas, PS, PET, PC, PA, com temperaturas médias de processamento entre 177 e 199 °C. Logo, os materiais com temperaturas de fusão mais altas, PET e PC, junto com contaminantes sólidos, termorrígidos e metais, são enclausurados pela fração de baixo ponto de fusão. Os moldes utilizados neste processo são simples devido as baixas pressões praticadas (MUSTAFA, 1993; BISIO, 1994).

2.6.3 Processo Superwood

O processo é adiabático e utilizado para produzir madeira plástica baseado no princípio de Klobbie, e similar a tecnologia ART. Uma extrusora funde os materiais plásticos por fricção com uma rosca de motor elétrico. O material plastificado é conduzido através de um orifício largo para um molde de aço. Os moldes estão dispostos em um carrossel, que gira em um grande tanque de água onde ocorre a refrigeração do molde. Este processo é utilizado para poliolefinas, embora PET possa ser processado sob um maior controle e PVC apenas em pequenas proporções (MUSTAFA, 1993; BISIO, 1994).

2.6.4 Processo de Extrusão contínua

Outro processo similar, denominado Extrusão Contínua, produz perfis lineares a partir de resíduos plásticos misturados processados através da extrusão contínua de material polimérico, em uma matriz de área transversal larga e resfriada em água como no processamento de tubos. Os sistemas têm a capacidade de produzir perfis ocos e produtos espumados. O sistema pode produzir perfis de comprimentos variados, tais como perfis muito longos. Entretanto, os sistemas de extrusão contínua requerem mais espaço do que outros sistemas, porque necessitam de longas seções retas para resfriamento. O sistema requer longos tempos de refrigeração, a fim de evitar os gradientes de temperatura que podem criar vácuos e marcas no perfil que se contraem para dentro. Conseqüentemente, a capacidade deste sistema pode ser mais baixa do que o outro sistema moldado (EHRIG, 1992; EPA, 1993; BISIO, 1994).

2.6.5 Processo Reverzer

O processo Reverzer foi desenvolvido pela Companhia Mitsubishi sendo um dos primeiros métodos desenvolvidos capaz de produzir produtos plásticos misturados. O processo consiste basicamente na preparação do material, na extrusão, e na moldagem dos materiais. Os resíduos plásticos misturados são alimentados em um misturador e em uma extrusora onde ocorre a rápida fusão e a homogeneização. A seguir, uma rosca vertical descarrega o material em um molde, que é então refrigerado em uma banheira de água ou em um túnel com pulverização de água. O processo Reverzer pode manufaturar produtos por três sistemas:

moldagem por intrusão, extrusão, e moldagem por compressão. Com equipamento auxiliar, o processo de Reverzer é capaz de produzir uma variedade das formas e tamanhos (EHRIG, 1992; EPA, 1993; BISIO, 1994).

2.6.6 Processo Recycloplast

O processo de Moldagem por Compressão, sistema da Recycloplast, provou ser a tecnologia mais bem sucedida baseada no processo de moldagem por compressão. O processo funde plásticos misturados com outros materiais por fricção. Uma extrusora pressiona o material, gerando uma massa cilíndrica pré-definida que enche uma seqüência de moldes por compressão. Os produtos são refrigerados, ejetados e transportados ao armazenamento. O processo tem vazão elevada e é capaz de produzir uma variedade de produtos de paredes grossas tais como paletes, grades, bancos, e caixas. Entretanto, o tamanho da planta é grande e o investimento inicial é elevado (EHRIG, 1992; VAN NESS, 1992; MUSTAFA, 1993; BISIO, 1994).

2.6.7 Outros métodos ou tecnologias de processamento

As embalagens cartonadas longa vida (Tetra Brik) podem ser recicladas, em um processo que utiliza um “hidrapulper” para separar o papel do alumínio e polietileno de baixa densidade (PEBD). As fibras de papel se hidratam, separando-se do alumínio e do PEBD, sendo retiradas por bombeamento do processo. O alumínio mais PEBD são então prensados e secos ao ar, onde podem passar por um entre três processos: incineração para recuperação de energia, recuperação do alumínio em fornos de pirólise e o processamento do alumínio junto com o PEBD, em indústrias recicladoras de plásticos, onde o PEBD é processado por injeção ou extrusão com o alumínio incorporado no produto final. (MARQUES, 1998)

Em outro processo, a partir de lixo doméstico e resíduos industriais de papel e plástico, pode ser produzido um tipo de madeira, em um trabalho desenvolvido pela Reciplac, EBR (Empresa brasileira de Reciclagem) e LPF (Laboratório de Produtos Florestais, ligado ao Ibama). O processo utiliza papel, pó de serragem e embalagens de refrigerante (PET) e, através de aglomeração a quente, produz tábuas dessa mistura. O produto resultante pode ser serrado, torneado e pintado, tendo como vantagens o baixo custo, resistência, impermeabilidade e versatilidade, podendo ser utilizado para a produção de formas de concreto, tapumes, forrações e móveis. As tábuas também podem ser fabricadas com plásticos e embalagens cartonadas, que oferecem proteção acústica e térmica, além de resistência, pois não descamam. Estas tábuas podem ser produzidas apenas de plástico reciclado, porém os diferentes tipos de plásticos não podem ser misturados, necessitando das etapas de seleção, moagem e extrusão do resíduo.

Uma pesquisa similar à apresentada neste trabalho, conforme Mano (1994), realizada no Instituto de Macromoléculas (IMA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, propõe a reciclagem de plásticos onde os resíduos plásticos passam pelas etapas de moagem, lavagem, secagem, separação em diversas frações conforme sua densidade, e processamento destas frações separadamente, formando grânulos. Como produtos finais deste processo, o IMA desenvolve o Imawood, um tipo de madeira plástica, o Imarble, o Imacar e o Imabiopack.

Outro trabalho utiliza compatibilizantes para melhorar as propriedades mecânicas das misturas. As incompatibilidades polímero – polímero inibem as misturas de diversos termoplásticos, limitando o desenvolvimento de ligas e blendas, sendo um obstáculo para a reciclagem de resíduos termoplásticos misturados. Estes limites de compatibilidade dificultam a correta aderência entre as superfícies internas dos compostos de polímeros reforçados, entre a matriz e as fibras de diversos tipos, sendo as fibras fortemente polares, como madeira, tecidos como a viscose, entre outros, limitadas em sua compatibilidade com a matriz polimérica apolar, como o polipropileno. Neste trabalho, foi utilizado polipropileno reciclado (PP) com poliácridonitrila (PAN) reforçados com resíduos de fibras têxteis e fibras de vidro, que melhoram os resultados de propriedades mecânicas e a sua compatibilidade com a utilização de tratamento por radiação (CZVIKOVŠKY, 1999).

Segundo CEMPRE (2003), após ser separado do lixo, o plástico filme é enfardado para a reciclagem. Na recicladora, o material passa pelo aglutinador, que aquece o plástico pela fricção de suas hélices. Em seguida, é aplicada água suficiente para provocar um resfriamento repentino que resulta na aglutinação: as moléculas dos polímeros se contraem, aumentando sua densidade, transformando o plástico em grãos. Assim, ele passa a ter peso e densidade suficientes para descer no funil da extrusora. Na última etapa, elas passam por um banho de resfriamento e são picotadas em grãos chamados *pellets*, que são ensacados e vendidos para fábricas de artefatos plásticos.

Um grupo de pesquisadores do Rensselaer Polytechnic Institute utilizou compatibilizantes e altas taxas de cisalhamento através do uso de uma extrusora dupla rosca *intermeshing* para avaliar as propriedades de polímeros misturados granulados oriundos de resíduos plásticos pós-consumo. Foram realizados testes comparando blendas com este material misturado e blendas de resinas virgens, na proporção de 70% PEAD, 15% PS, 11% PP, e 4% PEBD, representando aproximadamente a composição do resíduo plástico pós-consumo. O estudo mostra uma redução de 30% no módulo de tensão da blenda de resíduos, em relação à blenda de resinas virgens, sendo que ambas foram fortemente misturadas na extrusão, sugerindo que a blenda de resíduos sofreu maior degradação na etapa de processamento (EHRIG, 1992).

Em outro trabalho envolvendo o resíduo misturado NJCT após lavagem, refinando para as suas poliolefinas (>95% PE, <5% PP e <1% outros materiais) foi processado utilizando uma extrusora dupla rosca *no-intermeshing* (NITSE). Diferentes formulações foram realizadas, contendo NJCT refinado, PS preto pós-consumo e PET verde pós-consumo, e processadas passando pelas etapas de fusão, mistura, degasagem, filtragem e granulação do polímero na extrusora NITSE. Avaliando as propriedades mecânicas destas misturas, verifica-se que os melhores resultados foram obtidos com a fração NJCT refinada sem os outros componentes, sendo que a Resistência ao Impacto desta mistura (141,5 J/m) apresentou-se maior até que a do PEAD virgem (79,6 J/m) (EHRIG, 1992).

O uso de plásticos reciclados como camada intermediária na produção de embalagens de alimentos de filme de três camadas, sendo as camadas externas compostas de polímeros virgens, foi estudado avaliando-se a taxa de transferência de contaminação da camada reciclada até o alimento (PEROU, 1997).

2.7 Propriedades e estrutura de plásticos misturados

Devido às exigências e qualificações necessárias para as diversas aplicações dos materiais, as propriedades mecânicas destes são fundamentais fontes de informação para a seleção dos mesmos. Devido a isto, é importante destacar as relações entre os diversos tipos de misturas de polímeros processados pós-consumo.

As blendas poliméricas, isto é, misturas físicas de mais de um polímero ou copolímero (UTRACKI, 1989), podem ser caracterizadas em miscíveis ou imiscíveis. A maioria das blendas poliméricas é imiscível. Além disso, muitos polímeros apresentam mais de uma estrutura quando puros, como por exemplo, as regiões cristalinas e amorfas de algumas poliolefinas. Quando ocorre a mistura de dois ou mais tipos de plásticos, temos a formação de mais de uma fase, sendo normalmente uma fase contínua e uma fase dispersa. Esta característica geralmente provoca redução das propriedades mecânicas dos produtos oriundos de plásticos misturados, além de imperfeições superficiais (BRANDRUP, 1996; LEE, 1998).

Durante décadas, os termos compatibilidade e miscibilidade foram utilizados como sinônimos e confundidos por vários autores, sendo que alguns até os dias atuais. Atualmente, alguns autores reconhecem a importante diferença entre estes dois termos. Desta maneira, foram definidos como miscibilidade termodinâmica as blendas poliméricas que apresentam-se completamente miscíveis e homogêneas no nível molecular, sem nenhuma separação de fases. Em contrapartida, a compatibilidade se refere a blendas poliméricas que possuem propriedades úteis nas práticas comerciais. Este conceito possui maior importância para as blendas comercialmente utilizadas que são compatíveis mesmo que elas não possuam miscibilidade termodinâmica. De fato, estas poliblandas possuem morfologia multifásica, obtendo vantagens sinérgicas na mistura das propriedades que não se verificam nos polímeros sozinhos (VASILE, 2000).

Deste modo, em misturas de polímeros podemos ter um sistema miscível, com a mistura formando uma só fase, ou interagir apenas na interface, formando mais de uma fase e um sistema imiscível, com compatibilidade parcial, ou então os polímeros podem apenas coexistir, havendo incompatibilidade. A compatibilidade é condição necessária, mas não suficiente para que ocorra miscibilidade. Quando dois polímeros são compatíveis, podem tornar-se interdispersos, formando uma fase homogênea. Quando isto não ocorre, temos separação de fases e, nestes casos, a interface entre o componente de menor quantidade e a matriz é importante para o desempenho do produto final. Mesmo em polímeros compatíveis pode ocorrer imiscibilidade quando o polímero é altamente cristalino, ocorrendo imiscibilidade da fase cristalina na fase amorfa. No entanto, se pelo menos um dos polímeros for predominantemente cristalino, as regiões ordenadas se comportam como componentes imiscíveis. (MANO, 1991; CANEVAROLO, 2004). Os fatores que afetam a morfologia das blendas durante o processamento são: a temperatura, tempo de residência, composição da blenda, rotação das roscas, razão de viscosidade, razão de elasticidade e tensão interfacial (LEE, 1998; KAMAL, 1994).

Assim, por exemplo, os polietilenos em blendas com polipropileno são miscíveis na fase fundida, mas cristalizam separadamente quando resfriam, nucleando cada um a sua maneira

interferindo na cristalização um do outro, formando blendas quebradiças; já com poliestireno são imiscíveis, formando fibras em altas taxas de cisalhamento; blendas de PE com PET somente são possíveis com compatibilizantes. Blendas de polietilenos de diferentes densidades são geralmente miscíveis no estado fundido, mas necessitam de mistura cuidadosa devido às diferenças de viscosidade e as temperaturas de fusão e cristalização (VASILE, 2000).

Blendas de polietileno de alta densidade com polietileno de baixa densidade podem ser imiscíveis mesmo no estado fundido, formando estruturas cristalinas separadas com propriedades inferiores às originais, porém formando misturas de cristais com ponto de fusão intermediário e propriedades proporcionais. Em alguns casos ocorre sinergia com melhora de propriedades, como no caso da rigidez e tensão à queda do dardo em filme (VASILE, 2000).

Vários autores estudaram e caracterizaram blendas de resinas virgens e recicladas de poliolefinas como PP/PEAD e PP/PEBD, entre eles Bertin (2002), Jose (2004) e também blendas de PET/PEBD e PET/PEAD reciclados, entre eles Friedrich (2002), Dimitrova (2000) e Ávila (2003).

Utilizando a moldagem por intrusão, pesquisadores do Centro de Pesquisas em Reciclagem de Plásticos (CPRR) da Rutgers University processaram uma mistura de resíduos plásticos compostos basicamente por 80% de PEAD, 4% de PEBD, 4% de PP, 3% de PS, 4% de PVC, 4% de PET e 1% de outros materiais (metais ferrosos e não ferrosos, sujeira, material orgânico, papel, adesivos e etiquetas plásticas), sendo excluídas as embalagens de leite de PEAD e as garrafas de PET, por serem facilmente separáveis e recicláveis, sendo esta mistura denominada NJCT. Estes resíduos plásticos misturados foram transformados em peças de um tipo de madeira plástica. A peça sólida produzida apresentou perfil transversal onde se verificaram poros e furos de diversas dimensões na área central da seção, provavelmente devido a gases e vapores de água incorporados durante o processamento e a contrações internas devido à cristalização do polietileno presente na amostra. Devido a isto, os testes mecânicos realizados na amostra resultante apresentaram valores diferentes comparando-se o centro e as extremidades da amostra. Os resultados mostraram, em média, que amostras utilizando 100% deste material apresentam entre 784 e 794 MPa de módulo de compressão, 17,8 e 19,6 MPa de tensão no escoamento e entre 21 e 22,4 MPa de tensão na ruptura. Em misturas deste material com PS reciclado verificou-se uma melhora de propriedades, atingindo 1518 MPa de módulo de compressão, 36,71 MPa de tensão no escoamento e tensão na ruptura em misturas de 50% da mistura e 50% de PS reciclado (PSR).

Os mesmos autores, com a finalidade de estudar a constituição das fases entre estas misturas (material misturado (NJCT) e PS reciclado, a diferentes proporções), produziram amostras expostas ao nitrogênio líquido, fraturadas logo após e visualizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Em misturas entre 10 e 30% de PSR, este forma ilhas circulares cercadas pela fase matriz de polietileno (PE) da amostra misturada. Já com 35% de PSR, a morfologia parece uniforme, com os polímeros formando fases contínuas. Com 40% de PSR na mistura, os componentes não estão tão bem misturados como na relação 35/65%, e

em 40% de PSR, este último forma a fase matriz e os PE formam a fase dispersa (EHRIG apud DEANIN, 1992).

Scott (1994) processou plásticos misturados pós-consumo, oriundos de RSU em diversas composições, tendo avaliado as suas propriedades mecânicas. A composição dos resíduos sólidos misturados utilizados foi representativa do resíduo sólido urbano europeu, contendo as frações leves e pesadas (B). Uma amostra controle foi criada, misturando resinas virgens na mesma composição do resíduo sólido coletado (A). Outra amostra analisada foi formada pela proporção de 50% de resíduos sólidos e 50% de poliolefinas virgens (91% PEAD e 9% PP) (C). Após lavagem com água do resíduo sólido, a fração leve sobrenadante compõe a amostra D e a fração decantada compõe a amostra E, conforme a Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Tipos de amostras analisadas (SCOTT, 1994).

Amostra	Características
A	Controle, mistura de resinas virgens com mesma composição da amostra B;
B	Resíduo plástico misturado;
C	Amostra composta por 50% da amostra B e 50% de poliolefinas virgens
D	Fração Leve da amostra B, após a lavagem
E	Fração Pesada da amostra B, após a lavagem

As amostras foram processadas com e sem estabilizantes em diversos equipamentos, como extrusoras longas, curtas, de dupla-roscas e rosca simples, e em diversos moldes, como compressão, extrusão e intrusão, para avaliar a influência sobre as propriedades e morfologia do material e propriedades de flexão, compressão, impacto. A inspeção visual das amostras quanto a cor, textura da superfície e heterogeneidade, mostrou a presença de furos, fragmentos de polímeros não fundidos e partículas contaminantes. Durante testes mecânicos com fratura da superfície da amostra verificou-se delaminação e propagação da fratura.

Os melhores resultados foram apresentados pelo processo de moldagem por intrusão de dupla rosca curta, sendo apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10: Comparação das propriedades das amostras (SCOTT, 1994).

Amostra	Módulo de Flexão (MPa)	Força de Flexão (MPa)	Módulo de Compressão (MPa)	Força de Compressão (MPa)	Impacto Charpy (Fmax/a(N))
A	866	21	310	22	1.538
B	1.136	17	226	8	2.156
C	1.162	19	1.804	9	4.406
D	471	11	-	-	2.727
E	2.530	24	506	23	1.840
Madeira (Pinus)	9.400	47	-	-	-
Madeira dura	15.500	124	-	-	-

Segundo o autor, o módulo de flexão dos resíduos sólidos, amostra B, é significativamente superior ao resultado apresentado pelas resinas virgens, amostra A, e similar ao resultado da amostra enriquecida de poliolefinas, amostra C, porém, os melhores resultados foram os apresentados pela amostra E, composta pela fração pesada, sendo o módulo representativo das resinas PS e PVC, ambas constituintes desta fração.

Os valores de resistência à flexão de todas amostras estão abaixo dos apresentados pelas resinas virgens separadas, o que reflete a queda desta propriedade com a incompatibilidade das blendas de polímeros formadas. Com a finalidade de comparar os plásticos reciclados com um material convencional dois tipos de madeira (pinus e dura) foram testados, sendo verificado que o material convencional, apresenta propriedades de flexão muito superiores às apresentadas pelos materiais reciclados. A amostra C, enriquecida com poliolefinas, apresenta os melhores resultados para Impacto Charpy. A amostra E, composta pela fração pesada, apresentou valores baixos de Impacto Charpy, sendo que a amostra A, composta por resinas virgens, surpreendentemente apresentou os valores mais baixos desta propriedade.

Por último, vale a pena citar, na Tabela 2.11, algumas alternativas de uso para os plásticos misturados, mencionadas por Mustafa (1993). Este material pode ser utilizado em substituição da madeira com redução de custo em objetos como bancos e assentos, lajes de maior espessura, construção de piers, entre outros, com boas propriedades mecânicas (BRANDRUP, 1996; BRESLIN, 1998; JAYARAMAN, 2004) ou em blendas com fibras de jornais (BAROULAKI, 2006).

Tabela 2.11: Produtos produzidos a partir de resíduos plásticos misturados pós-consumo (MUSTAFA, 1993).

Agricultura	Marítima	Recreação
Cercas	Protetores de impacto no Píer	Bancos de parques
Cercado de animais	Docas de barcos	Baldes de areia
Estábulo de animais	Corredores	Equipamentos para playground
Suportes de frutas	Proteção contra marés	Mesas de piquenique
Barreiras contra erosão	Armadilhas para peixes	Caixas de armazenagem
Portões e Marcadores		Bancos de estádios
		Caixas de Flores e árvores
Jardinagem	Engenharia Civil	Industrial
Cercados, cercas e portões	Delineadores de estradas	Construção de estradas
Mobília de jardim	Cercas e barreiras	Paletes
Caixas de compostagem	Postes de placas de trânsito	Pipe racks
Muros de retenção	Separadores de concreto	Postes de sinalização
Retenções de bordas de jardins	Venezianas, telhas, cascalho	Barreiras de tráfego
	Degraus de escadas	Pisos de caminhões
		Placas de peitoris, postes
		Marcadores e cercas

2.8 Resíduos plásticos misturados em Porto Alegre

A Coleta Seletiva de Porto Alegre é realizada através da prévia separação dos materiais recicláveis nas residências. Este material é direcionado para as Unidades de Triagem, onde ocorre a separação, enfardamento e venda do material. Em Porto Alegre, existem treze Unidades de Triagem e uma Unidade de Triagem e Compostagem, conforme a Tabela 2.12.

O material que não é aproveitado para venda, é colocado em uma caixa de rejeitos para ser direcionado ao aterro sanitário. Neste rejeito, são encontrados materiais sujos, resíduos orgânicos e materiais plásticos misturados, entre outros. O presente trabalho utilizou como matéria-prima este material plástico misturado não comercializável.

Tabela 2.12: Unidades de Triagem de Porto Alegre, mais a Unidade de Triagem e Compostagem.(DMLU, 2006)

Nome	Associação responsável	Bairro
AREVIPA	Associação de Reciclagem Ecológica da Vila dos Papeleiros	Centro
Aterro da Zona Norte	Associação dos Recicladores de Resíduos da Zona Norte	São João
Campo da Tuca	Associação Comunitária do Campo da Tuca	São José
Cavanhada	Associação dos Recicladores do Loteamento Cavanhada	Cavanhada
Ilha Grande dos Marinheiros	Associação dos Catadores de Materiais de Porto Alegre	Arquipélago
Padre Cacique	Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis do Movimento dos Moradores de Rua	Praia de Belas
Profetas da Ecologia I		Navegantes
Aparecida das Águas		Floresta
Restinga	Associação dos Trabalhadores Urbanos pela Ação Ecológica	Restinga
Santíssima Trindade	Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis	São João
São Pedro	Associação dos Trabalhadores de Unidade de Triagem HPSP	Partenon
Wenceslau Fontoura	Associação de Reciclagem Rubem Berta	Rubem Berta
Vila Pinto	Centro de Educação Ambiental	Vila Pinto
UTC	Unidade de Triagem e Compostagem – Associação de Triagem de Resíduos Sólidos Domiciliares	Lomba do Pinheiro

O DMLU (2006), participa, desde 1989, do Grupo de Trabalho de Gestão Integrada e Sustentável dos Resíduos Sólidos em Cidades da América Latina e Caribe, do Programa de Gestão Urbana da ONU, e tem por diretrizes: proteção ao meio ambiente e apoio a segmentos sociais excluídos; e por objetivo: a redução, o reaproveitamento (suinocultura, compostagem...) e a reciclagem como caminhos para o desenvolvimento sustentável.

Uma pesquisa realizada para avaliar o comportamento ambiental do consumidor de Porto Alegre em 1999 constatou que 19,4% dos entrevistados consideram o lixo das cidades como o mais prejudicial dos problemas ambientais, 37,6% a poluição das águas e 22,8% a poluição do ar. (DINATO, 1999).

Capítulo 3

Materiais e Métodos

O capítulo descreve a metodologia utilizada neste trabalho, bem como os equipamentos e as técnicas de análise empregadas.

3.1 Escolha da Unidade de Triagem, coleta e caracterização da amostra

Nesta etapa, foi realizada a escolha da Unidade de Triagem, desenvolvido o procedimento de coleta das amostras e a sua caracterização.

3.1.1 Escolha da Unidade de Triagem para a coleta das amostras

Foram realizados estudos das Unidades de Triagem da Coleta Seletiva de Porto Alegre, avaliando, junto com funcionários do Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), as características e particularidades de cada Unidade, a fim de determinar a que mais se enquadraria nas necessidades do projeto.

Para a escolha da Unidade de Triagem, foram levadas em consideração: a condição do material depositado na caixa de rejeitos, a quantidade de material vendido, a qualidade de separação, a segurança do local, a localização da Unidade de Triagem e a disposição dos seus líderes comunitários em colaborar com este trabalho, entre outras. Após, foram realizadas visitas nas Unidades de Triagem da Vila Pinto, Cavalhada e Aterro da Zona Norte.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhida a Unidade de Triagem do Aterro da Zona Norte, mostrado na Figura 3.1. Esta unidade apresentava um baixo aproveitamento do material plástico misturado, devido ao fato deste material ser de difícil identificação, estar sujo ou com resíduos orgânicos.



Figura 3.1: Unidade de Triagem Aterro da Zona Norte.

Nesta Unidade de Triagem, a separação do material vindo da Coleta Seletiva é realizada por mulheres, que abrem os sacos plásticos de resíduos, segregando cada tipo de material em bombonas (Figura 3.2). Após, os materiais segregados são enfardados.



Figura 3.2: Triagem de materiais e separação por tipo nas bombonas

3.1.2 Procedimento da coleta

As amostras foram coletadas manualmente do interior do recipiente de rejeitos da Unidade de Triagem do Aterro da Zona Norte, da cidade de Porto Alegre (Figura 3.3).



Figura 3.3: Coleta da amostra no recipiente de rejeitos

Foram realizadas quatro coletas em diferentes períodos do ano, a fim de avaliar a sazonalidade da composição do lixo, totalizando 294,8 quilos. A Tabela 3.1 apresenta os volumes coletados e o período de cada coleta.

Tabela 3.1: Coletas realizadas na Unidade de Triagem Aterro da Zona Norte.

	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta	4ª coleta
Período	08/2000	12/2000	01/2002	02/2002
Quantidade (kg)	71,2	133,4	45,2	45,0

As amostras foram colocadas em sacos plásticos de lixo comuns (PEBD), de 100 litros, e enfardadas, usando uma prensa de maneira a reduzir o volume do material. A Figura 3.4 apresenta a etapa de prensagem do material.



Figura 3.4: Prensagem do fardo

Para a confecção do fardo, foi colocado papelão no fundo da prensa e logo após condicionados os sacos de amostras, sendo realizadas prensagens para compactar o material. No final, outro papelão foi colocado sobre os sacos e com a prensa abaixada, foi colocado arame para amarrar o fardo. Os fardos prontos, com as amostras deste trabalho, foram transportados até o Laboratório de Reciclagem do CEFET/RS, onde ocorreram as etapas seguintes da preparação da amostra.

A Figura 3.5 apresenta fardos prontos para serem comercializados, preparados pelos funcionários da Unidade de Triagem, que serão vendidos a recicladoras.



Figura 3.5: Fardos prontos para a comercialização.

3.1.3 Caracterização das amostras coletadas

Os plásticos misturados podem ser caracterizados por diversas técnicas, avaliando as diferenças entre os plásticos quanto a densidade, solubilidade e comportamento frente à chama, entre outros. O PET e PVC podem ser separados através de um equipamento que reconhece as moléculas de cloro, separando as peças de PET e PVC em duas partes. Outros métodos utilizados podem ser a diferença dos plásticos ao toque, aparência e transparência, dureza, método de processamento e necessidades da aplicação (MUSTAFA, 1993).

Basicamente, existem dois métodos de estimar quantidade e composição do Resíduo Sólido Urbano (RSU). No primeiro método, ocorre a amostragem, separação e pesagem dos componentes individuais do resíduo analisado. Este método é prático, classifica o resíduo de uma localidade, investiga a influência da sazonalidade, fatores geográficos e fatores socioeconômicos na composição e quantidade do RSU e pode ser usado para determinar o impacto do tipo e programa de coleta na geração de resíduos. Como desvantagem, os resultados desta análise são válidos para um certo tempo e local. O segundo método quantifica e classifica o RSU a partir da sua geração, sendo baseado em dados de produção por peso de materiais e produtos no resíduo sólido. São realizados ajustes levando em consideração as exportações e importações de resinas e o tempo de vida dos produtos, entre outros (MUSTAFA, 1993). No caso do presente trabalho, o método utilizado para a classificação da amostra a ser estudada foi o primeiro, sendo detalhado a seguir.

Os materiais provenientes de cada coleta foram analisados separadamente, com a finalidade de determinar os tipos e a quantidade de cada polímero presente. O fardo, constituído por

sacos prensados contendo o material coletado, foi desfeito e os sacos que o compõe foram abertos e separados, sendo retirada uma amostra de material de cada saco. Estas amostras foram reunidas, formando a amostra representativa do fardo a ser caracterizado.

A caracterização foi realizada com a parcela retirada de cada saco, sendo esta amostra separada manualmente por tipo de polímero e pesada. A pesagem das parcelas separadas foi realizada em uma balança com capacidade de pesagem de 10 kg, modelo AK 10, de Marte Balanças e Aparelhos de Precisão S.A.. A separação foi feita por tipo de resina: PP, PEAD, PEBD, PET, PVC, PET e outros, levando em consideração as características de cada resina quanto à densidade, aspecto visual, ruído característico, resposta frente ao teste de chama e nicho mercadológico. A Tabela 3.2 apresenta um resumo das principais características dos plásticos mais comuns, entre elas: código numérico utilizado como referência para reciclagem, características do plástico e resposta frente ao teste de chama.

Tabela 3.2: Principais propriedades de queima dos plásticos. (CEFET, 2000; GRISON, 1985)

Plástico	Características	Combustão	Aspecto da Chama	Comportamento do material
PET <1>	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 <2>	Inquebrável, resistente a baixas temperaturas, leve, impermeável	Queima-se lentamente e mantém a chama	Azul na parte inferior e amarela na superior, com fumaça branca	Amolece e goteja
PVC <3>	Rígido, transparente, impermeável, resistente à temperatura e inquebrável	Difícil de queimar, extinguindo-se a chama rápido	Amarela com toques verdes na base, libera fumaça branca	Amolece e carboniza
PEBD/ PEBDL <4>	Flexível, leve, transparente e impermeável	Queima-se lentamente e mantém a chama	Azul na parte inferior e amarela na superior, com fumaça branca	Amolece e goteja
PP <5>	Inquebrável, transparente, brilhante, rígido	Queima-se lentamente e mantém a chama	Azul na parte inferior e amarela na superior, com fumaça branca	Amolece e goteja
PS <6>	Impermeável, inquebrável, rígido, transparente, leve e brilhante	Queima-se rapidamente e mantém a chama	Amarela, alaranjada, quase vermelha, com fumaça fuliginosa	Amolece e goteja, forma bolhas quando queima
Outros <7>	ABS, SAN, EVA, PA	Depende do material	Depende do material	Depende do material

Teste de chama

A inflamabilidade expressa a facilidade com que o material queima em contato com a chama e a sua capacidade de manter a queima quando é afastado da fonte geradora da chama. Com relação ao aspecto da chama, são avaliados: a sua cor e a tendência a liberar fumaça e fuligem. Durante a observação do comportamento do material, é verificado se este funde, carboniza, estala ou goteja durante o contato com a chama. O odor gerado da queima é também importante para a caracterização do material. Alguns plásticos cheiram a vela e outros têm odor de algum de seus constituintes como o ácido clorídrico em PVC e estireno em PS.

Expostos à chama, a maioria dos plásticos queima, exceto o PVC rígido, que possui fortes propriedades de auto-extinção da chama. Policarbonatos também são auto extingüíveis de chama, mas a chama é brilhante e bastante fuliginosa. A chama fuliginosa é característica também do ABS, PS, PET e PVC plastificado (MUSTAFA, 1993).

Para a caracterização do material polimérico pelo teste de chama, foram utilizados: um bico de Bunsen, isqueiro, pinça e amostras de materiais poliméricos. A amostra foi colocada sobre a chama e logo retirada.

No teste de chama foi avaliado o comportamento do material durante e após a queima, sendo analisados: a inflamabilidade, aspecto da chama, comportamento do material e odores gerados quando o material foi queimado. Foi observado o processo de queima do plástico no interior da chama e fora dela; a formação de gotas de plástico fundido, odor, cores da chama fora da fonte, fumaça e fuligem.

As poliolefinas, como PP, e PE não são diferenciadas pelo teste de chama, pois apresentam características similares, como o odor, cor, fuligem, etc... A confirmação do tipo de resina deve ser realizada através de outros métodos como densidade ou temperatura de fusão.

Densidade

A separação por diferença de densidade entre os plásticos é um método de separação adotado em larga escala. Em um conjunto de recipientes com diferentes soluções de densidade conhecida em escala crescente de densidade, plásticos poderão ser submersos, enquadrando-se assim em uma faixa de densidade. Através da comparação com as densidades dos diversos polímeros, poderão ser facilmente caracterizadas.

As soluções podem ser formadas por água pura, água e sal, água e álcool entre as mais comumente utilizadas para a caracterização. As densidades dos polímeros mais comuns estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Densidade dos plásticos mais comuns (FERRARA, 1999)

Tipo de Plástico		Densidade
PEBD	Poliétileno de Baixa Densidade	0,91 – 0,93
PEAD	Poliétileno de Alta Densidade	0,95 – 0,96
PP	Polipropileno	0,90 – 0,91
PS	Poliestireno	1,04 – 1,07
ABS	Terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno	1,05 – 1,07
PU	Poliuretano	1,11 – 1,25
PC	Policarbonato	1,2
PVC	Poli(cloreto de vinila)	1,30 – 1,35
PET	Poli(tereftalato de etileno)	1,37

Durante a caracterização da amostra, os plásticos foram classificados através da imersão em líquidos de densidades diferentes. Foram preparados dois recipientes, sendo o primeiro com água pura (densidade de 1,0) e o segundo recipiente com uma mistura de água e sal, com densidade de 1,1.

A amostra de plástico foi colocada no primeiro recipiente e levemente agitada. Se a amostra emerge para a superfície, o plástico pertence ao grupo das poliolefinas como PP, PEAD e PEBD. Se a amostra de plástico submerge no primeiro recipiente, é então colocada no segundo recipiente. Se após a agitação a amostra submerge, trata-se de polímeros com densidade maior do que 1,1 tais como PVC e PET e se a amostra emerge para a superfície, trata-se de PS. Como exceção, temos o PS expandido, como o Isopor, que apesar de ter como constituinte o PS, apresenta uma densidade aparente menor que 1,0.

Brilho e ruído característico

O brilho intenso de alguns recipientes e o ruído característico gerado quando estes sofrem deformação também podem ajudar na identificação do tipo de polímero. Alguns polímeros, como o polipropileno, possuem mais brilho que outros polímeros, como os polietilenos.

O poliestireno, quando amassado, apresenta um ruído metálico. Da mesma maneira, o ruído provocado pelo amassamento de filmes de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD) é mais intenso que outros plásticos, como o PEBD e PEBDL.

3.2 Estratégias de processamento utilizadas

A amostra, após a etapa de moagem, foi dividida em duas parcelas. Uma delas seguiu uma rota denominada Rota 1, (Figura 3.6) onde são realizadas as etapas de lavagem, secagem, aglutinação e processamento por injeção e/ou extrusão. Na lavagem, a amostra separa-se naturalmente por densidade em duas frações, sendo uma menos densa que a água, denominada Fração Leve, composta principalmente por Polipropileno (PP), Polietilenos de Alta e Baixa Densidade (PEAD, PEBD) e Poliestireno (PS) Expandido, e outra fração, mais

densa que a água, denominada Fração Pesada, que decanta, composta principalmente por Poli(tereftalato de etileno) (PET), Poli(cloreto de vinila) (PVC) e Poliestireno (PS) Rígido.

Somente a Fração Leve foi utilizada na Rota 1, sendo após seca e aglutinada, preparando-a para o processamento por extrusão e injeção. A Fração Pesada foi descartada devido a incompatibilidade de processamento entre PVC e PET.

Na rota denominada Rota 2, o Material Sujo, composto pela totalidade de resinas, além de contaminações, foi aglutinado diretamente e processado por injeção. Devido a fatores como a grande diferença entre as janelas de processamento dos diversos materiais poliméricos desta fração (ver, por exemplo, os dados de temperatura de fusão apresentados na Tabela 3.4), a sua contaminação e a possível dificuldade de estabilização da linha pós-extrusão, o processamento por extrusão não foi realizado.

As etapas podem ser vistas na Figura 3.6.

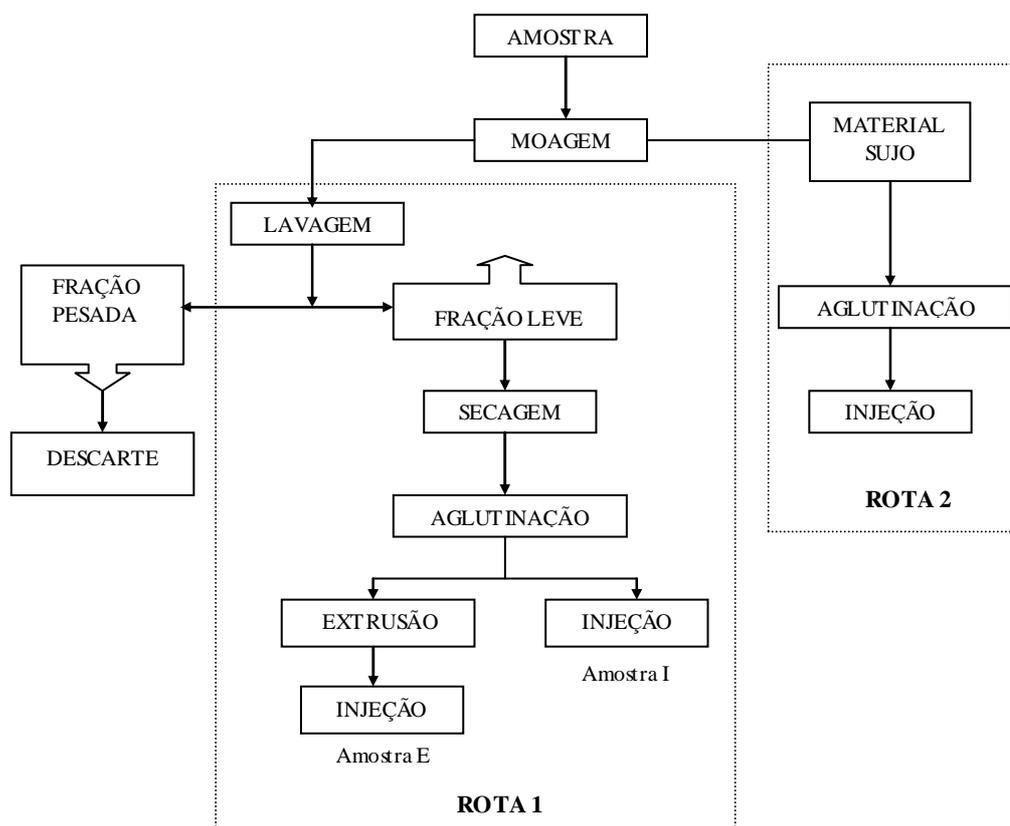


Figura 3.6: Etapas do trabalho

Foi realizado pelo SEBRAE (1999) um estudo de balanço econômico de uma fábrica de médio porte de plásticos reciclados, considerando uma produção de 60.000 quilos por mês, considerando as etapas de: classificação, pré-lavagem, lavagem, secagem, aglutinação, extrusão, armazenamento, estocagem e expedição, utilizando como matéria prima, materiais plásticos provenientes da coleta seletiva, e cujo produto final é o plástico reciclado granulado. Conforme o estudo, o investimento fixo foi de R\$ = 147.350,00, com um lucro líquido mensal de R\$ = 4.790,00 sendo dois anos o tempo necessário para a recuperação do capital investido (SEBRAE, 1999). No caso do projeto deste trabalho, balanço parecido pode ser utilizado para a Rota 1 e, para a Rota 2, como não apresenta as etapas de lavagem e secagem, o valor do investimento fixo é menor.

A Tabela 3.4 apresenta as temperaturas de fusão dos plásticos mais comumente encontrados no lixo.

Tabela 3.4: Temperatura de Fusão para plásticos. (PEACOCK, 2000)

Plástico	Temperatura de Amolecimento (°C)
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	98 - 115
Polietileno de alta densidade (PEAD)	125 - 132
Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL)	100 - 125
Polipropileno (PP)	160 - 175
Poliestireno (PS)	74 - 110
Poliuretano (PU)	75 - 137
Poli(etileno-co-acetato de vinila) (EVA)	103 - 110
Poli(cloreto de vinila) (PVC)	75 - 105
Poli(tereftalato de etileno) (PET)	212 - 265

3.3 Preparação da amostra

As etapas necessárias para preparar a amostra para o processamento são: moagem, lavagem (somente para a Rota 1), secagem e aglutinação. Após estas etapas, a amostra está pronta para ser alimentada no funil da extrusora ou injetora.

3.3.1 Moagem

A moagem do material foi realizada em um moinho de facas (6 navalhas no rotor e 4 navalhas fixas) com potência de 10 HP. Depois de moído, o material passa por uma peneira com abertura de 8 mm (diâmetro do furo). A Figura 3.7 apresenta o moinho de facas utilizado na etapa da moagem da amostra.



Figura 3.7: Moinho de facas

O material plástico misturado, constituído por embalagens rígidas, materiais flexíveis, filmes, entre outros, foi moído sem separação. Antes da moagem, o material plástico foi inspecionado, a fim de remover metais e outros materiais rígidos que pudessem causar danos às navalhas do moinho.

O material moído foi homogeneizado com a finalidade de obter características semelhantes durante o processamento. Os sacos foram abertos e despejados sobre uma lona plástica de tamanho 2m por 4m. Os plásticos foram então misturados e homogeneizados com auxílio de pás e novamente ensacados.

3.3.2 Lavagem

O material, proveniente do resíduo das Usinas de Triagem, apresenta-se muito sujo, sendo necessária a lavagem do material com água, a fim de retirar os resíduos orgânicos e outros contaminantes como areia, metal e papel.

Para a lavagem da amostra, foi utilizado um tanque de fibrocimento (caixa d'água) com capacidade de 500 litros. No interior do tanque, a uma altura de 10 cm do fundo, foi colocada uma peneira tipo cesta de 30 cm de altura e diâmetro levemente inferior ao do tanque, feita de tela de aço inoxidável com abertura de 2 mm. A cesta retém a fase decantada, passando por ela contaminações como areia, terra e papel, que se depositam no fundo do tanque. Foi colocada água no sistema tanque + cesta, de modo que a maior parte da cesta ficasse submersa e o nível da água não ultrapassasse a borda superior da cesta. A Figura 3.8 apresenta a etapa da lavagem do material.



Figura 3.8: Tanque com a cesta para lavagem da amostra

O material foi colocado no interior da cesta e agitado manualmente por cerca de 15 minutos, tempo considerado suficiente para a limpeza da amostra. Após, o sistema foi deixado em repouso por cerca de 30 minutos a fim de separar as fases. As fases sobrenadante e decantada foram retiradas do tanque, a fim de escoar o excesso de água de lavagem¹.

A etapa da lavagem foi realizada apenas na parcela de amostra referente à Rota 1, sendo a parcela da amostra referente à Rota 2 processada sem ser submetida a lavagem.

3.3.3 Secagem

Foram testados diferentes procedimentos de secagem do material moído. Inicialmente, o material molhado foi colocado sobre uma lona plástica e deixado ao ar livre. O material manteve-se úmido.

Foi então confeccionada uma estrutura de canos de PVC de tamanho 2m por 4m, a uma altura do solo de 30 cm. Sob a estrutura, foi colocada uma tela de plástico de abertura 2 mm, a fim de escorrer a água e propiciar uma secagem ao ar. O material molhado foi disposto em cima da estrutura e deixado por duas semanas. Quando o clima tornava-se instável, com possibilidade de chuvas, a estrutura era coberta com uma lona plástica. Nesta tentativa, perdeu-se material disperso pelo vento, além da estrutura ser muito frágil. A estrutura foi refeita com aço inoxidável, a uma altura de 50 cm do solo, sendo colocada uma barra central mais alta conformando-se como a viga de um telhado. Desta forma, a lona plástica

¹A água da lavagem foi amostrada e analisada nos parâmetros: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), Demanda Química de Oxigênio (DQO), coliformes fecais, condutividade a 25°C, fósforo total, nitrogênio total, surfactantes, pH a 20°C, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis, óleos e graxas. Os resultados foram comparados com a legislação em vigor (ESPÍNDOLA, L.C, 2002).

apresentava-se inclinada, favorecendo o escoamento da água da chuva e a circulação de ar entre a lona e o material úmido. A Figura 3.9 apresenta a estrutura de aço inoxidável.



Figura 3.9: Secagem do material em estrutura de aço inoxidável.

Como alternativa, a secagem do material molhado foi testada em leito fluidizado de ar, sendo utilizada uma torre de leito fluidizado do Departamento de Engenharia Química da UFRGS. O leito de acrílico, para possibilitar a visualização do processo, possui diâmetro de 9,6 cm e altura 150 cm, com duas telas de metal com abertura de 1 mm nas extremidades, a fim de reter as partículas. A fluidização do leito com ar foi realizada com auxílio de um ventilador de vazão máxima 1.800 l/min. A amostra molhada foi colocada no interior do leito e ar foi inserido pela extremidade inferior deste, onde foram realizados testes a diferentes vazões de ar.

Outra tentativa foi a utilização de um equipamento com ar forçado. O equipamento consiste em um tambor plástico cilíndrico de 0,6 m de diâmetro por 1 m de altura, com uma tela na extremidade superior. Uma mangueira lateral injeta ar no interior do tambor através de um ventilador. Este ar é adicionado lateralmente, propiciando um movimento circular do material. O material foi colocado dentro do tanque cilíndrico, e o ventilador foi acionado, provocando movimentos circulares do material no interior do tanque cilíndrico.

3.3.4 Aglutinação

O processo de aglutinação consiste na compactação e aglomeração de partículas previamente moídas através do aquecimento e pseudo-plastificação do material. O aglutinador utilizado é composto por um tambor cilíndrico, com motor de 30 HP, uma hélice na base que gira movimentando o material, cisalhando-o e fazendo com que as partículas se aglomerem.

O material é colocado dentro do aglutinador junto com um pouco de água. Através do movimento da hélice, o material aquece, fundindo a superfície da partícula. Este processo reduz consideravelmente o volume da amostra, facilitando a alimentação do material no funil dos equipamentos de processamento utilizados nas etapas seguintes.

3.4 Testes preliminares de processamento

Os testes preliminares de processabilidade foram realizados no Laboratório de Reciclagem e no Laboratório de Injeção do Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RS.

3.4.1 Processamento por extrusão

O processamento da amostra por extrusão foi realizado em uma extrusora com as seguintes características:

- Extrusora tipo monorosca universal de diâmetro 60 mm, relação L/D de 22.
- Conjunto de plastificação (canhão) com três zonas de aquecimento, controle/regulagem por zonas através de termopares, com resfriamento por convecção natural.
- Matriz espaguetadeira, com seis furos de diâmetro 2,2 mm; sistema de aquecimento/controle com uma zona de aquecimento, através de termopar.
- Linha de resfriamento, calha d'água de três metros de comprimento para o resfriamento do filamento.
- Puxador/granulador tipo navalha, com quatro navalhas no rotor e uma navalha fixa; controle de velocidade por motor de 3 HP com inversor de frequência, que corta o filamento formando os *pellets*.

Por extrusão, foi processada somente a Fração Leve (sobrenadante da lavagem da Rota 1), devido à incompatibilidade de processamento entre PVC e PET, plásticos estes presentes nas Fração Pesada (Rota 1) e no Material Sujo (Rota 2).

A extrusora utilizada, de escala laboratorial, apresenta quatro zonas de aquecimento e limitação quanto ao controle de temperatura das zonas da extrusora, devido à falta de resfriamento destas, reduzindo a temperatura apenas pelo desligamento da resistência, o que leva a um tempo elevado de resposta e maior dificuldade de estabilização. Foram realizados testes, denominados A1 até A4, com diferentes temperaturas de processamento, visando a estabilização do espagete. A temperatura da Zona 1 variou de 100°C a 165°C, a Zona 2 variou de 160°C a 215°C, a Zona 3 variou de 170°C a 235°C e a Matriz de 165°C a 205°C.

3.4.2 Processamento por injeção

No processamento por injeção, realizado no CEFET/RS, foram realizados testes com diferentes perfis de temperatura e pressão, avaliando as melhores condições de processamento.

Para o processamento por injeção, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Injetora Romi Primax com 150 toneladas de força de fechamento, com 4 zonas de aquecimento e capacidade de plastificação de 58 kg/h
- Molde com duas cavidades de espessura fina.

Amostras oriundas da Fração Leve e Material Sujo, da Rota 1 e Rota 2, respectivamente foram processadas por injeção, sendo os testes denominados B1 até B5. As variáveis de processo foram definidas como: Pressão de injeção = 45 bar; Pressão de recalque = 16 bar; Contrapressão = 01 bar. As temperaturas utilizadas foram: Zona 1 de 190°C a 230°C, Zona 2 de 190°C a 230°C, Zona 3 de 190°C a 220°C, Zona 4 de 190°C a 210°C e Matriz de 190°C a 205°C.

Como limitação na injeção, destaca-se a utilização de um molde contendo duas peças de espessura fina, sendo avaliada apenas a qualidade da injeção e da peça injetada, não sendo possível a determinação das propriedades mecânicas.

3.5 Preparação dos corpos-de-prova para determinação das propriedades mecânicas

A preparação dos corpos-de-prova, para determinação das propriedades mecânicas do material aglutinado oriundo da Fração Leve, foi realizada no Laboratório de Desenvolvimento de Produto da Ipiranga Petroquímica S.A. (IPQ).

Para a confecção dos corpos-de-prova, necessários à determinação das propriedades mecânicas, as amostras oriundas da Rota 1 (ver Figura 3.6) foram processadas por extrusão e injeção, sendo utilizados os seguintes equipamentos:

Injetora:

- NEGRI BOSSI - NB 100;
- Rosca de diâmetro 40 mm;
- Cabeçote e cilindro com três zonas de aquecimento;
- Máxima pressão de injeção de 140 bar e máxima capacidade de injeção de 255 gramas;
- Molde de corpos-de-prova conforme norma ASTM D 256 (1997).

Extrusora:

- Reifenhauer – AR, EH 160.1.45/20D, com motor de 20 HP;
- Cabeçote e cilindro com quatro zonas de aquecimento por resistências e refrigeração a ar;
- Matriz com cinco orifícios em linha de diâmetro 3 mm;
- Rosca de diâmetro 45 mm e largura 900 mm;
- Funil de alimentação de 45 litros, sem misturador;
- Banho de refrigeração do filamento e picotador.

A extrusora utilizada nesta etapa do trabalho difere da utilizada anteriormente pela maior precisão da instrumentação, e pela capacidade de resfriamento das zonas, mantendo a temperatura estável. Já as injetoras utilizadas nas duas etapas possuem semelhantes tecnologias.

Os parâmetros monitorados na extrusora e injetora, visando a estabilização do processamento são demonstrados respectivamente na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6.

Tabela 3.5: Parâmetros da extrusora

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura da matriz	210	°C
Rotação da rosca	20 a 30	rpm

Tabela 3.6: Parâmetros da injetora

Parâmetro	Valor	Unidade
Pressão de injeção	35	bar
Pressão de recalque	30	bar
Temperatura de resfriamento do molde	35 a 45	°C
Dosagem	40 a 45	mm
Tempo de injeção	4 a 5	s
Tempo de resfriamento	30 a 40	s
Tempo do ciclo total	50 a 70	s

A fim de determinar o perfil de temperaturas mais adequado, foram realizados testes nos equipamentos da Ipiranga Petroquímica, visando à possibilidade de processamento da amostra polimérica com a minimização da degradação. Foram testadas diferentes temperaturas, que dependendo da zona variavam de 140°C a 215°C.

Visando determinar a influência da etapa de extrusão nas propriedades mecânicas do material, as amostras foram divididas em dois grupos denominados: (I), processada apenas por injeção; e (E-I), processada por extrusão seguida de injeção.

Na amostra (I), o material previamente aglutinado foi processado por injeção, utilizando o molde de corpos-de-prova, sendo direcionados para os testes de propriedades mecânicas.

Na amostra (E-I), acrescentou-se a etapa de extrusão antes da injeção. A extrusão favorece a homogeneização do material, formando os *pellets* que facilitam a alimentação durante a etapa de injeção.

3.6 Propriedades mecânicas

Foram realizados testes de resistência ao impacto Izod, resistência à tração, resistência à flexão e VICAT.

3.6.1 Resistência ao impacto Izod

As análises de resistência ao impacto Izod foram realizadas em corpos-de-prova com um entalhe central de dimensões e geometria definidas, conforme norma ASTM D 256 (1997). O equipamento utilizado é mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Equipamento para resistência ao impacto Izod (IPQ, 2003)

As amostras foram climatizadas a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade $50 \pm 5\%$ por 40 horas. O corpo-de-prova foi fixado em uma das suas extremidades, onde um pêndulo de massa conhecida chocou-se contra a amostra (IPQ, 2003).

As Figuras abaixo mostram o teste Izod, sendo a Figura 3.11 o momento do impacto entre o martelo e o corpo-de-prova, e a Figura 3.12 o corpo-de-prova após o impacto.



Figura 3.11: Pêndulo caindo sobre o corpo-de-prova

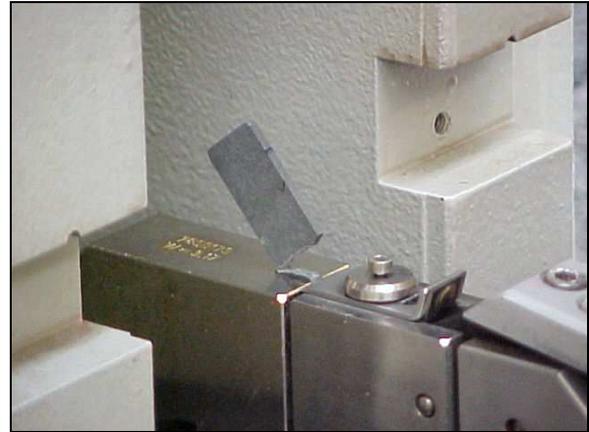


Figura 3.12: Corpo-de-prova após o impacto do martelo

A Figura 3.13 apresenta a esquerda o corpo-de-prova já entalhado e a direita o corpo-de-prova após o teste.



Figura 3.13: Corpos-de-prova para Izod antes e após o teste.

Foram realizados testes utilizando os pêndulos de 1J e 2,75J, comparando-se os valores de impacto alcançados por cada teste, em J/m. Para cada teste, foram utilizados dez corpos-de-prova, sendo considerada a média destas dez medidas.

3.6.2 Resistência à tração e resistência à flexão

Os testes de resistência à tração foram realizados com base na norma ASTM D 638-97, equivalente à norma ISO 527-1/93, e na norma ASTM D 882-97. Os testes de resistência à flexão foram realizados conforme norma ASTM D 790/97. Os corpos-de-prova injetados

foram analisados na máquina universal de ensaios utilizada para medir a resistência à flexão e a resistência à tração, vista na Figura 3.14.

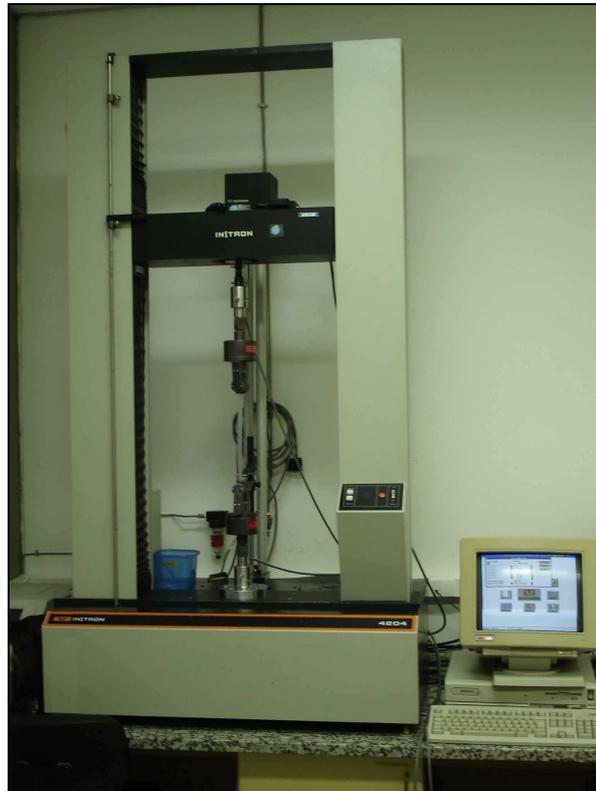


Figura 3.14: Máquina universal de ensaios

3.6.3 VICAT

Os testes de VICAT foram realizados com base na norma ASTM D 1525-97, sob uma carga de 10 N. A Figura 3.15 apresenta o equipamento utilizado para os testes.



Figura 3.15: Equipamento utilizado no teste Vicat.

Para cada amostra, foram realizadas três corridas, empregando seis corpos-de-prova em cada corrida. Os corpos-de-prova foram colocados em um banho de silicone com temperatura inicial de 30°C, sendo esta temperatura aumentada até 170°C, com taxa de aquecimento de 50°C/h. As amostras, sob aquecimento, sofrem uma deformação que é captada pelo instrumento.

3.7 Morfologia por Microscopia

A morfologia das amostras foi analisada por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) e por Microscopia Ótica. A análise por MEV foi realizada em um equipamento marca JEOL, modelo JSM 5800, no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, com o objetivo de avaliar a superfície da amostra, bem como as interações entre as fases e as incrustações presentes na amostra. Já as análises de Microscopia ótica foram realizadas no Laboratório de Endocrinologia Experimental do Departamento de Fisiologia da UFRGS, utilizando uma Lupa Estereoscópica com aumentos de 25 a 100 vezes. A análise por MEV foi realizada nas amostras injetadas (I) e amostras extrusadas e injetadas (E-I), com aumentos de 60, 250, 5.000, 25.000 e 40.000 vezes.

Para tanto, corpos-de-prova com entalhe foram submetidos à fratura frágil através de Impacto Izod a -40°C na Ipiranga Petroquímica. Os corpos-de-prova foram imersos em um banho de etanol e após foram rapidamente retirados do banho, colocados no suporte e o pêndulo utilizado no teste de impacto Izod foi acionado. À temperaturas baixas, a amostra quebra com o impacto do pêndulo, minimizando a deformação plástica da superfície. Deste modo, pôde-se visualizar a superfície da amostra com o mínimo de deformação das fases que a compõe.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes a cada uma das etapas deste trabalho.

4.1 Preparação da amostra

4.1.1 Caracterização

Cada coleta realizada na Usina de Triagem da Zona Norte foi caracterizada individualmente, com a finalidade de analisar as variações no conteúdo do material jogado no lixo. A composição das coletas, determinada pelos métodos descritos anteriormente no Capítulo 3, é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Caracterização da amostra por tipo em percentagem em peso.

Plástico	Quantidade em peso (%)			
	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta	4ª coleta
Polietileno de baixa densidade / PEBD	35	22	27	22
Poliestireno / PS	22	36	9	14
Polietileno de alta densidade / PEAD	7	15	21	22
Poli(tereftalato de etileno) / PET	15	12	14	17
Polipropileno / PP	15	14	15	10
Poli(cloreto de vinila) / PVC	5	1	9	9
Outros	1	0	5	6

Conforme pode ser visto na Tabela 4.1, ocorre uma grande variação em peso na composição do material coletado. As diferenças podem ser associadas às variações periódicas dos hábitos de consumo da população, uma vez que as amostras foram coletadas em diferentes períodos do ano. Um exemplo é o consumo de PS que aumenta significativamente na segunda coleta, realizada no final do ano, o qual pode ser explicado pelas compras de Natal e Ano Novo, já que o PS é utilizado para envolver materiais eletrônicos e eletrodomésticos em geral (WASSERMANN, 2001).

Estes resultados indicam que a capacidade de minimizar os efeitos das variações de composição da matéria-prima nas propriedades finais dos produtos é essencial para o desenvolvimento do processo de reciclagem de plásticos misturados.

As amostras foram agrupadas e homogeneizadas, formando uma amostra única representativa a ser utilizada nas etapas seguintes. A Figura 4.1 representa a composição da amostra final.

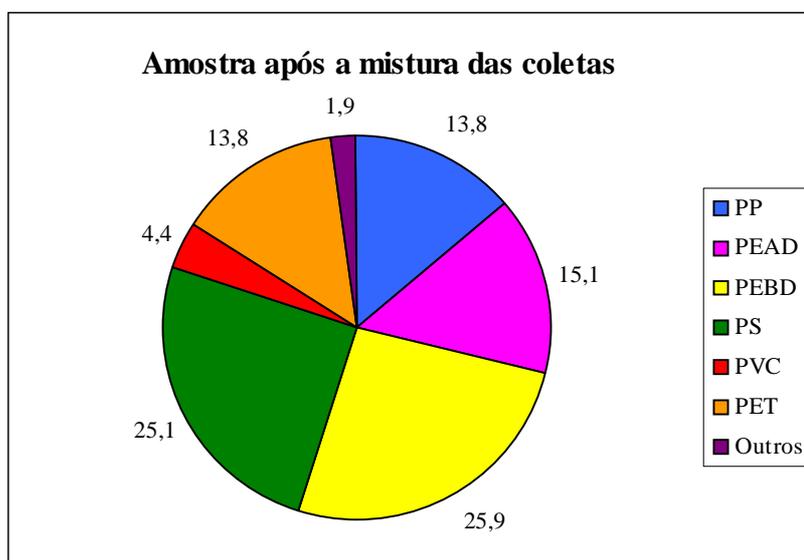


Figura 4.1: Percentagens em peso de cada polímero após a homogeneização

4.1.2 Moagem

Apesar da amostra conter material plástico misturado com uma grande variedade de formas e tipos de polímero (como embalagens plásticas rígidas - embalagens de *shampoo*, óleo - plástico filme, embalagens contendo mais de um tipo de polímero, Isopor - poliestireno expandido), a moagem do material apresentou resultados satisfatórios. Foi obtido material com granulometria de até 8 mm, correspondente ao diâmetro da peneira do moinho. Observa-se, entretanto, que materiais rígidos como o PVC e PET alcançaram granulometria abaixo do diâmetro da peneira. A moagem de filmes plásticos com comprimento maior que 50 cm apresentou dificuldades, devido ao enroscamento destes no rotor do moinho de facas, gerando um aumento de torque e colocando em risco o motor por superaquecimento, sendo necessário

acionar a parada do moinho. As embalagens grandes de poliestireno expandido apresentaram dificuldade de moagem devido às suas superfícies planas, que provocavam deslizamento junto às facas. A prévia segregação de materiais muito grandes e/ou compridos, como as embalagens de poliestireno expandido e os filmes longos, poderia minimizar os problemas apresentados na etapa de moagem da amostra. No entanto, esta segregação tornaria a etapa de moagem mais longa e mais cara.

4.1.3 Lavagem

Do total de material coletado e moído, uma parte foi segregada para a realização de testes sem lavagem com o material sujo (ver seção 3.2), e o resto foi lavado com água conforme descrito a seguir.

Durante a lavagem com água, ocorreu a separação dos diversos plásticos presentes na amostra devido à diferença entre a densidade destes e a densidade da água. Os plásticos como as poliolefinas emergiram (Fração Leve) e os plásticos como o PET, PVC e PS decantaram no fundo da cesta de tela metálica (Fração Pesada). Exceções a este comportamento apresentaram os PS expandido e espumado, cuja densidade da resina de origem é superior a da água e, no entanto, ficou emerso junto com as poliolefinas devido à baixa densidade aparente do produto. Desta forma, a percentagem em peso de material sobrenadante foi maior que a parcela de materiais PEAD, PEBD e PP determinada na caracterização inicial da amostra.

Tabela 4.2: Fração da amostra após lavagem, em percentagem.

Plástico	Fração Leve (%)	Fração Pesada (%)	Total (%)
Polipropileno / PP	25,2		13,8
Polietileno de alta densidade / PEAD	27,5		15,1
Polietileno de baixa densidade / PEBD	47,3		25,9
Poliestireno / PS		55,5	25,1
Poli(cloreto de vinila) / PVC		9,8	4,4
Poli(tereftalato de etileno) / PET		30,5	13,8
Outros		4,3	1,9

Foram desconsideradas as perdas de material da Fração Pesada com tamanho menor que a abertura da tela da cesta, acumuladas no fundo do tanque de lavagem. A fração denominada “Outros” foi agrupada na Fração Pesada, devido a maioria de sua composição (Plásticos de Engenharia, PC, etc) ser mais densa que a água.

Como mostra a Tabela 4.2, a Fração Leve apresentou composição de cerca de 25,2% de Polipropileno (PP), 27,5% de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), e 47,3% de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). A fração de PS expandido e espumado foi desconsiderada do cálculo, embora presente na Fração Leve, devido ao valor em peso da sua parcela no material

sobrenadante ser reduzido, apesar de visualmente apresentar um volume perceptível. Estas percentagens são mostradas na Figura 4.2.

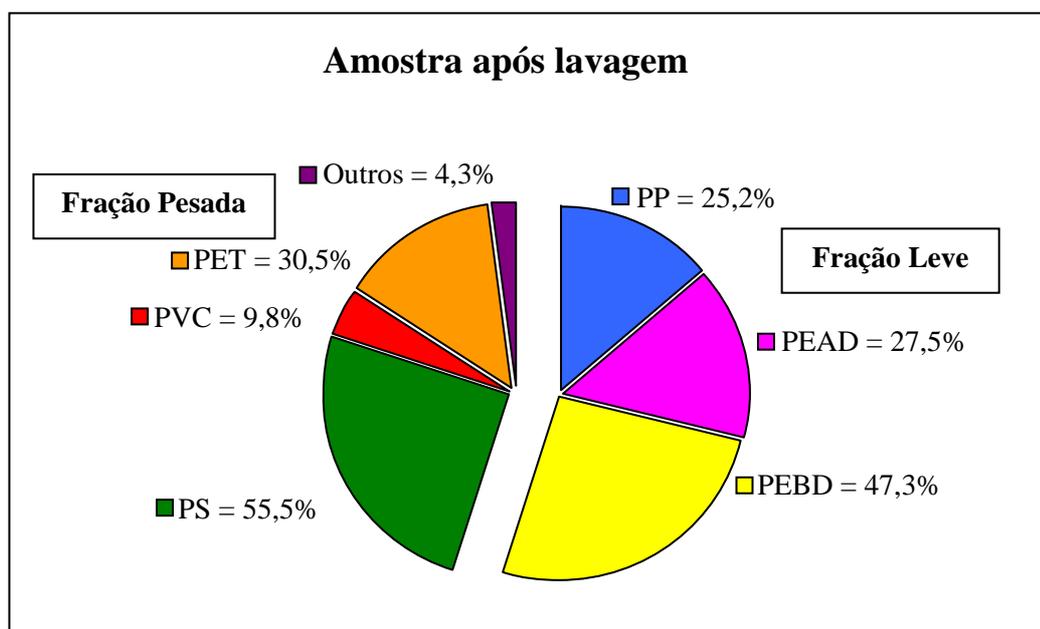


Figura 4.2: Após a lavagem, percentagens de cada polímero na Fração Leve e Fração Pesada

A análise da água de lavagem, comparando os resultados obtidos aos limites permitidos pelos órgãos ambientais, foi realizada por Espíndola (2002). Esta pesquisa apresentou resultados satisfatórios para lavagens de aproximadamente 23 kg de amostra para 500 litros de água. A água da lavagem, após a coleta das amostras para análise, foi descartada para a rede pública. No caso de instalação de uma unidade de reciclagem para o tratamento deste material, deverá ser realizado estudo para implementação de uma unidade de tratamento de efluentes.

4.1.4 Secagem e aglutinação

Para a secagem, foram avaliados procedimentos onde o material úmido pudesse secar ao ar livre ou com o mínimo consumo de energia. Desta forma, foram testadas opções de baixo custo, como uma estrutura metálica com tela, secagem através de um leito fluidizado de ar, bem como o uso de um recipiente com ar forçado. Devido ao alto consumo de eletricidade, o material não foi seco em estufas.

Os métodos de secagem para o material úmido não apresentaram os resultados esperados.

Na estrutura metálica com tela, o tempo necessário para a completa secagem do material foi muito elevado, acima de uma semana, e variou conforme o clima, muitas vezes mantendo o

material úmido. Outros inconvenientes foram: a grande área necessária para a colocação da estrutura metálica, a fragilidade da lona, as intempéries e chuvas.

A tentativa de secagem com um leito fluidizado de ar não obteve resultados satisfatórios, devido à compactação do material. Verificou-se a formação de um bloco único cujo comportamento assemelhou-se a um pistão subindo e descendo o leito, com o aumento e diminuição da vazão de ar, sem ocorrer o efeito da fluidização (comportamento empistonado).

No processo com ar forçado, o material aderiu às paredes do recipiente, permanecendo úmido.

Após estas tentativas para a secagem do material polimérico, decidiu-se pela utilização de um aglutinador para substituir a etapa de secagem.

O material, colocado úmido no aglutinador, aglomerou-se com o cisalhamento provocado pelas hélices do equipamento, compactando-se, secando e aumentando a sua densidade aparente. A redução do volume específico do material é uma característica importante para a etapa de alimentação da amostra durante o processamento, pois facilita o escoamento do material para o funil do equipamento de extrusão e injeção.

Com o método de aglutinação, em substituição a outros métodos de secagem testados, os resultados alcançados foram satisfatórios. O material apresentou um teor de umidade baixo após a aglutinação, mostrando que a aglutinação após a lavagem é uma opção bastante adequada de secagem.

4.2 Testes preliminares de processamento

Os testes preliminares de processamento, efetuados no Laboratório de Reciclagem e no Laboratório de Injeção do Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RS, tiveram como finalidade a avaliação da possibilidade de processamento do material coletado na caixa de rejeitos da Usina de Triagem da Zona Norte e preparado até esta etapa.

4.2.1 Processamento por extrusão

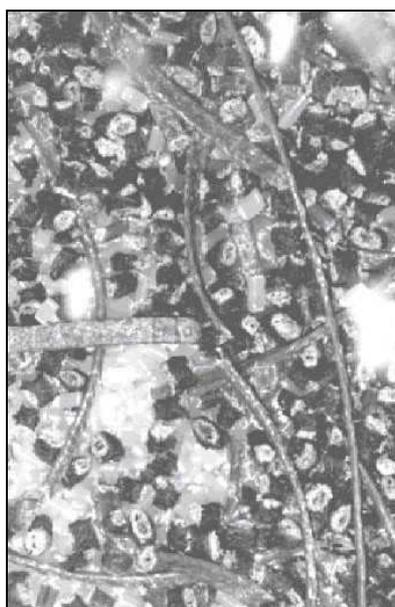
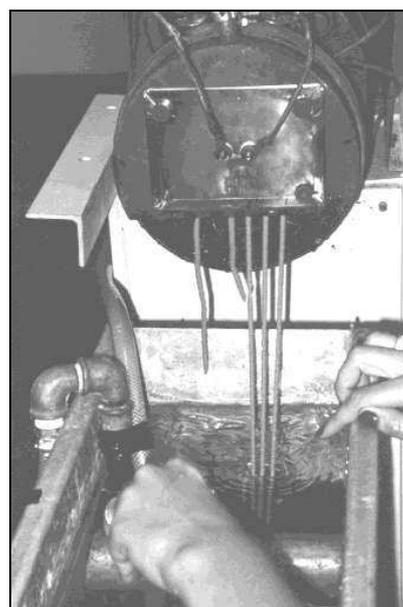
Na extrusão da Fração Leve, foram realizados testes a diferentes temperaturas de processamento, (Tabela 4.3), visando a estabilização do espaguete. A análise da estabilidade do espaguete baseou-se na inspeção visual deste, considerando fatores como: continuidade do filamento, ausência de bolhas e materiais não fundidos, imperfeições superficiais e pontos frágeis na massa fundida. Como consequência da instabilidade, temos a quebra do espaguete, além do entupimento dos canais da matriz.

Nesta etapa, não foram realizados testes com a Fração Pesada e o Material Sujo, devido à impossibilidade de processamento por extrusão deste material, pois contém PET e PVC, dois polímeros com janelas de temperatura de processamento muito diferentes. Os perfis de temperatura e a corrente elétrica utilizados na extrusão estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Perfis de temperatura e corrente da extrusora

Teste	Material	Temperatura (°C)				Corrente (Ampères)
		Zona1	Zona2	Zona3	Matriz	
A1	Fração Leve	162	213	235	205	17
A2	Fração Leve	100	161	170	165	22
A3	Fração Leve	110	175	200	183	17
A4	Fração Leve	120	180	190	185	17

Na análise visual do espaguete, em todas as situações foram verificadas irregularidades superficiais e em algumas vezes formas espiraladas de fluxo na saída da matriz, o que provavelmente seja devido à fratura de fundido, causada pelas resinas de viscosidade elevada. Na análise visual do *pellet* foi verificada alta porosidade (Figura 4.3), e baixa resistência mecânica. A produtividade esteve comprometida devido a esporádicos rompimentos do espaguete (Figura 4.4) provocados pelo entupimento dos canais na saída da matriz ou durante a fase de resfriamento e deformação elongacional pela presença de resinas não fundidas, contaminantes sólidos e diferenças reológicas na massa fundida (RAUWENDAAL, 1994).

**Figura 4.3:** Material após a granulação**Figura 4.4:** Instabilidade durante o processamento por extrusão

No Teste A1, correspondente ao perfil de temperaturas mais elevado, indicado na Tabela 4.3, verificou-se inicialmente certa estabilização do processo com a formação de espaguete. Porém, depois de resfriado e picotado, o *pellet* mostrou-se quebradiço e poroso. Foi verificada a ocorrência de fratura de fundido e a degradação do material, com forte emissão de odores na saída da extrusora. O perfil de temperaturas elevado teve como intuito garantir a fusão de todas as resinas presentes. Entretanto, o processo não atingiu estabilidade devido à grande presença/geração de voláteis.

No Teste A2, utilizou-se um perfil de temperaturas baixo, ocorrendo dificuldade de formação do espaguete e instabilidade na vazão do produto. Foi verificada a presença de material não fundido, quebrando o espaguete com facilidade e ocorrendo entupimento dos orifícios da matriz. Devido à baixa temperatura, não foram verificados odores na saída da matriz, porém a extrusora desarmou diversas vezes por excesso de corrente elétrica no motor, devido ao esforço da extrusora. O desarme do motor principal, devido à elevação da corrente elétrica consumida, teve como provável causa o aumento do torque da rosca causado pelo aumento da viscosidade ocorrido pela redução da temperatura.

No Teste A3, foi utilizado um perfil de temperaturas intermediário, ocorrendo da mesma forma instabilidade do espaguete, rompendo-se durante o resfriamento na banheira de água antes de alcançar o picotador. O material tornou-se menos poroso do que a altas temperaturas, sendo mais fibroso e com melhor resistência mecânica.

No Teste A4, utilizaram-se temperaturas semelhantes ao Teste A3. As pequenas variações nas temperaturas das quatro zonas tinham como objetivo evitar ao máximo a degradação do material pelo aquecimento do mesmo e melhorar as condições de processabilidade. Estas alterações minimizaram a degradação do material, porém não surtiram o efeito desejado nas condições de processamento. A Figura 4.4 mostra a saída do espaguete após passar pela matriz, no Teste A4. Vê-se a instabilidade de formação do espaguete, rompendo com facilidade e o entupimento do segundo orifício da matriz, visto da esquerda para a direita. A Figura 4.3 mostra o espaguete após resfriado e o material já granulado (*pellet*). Nota-se também a porosidade do material granulado.

Na Tabela 4.4, pode-se observar um resumo dos resultados apresentados no processamento por extrusão.

Tabela 4.4: Características da extrusão da Fase Leve

	Teste A1	Testes A3 e A4	Teste A2
Temperatura de Processamento	Alta	Média	Baixa
Características do espaguete	Estável	Instável	Instável
	Material Fundido	Material não fundido	Material não fundido
	Degradação	Degradação leve	Sem degradação

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 permitem duas constatações: 1ª) apesar dos problemas encontrados (degradação e instabilidade), foi possível processar o material para a produção de *pellets*; 2ª) nenhum dos perfis testados permitiu obter simultaneamente estabilidade do espaguete e baixos níveis de degradação. Isto indica que seria necessário um novo conjunto de testes para otimizar o perfil de temperaturas da extrusora, sendo que uma das alternativas que surge dos dados das Tabelas 4.3 e 4.4 é o uso de temperaturas mais baixas nas primeiras zonas de aquecimento e o uso de temperaturas mais elevadas na matriz e/ou na

zona final de aquecimento. Isto, a princípio, permitiria evitar a instabilidade por entupimento da matriz (devido à presença de material não fundido) sem provocar um nível de degradação muito elevado.

Por motivos que serão discutidos mais tarde (Seção 4.3), decidiu-se que o processamento final para a confecção dos corpos-de-prova para as medidas de propriedades mecânicas seria feito em uma outra extrusora. Sendo assim, optou-se por fazer os testes finais para determinação do perfil de temperaturas em uma etapa posterior, usando o referido equipamento.

4.2.2 Processamento por injeção

No processamento por injeção, foram realizados testes com diferentes perfis de temperatura e pressão, avaliando as melhores condições de processamento.

Amostras da Fração Leve do material lavado (Rota 1 – Figura 3.6) e Material Sujo (Rota 2 – Figura 3.6) foram processadas por injeção e as peças obtidas foram analisadas via inspeção visual, na qual analisaram-se alguns problemas básicos comumente encontrados neste tipo de processamento: preenchimento incompleto da cavidade, contração diferencial (empenamento), marcas de contração (rechupes), porosidade, baixa resistência mecânica e indicativos de degradação. As condições de processamento usadas e o perfil de temperaturas, bem como os resultados qualitativos são mostrados na Tabela 4.5. Cabe mencionar que, sob as condições de processamento utilizadas em todos os testes, tanto com a Fração Leve quanto com o Material Sujo, não foram verificadas significativas contrações diferenciais nem marcas de contração, o que evidencia um resfriamento homogêneo da peça, apesar da heterogeneidade da composição. No caso do Material Sujo, esta heterogeneidade se evidencia pela grande quantidade de resinas presentes (PE, PP, PET, PVC, PS, entre outras) e as contaminações, como materiais orgânicos, areia e papel.

Tabela 4.5: Perfis de temperatura da injetora e características final do produto.

Teste	Material	Perfil de Temperatura (°C)					Produto Final
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	
B1	Material Sujo	220	210	215	205	190	Degradado/Queimado
B2	Material Sujo	190	190	190	190	190	Degradado/Queimado
B3	Fração Leve	230	230	220	210	205	Degradado
B4	Fração Leve	220	220	210	205	200	Heterogêneo
B5	Fração Leve	215	215	205	200	200	Heterogêneo

Os testes B1 e B2, realizados com o Material Sujo, apresentaram grande dificuldade de processamento devido às características térmicas dos constituintes deste material, visto que as temperaturas de fusão e amolecimento do PET e do PVC são (212 a 265°C) e (75 a 105°C) respectivamente (Tabela 3.4). Nestes testes, foi verificada grande degradação do material, com desprendimento de odores, e carbonização do material no teste B1 e em menor grau no teste B2. As possíveis causas são a degradação do PVC e dos contaminantes orgânicos

presentes devido ao material apresentar-se sujo, como gorduras e óleos, e outros contaminantes, como terra e papel. Além disto, as peças formadas, de paredes finas, apresentavam-se defeituosas e com baixa resistência mecânica, porém com um preenchimento das cavidades satisfatório na maioria dos testes, com falhas de preenchimento em algumas peças, devido à dificuldade de fluxo.

Outro agravante do processamento deste tipo de material por injeção foi a presença de metais no produto, devido a falta de lavagem do material. Estes metais foram retirados com um ímã colocado no bocal de alimentação da injetora.

Os aspectos mencionados acima indicam que este material não é adequado para o processo de injeção. No entanto, o fato de ter sido possível obter peças dimensionalmente estáveis, apesar dos defeitos e fragilidade destas, sugere que a produção de peças de maior espessura através de um processo com menos restrições em termos de exigências de altas velocidades e escoamento por canais estreitos, poderia ser uma alternativa interessante para o uso do Material Sujo. Neste sentido, uma sugestão seria a análise da obtenção de blocos por meio de moldagem por compressão. No entanto, esta alternativa não foi analisada neste trabalho por restrições de tempo.

Os demais testes foram realizados com a Fração Leve (PE's, PP e PS Expandido). Devido ao intervalo de temperaturas de fusão ser menor, os resultados atingidos foram superiores aos apresentados pela injeção do Material Sujo. Para a Fração Leve o preenchimento das cavidades do molde foi satisfatório em todos os testes realizados. Nos Testes B4 e B5 obteve-se uma boa processabilidade do material, com peças de formação regular embora um pouco quebradiças. O perfil de temperaturas mais alto no Teste B3 gerou resultados piores devido ao início da degradação do material e à dificuldade de retirada das peças do molde.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, pode-se ver as peças injetadas com as imperfeições. A Figura 4.5 mostra a peça injetada, que apresenta como característica paredes finas e várias cavidades. Nota-se que neste caso a peça não foi totalmente preenchida. A Figura 4.6 mostra o detalhe do canal de alimentação do molde, com presença de material não fundido e a estrutura interna porosa.

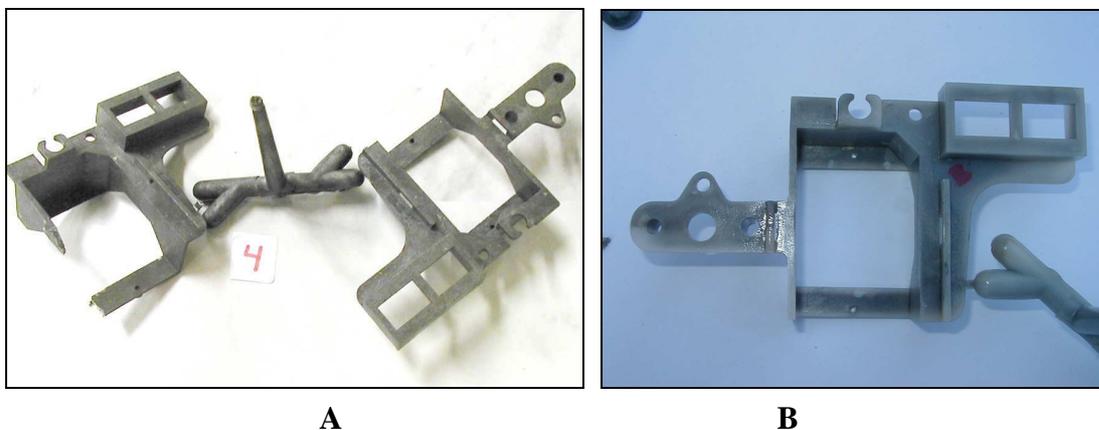


Figura 4.5: Perfis da peça injetada em A e B



Figura 4.6: Estrutura interna porosa da peça

Causas possíveis para estas imperfeições podem ser: inconsistência do sistema de alimentação e alterações drásticas na viscosidade do material fundido, devido à heterogeneidade da sua composição, além da presença de material não fundido como, por exemplo, pela presença da fase PET sólida na superfície da peça.

Foram verificados graus elevados de porosidade (Figura 4.6), principalmente no teste com perfil de temperatura mais elevado (Teste B3). A principal causa de porosidade em peças injetadas é a presença de voláteis presentes/gerados no material fundido injetado. Neste caso, estes voláteis são provavelmente causados pela umidade na massa fundida e pela presença de material orgânico degradado. Esta porosidade e a falta de miscibilidade entre vários dos materiais presentes na peça e os contaminantes não poliméricos são as prováveis causas da baixa resistência mecânica da peça.

Os resultados apresentados na Tabela 4.5 indicam que foi possível produzir peças injetadas com o material heterogêneo, e a possibilidade de reduzir mais a temperatura de processamento do material. Porém, não foi possível realizar testes adicionais nesta injetora devido a limitações na disponibilidade da injetora do CEFET/RS. Deste modo, deixou-se para fazer novos testes, visando otimizar a temperatura, no equipamento onde também foram realizados os testes de propriedades mecânicas. O critério foi reduzir as temperaturas até próximo do limite de processabilidade.

4.3 Testes para definição das condições de processamento na preparação dos corpos-de-prova para determinação de propriedades mecânicas.

Até esta etapa, os testes realizados no CEFET/RS visavam avaliar a possibilidade de processamento dos diversos tipos de materiais, tendo sido utilizados equipamentos que não

dispunham de moldes para a confecção de corpos-de-prova. A partir daí, foram realizados testes de processamento na Ipiranga Petroquímica S.A. (IPQ), com a intenção de avaliar as propriedades mecânicas da Fração Leve. A extrusora utilizada nesta etapa do trabalho difere da utilizada anteriormente pela maior precisão da instrumentação e pela capacidade de resfriamento das zonas, mantendo a temperatura estável.

Conforme discutido na Seção 4.2.1, os resultados obtidos na extrusora do CEFET/RS indicaram que poderia ser mais adequado o uso de temperaturas inferiores nas primeiras zonas de aquecimento e de temperaturas mais elevadas na matriz. De acordo a isto foram realizados novos testes, a partir dos quais definiu-se o perfil de temperaturas apresentado na Tabela 4.6 como o mais adequado. Este perfil permitiu atingir a estabilidade do espaguete e baixos níveis de degradação, sem a ocorrência de entupimentos dos orifícios da matriz, obtendo *pellets* com baixa porosidade. A rotação da rosca utilizada foi de 20 rpm. Foi inserida uma tela, a fim de reter algum contaminante presente.

Tabela 4.6: Perfil de temperaturas usado na extrusão

Perfil de Temperatura (°C)				
Zona1	Zona2	Zona3	Zona4	Matriz
140	160	180	190	210

A Figura 4.7 mostra a saída da extrusora, com o polímero fundido, em forma de espaguete, saindo dos furos da matriz e sendo resfriados para posteriormente serem picotados.

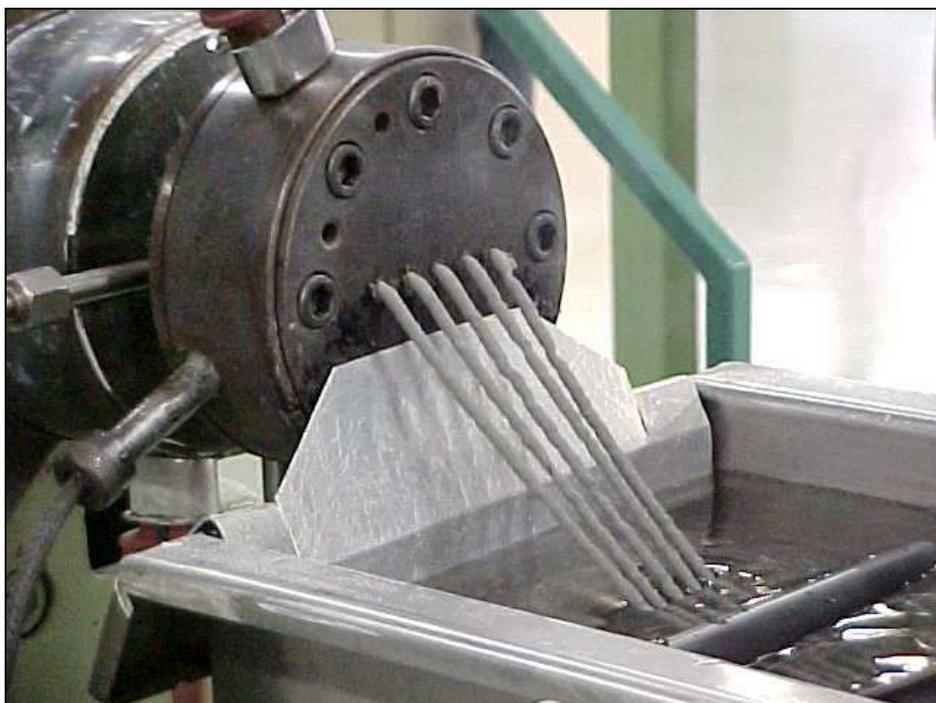


Figura 4.7: Polímero fundido da saída da extrusora

Da mesma forma, com base na discussão apresentada na Seção 4.2.2, no segundo conjunto de testes de injeção, partiu-se do perfil de temperaturas similar ao do teste B5 (Tabela 4.5) e reduziu-se lentamente a temperatura, visando a redução da degradação sem interferir no preenchimento das cavidades. Além disso, em todos os testes realizados na injetora da IPQ, utilizou-se um molde para a obtenção dos corpos-de-prova para os testes de propriedades mecânicas. Os perfis testados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Perfil de temperaturas utilizado na injetora

Teste	Tipo	Perfil de Temperatura (°C)			
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Bico de injeção
C1	Fração Leve	215	215	205	200
C2	Fração Leve	200	200	200	180
C3	Fração Leve	185	200	185	165
C4	Fração Leve	175	185	175	155
C5	Fração Leve	170	170	160	155

Para todos os testes foi possível o preenchimento do molde. Em todos os testes as peças obtidas apresentaram coloração mais clara do que as obtidas na extrusora do CEFET/RS. Quanto ao odor, mostrou-se que na medida em que era diminuído o perfil de temperaturas da injetora, do teste C1 ao teste C5, também diminuía o odor das peças obtidas. Desta forma, como por questões de segurança não seria adequado uma redução adicional das temperaturas, escolheu-se o perfil C5 para ser utilizado posteriormente na produção dos corpos-de-prova.

4.4 Propriedades mecânicas

Após a determinação do perfil de temperaturas de extrusão e injeção, definiram-se duas alternativas de processamento para a preparação dos corpos-de-prova, conforme descrito na seção 3.2. Uma das alternativas foi o processamento das amostras diretamente por injeção (I) e a outra consistiu da injeção precedida de uma etapa de extrusão (E-I). O objetivo deste teste foi avaliar as alterações nas propriedades mecânicas com o aumento do número de etapas de processamento e a influência da etapa de extrusão/peletização antes do processamento por injeção.

A Figura 4.8 mostra a peça injetada utilizada para determinação das propriedades mecânicas. Desta peça, foram retirados os corpos-de-prova utilizados nos testes de resistência ao impacto Izod, Flexão e Tração e VICAT.



Figura 4.8: Peça injetada

4.4.1 Resistência ao impacto Izod

Foram avaliados corpos-de-prova submetidos à injeção (I) e corpos-de-prova submetidos à extrusão seguida de injeção (E-I). Os resultados destes testes são mostrados na Tabela 4.8 sendo que cada valor apresentado corresponde à média de dez medidas.

Tabela 4.8: Resultados de Impacto Izod dos processos E-I e I.

Processo	Pêndulo (J)	Izod 23°C (J/m)
E-I	1,00	84 ± 7
	2,75	77 ± 4
I	1,00	161 ± 24
	2,75	150 ± 14

Observa-se que os melhores resultados de resistência ao impacto Izod foram obtidos pelo processo I, submetidas apenas à injeção. Este resultado mostra que a etapa de extrusão provocou maior degradação do produto, diminuindo o Impacto Izod.

As amostras previamente extrudadas (E-I), apesar de apresentarem-se visivelmente mais homogêneas, mostraram menor resistência ao impacto, com uma redução de aproximadamente 50% em relação às amostras apenas injetadas.

Neste sentido, deve-se lembrar que a etapa adicional de processamento nas amostras do processo E-I pode afetar a resistência ao impacto final por meio de dois mecanismos que atuam em sentidos opostos:

1. O maior grau de degradação da amostra durante o processamento por extrusão, que tende a diminuir a resistência ao impacto;

2. A maior homogeneidade da amostra com a fusão e cisalhamento da amostra dentro da extrusora, que tende a aumentar esta propriedade.

Portanto, os resultados obtidos sugerem que o efeito da degradação é mais pronunciado que o da homogeneização, indicando que a rota de injeção direta é a mais adequada quando o objetivo é obter maior resistência ao impacto.

A título de comparação, a Tabela 4.9 apresenta valores de resistência ao impacto Izod de resinas virgens, sendo 20 J/m o valor típico de *grades* de polímeros de injeção e os valores mais altos de resistência ao impacto Izod referentes a *grades* especiais. O polietileno de baixa densidade (PEBD) apresenta resistência ao impacto elevada, não sendo aplicável este tipo de ensaio, pois não ocorre a fratura ou fissura do corpo-de-prova com o impacto do martelo ou pêndulo, mas apenas a sua deformação (MANO, 1991). Segundo Nielsen (1974) o valor de resistência ao impacto do polietileno de baixa densidade é maior que 855 J/m. Comparando-se a Tabela 4.8 com a Tabela 4.9, observa-se que tanto para as amostras com extrusão (E-I), como para as amostras somente injetadas (I), os resultados obtidos foram muito bons, visto que todos os valores ficaram na faixa dos valores correspondentes à resistência ao impacto Izod de resinas virgens. Este resultado pode ser atribuído ao efeito do PEBD presente na mistura. Outro fator relevante é a presença de materiais de diversas aplicações dentro da mesma resina, alguns com elevadas propriedades mecânicas.

Tabela 4.9: Valores de impacto Izod típicos das resinas virgens (IPQ, 2003).

Resina	Izod 23°C (J/m)
PP	20 a 620
PEAD	25 a 715
PEBD	Não aplicável

Resultados similares foram obtidos por Scott (1994), que comparou a resistência ao impacto Charpy de amostras retiradas do Resíduo Sólido Urbano (RSU), com amostras de mesma composição formada por resinas virgens, com amostra composta por 50 % de RSU enriquecida com 50% de PEAD e com amostras das Frações de RSU após lavagem.

4.4.2 Resistência à tração

A Tabela 4.10 apresenta os resultados de resistência à tração dos corpos-de-prova da amostra injetada e da amostra extrudada e injetada, sendo que cada valor apresentado corresponde à média de dez medidas. Foram avaliados: a tensão e o alongamento tanto no escoamento quanto na ruptura e o Módulo de Young.

Comparando-se os dados, verifica-se pouca influência da etapa de extrusão no que tange às tensões requeridas pelas amostras, visto que os resultados são similares. No entanto, ocorreu significativa redução no alongamento, tanto na ruptura quanto no escoamento, da amostra do

processo E-I em relação à amostra do processo I. Esta redução provavelmente seja consequência do aumento de degradação que a etapa de extrusão provoca na amostra.

Tabela 4.10: Resultados do teste de tração dos processos E-I e I.

Processo	Escoamento		Ruptura		Módulo Young MPa
	Tensão	Alongamento	Tensão	Alongamento	
	MPa	%	MPa	%	
E-I	22,4 ± 0,8	6,1 ± 1,5	21,9 ± 0,6	7,5 ± 2,4	7.681 ± 3.110
I	21,0 ± 0,6	12,5 ± 2,4	17,3 ± 2,0	25,5 ± 15,0	1.952 ± 778

A Tabela 4.11 apresenta valores de resistência à tração de resinas virgens, que servem como referência para comparação com os resultados obtidos neste trabalho. Os valores de tensão apresentados pelas amostras estudadas situam-se na faixa inferior dos valores apresentados pelas resinas virgens. Este resultado foi considerado muito bom, visto que a amostra estudada apresenta mistura de *grades* de resinas diferentes.

A única propriedade que apresentou valores inferiores, em comparação com as resinas virgens, foi o alongamento na ruptura. Deve-se lembrar que as amostras foram retiradas da caixa de rejeitos da Coleta Seletiva de lixo da cidade de Porto Alegre, e possuem vários tipos de resinas, grande heterogeneidade de propriedades e presença de contaminantes que porventura não foram retirados durante a etapa de lavagem com água. No processamento, algumas resinas não fundidas e diferenças de fluidez entre estas provocaram a presença de heterogeneidades nas peças injetadas. Estas formam pontos frágeis que se rompem facilmente durante os testes de alongamento na ruptura.

Tabela 4.11: Resistência à tração de resinas virgens (IPQ, 2003; MARK, 1999, ASTM, 2002, SAECHTLING, 1995).

Resistência a Tração	Unidade	PP	PEAD	PEBD
Tensão no Escoamento	MPa	20 - 38	23 - 32	9 - 15
Alongamento no Escoamento	%	3,8 - 13,0	6,6 - 10,0	20,0
Tensão na Ruptura	MPa	2,0	23 - 43	-
Alongamento na Ruptura	%	293	760 - >1000	100 - 800
Módulo de Young	MPa	-	-	102 - 310

4.4.3 Resistência à flexão

A Tabela 4.12 apresenta os valores de resistência à flexão da amostra injetada e da amostra extrudada e injetada, sendo que cada valor apresentado corresponde à média de dez medidas.

Na Tabela 4.12, verificam-se resultados ligeiramente melhores de Tensão a 5% das amostras extrudada e injetada (E-I) em relação à amostra apenas injetada (I), provavelmente devido a melhor homogeneização da amostra pela etapa de extrusão. Resultados opostos apresentaram a deformação a 5 MPa e 10 MPa, provavelmente devido a maior degradação provocado pela etapa de extrusão do processo E-I em relação ao processo I.

Tabela 4.12: Resultados do teste de flexão dos processos E-I e I.

Processo	Tensão 5%	Deformação 5 MPa	Deformação 10 MPa	Módulo Tangente 1%
	MPa	%	%	MPa
E-I	31,1 ± 0,3	0,450 ± 0,011	0,932 ± 0,019	1.148 ± 41
I	23,9 ± 0,3	0,566 ± 0,016	1,239 ± 0,029	956 ± 51

Comparando os resultados de módulo tangente 1% das resinas virgens (950 – 1780 MPa para o PP e 240 – 330 MPa para o PEBD) com os valores apresentados pelas amostras estudadas, verifica-se que estes foram muito bons, visto que todos os valores ficaram na faixa dos valores correspondentes aos valores apresentados pelas resinas virgens. Comparando-se os resultados dos testes de Tração e Flexão, vê-se uma melhora das propriedades de tensão (MPa) para a amostra do processo E-I e uma melhor resultado em relação à deformação/alongamento (%) na amostra do processo I.

4.4.4 VICAT

A Tabela 4.13 apresenta os valores de temperatura de amolecimento Vicat apresentados pelas amostras analisadas. Foram realizadas três corridas para cada processo, sendo que em cada corrida foram colocadas seis amostras de teste.

Tabela 4.13: Resultado Vicat com todas as amostras dos processos I e E-I, em °C

Posição da Amostra	Processo I			Processo E-I		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	106,1	103,3	104,5	106,7	109,6	110,5
2	104,4	104,0	104,8	109,1	107,9	109,2
3	107,3	88,3	106,7	90,4	94,2	99,7
4	106,5	107,0	103,8	110,6	110,2	110,5
5	107,3	106,1	105,8	109,9	107,4	107,3
6	103,9	107,7	106,2	109,1	107,3	109,9
Média	105,9 ± 1,4	102,7 ± 7,3	105,3 ± 1,1	106,0 ± 7,7	106,1 ± 5,9	107,9 ± 4,2
Média *		104,7 ± 3,3			106,6 ± 6,0	
		105,4 ± 1,4			109,0 ± 1,3	

Os resultados da Tabela 4.13 foram submetidos a um teste ANOVA para verificar a significância das diferenças entre as médias para os processos E-I e I. A análise das médias globais (106,6 e 104,7°C) indicou que estes valores não são significativamente diferentes. Entretanto, analisando a Tabela 4.13, pode-se verificar que a amostra 3, em quatro das seis corridas totais, apresentou valores muito abaixo dos valores das outras amostras. Este comportamento pode ter ocorrido devido a problemas na posição 3 do equipamento, entre eles: medidor de temperatura deslocado, desgaste da ponteira, posicionamento da ponteira. Desta forma, decidiu-se refazer a análise desconsiderando os resultados referentes à amostra 3, referenciados como Média * na Tabela 4.13. A nova análise estatística comprovou que os resultados das amostras apresentam uma diferença significativa (valor-p < 0,001) sendo a análise de normalidade dos dados apresentada na Figura 4.9.

Comparando os resultados dos dois processos (Figura 4.10), verifica-se que a temperatura necessária para a deformação da amostra do processo I é inferior à apresentada pela amostra do processo E-I. Os resultados sugerem que (E-I) é menos suscetível aos efeitos de deformações provocados por temperatura que (I). Isto pode ser devido ao aumento de viscosidade das amostras do processo E-I, explicado com a análise morfológica na próxima seção.

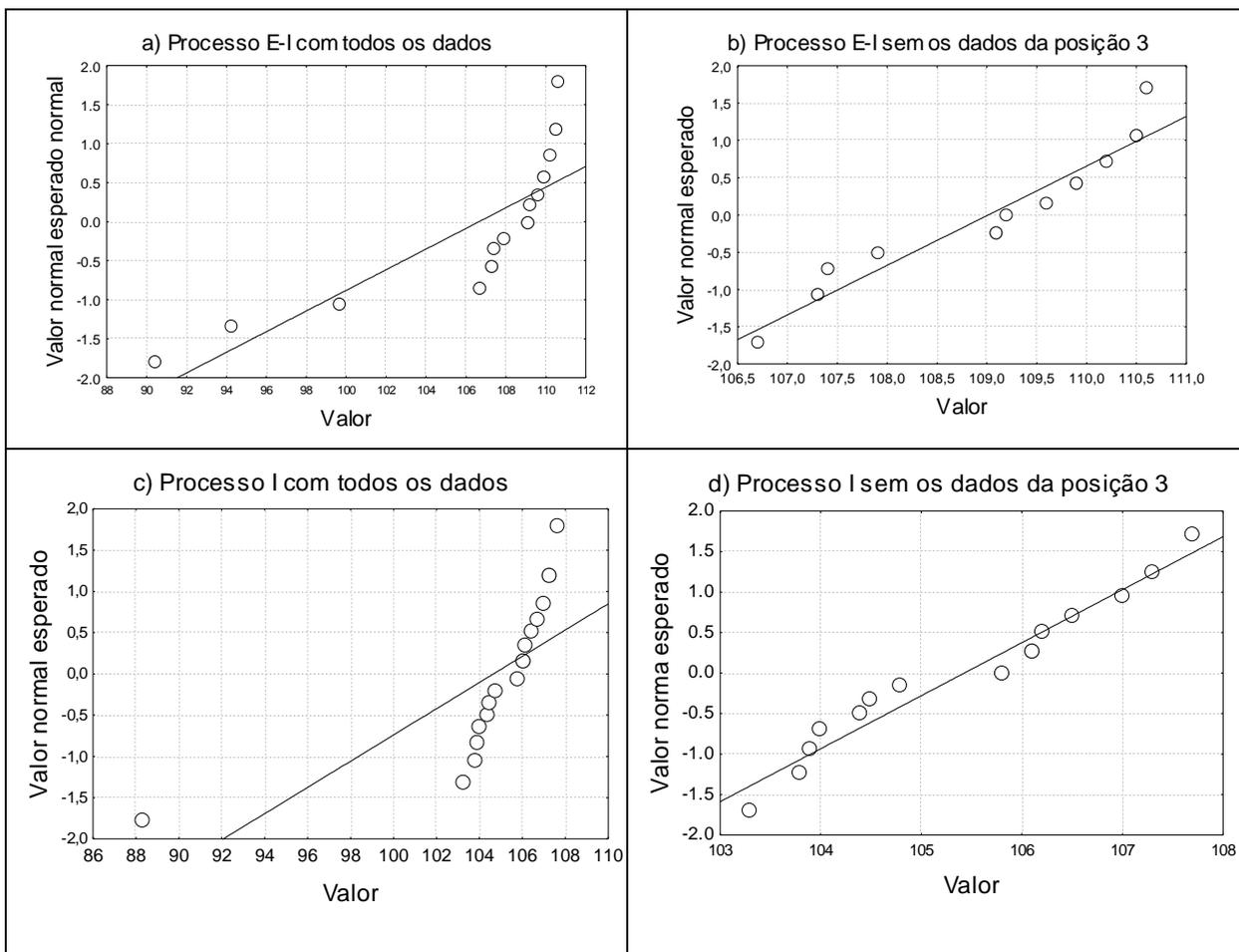


Figura 4.9: Análise de normalidade dos dados de VICAT com todos os resultados e sem a posição 3.

Os valores típicos de Vicat do PEAD estão entre 120 e 129°C e PP entre 125 e 156°C (IPQ, 2003) e do PEBD entre 90 e 102°C (MARK, 1999). Verifica-se que os valores encontrados na blenda de PP, PEAD e PEBD estão coerentes com os resultados apresentados pelas resinas virgens, sendo estes menores que os do PP e PEAD e maiores que o PEBD.

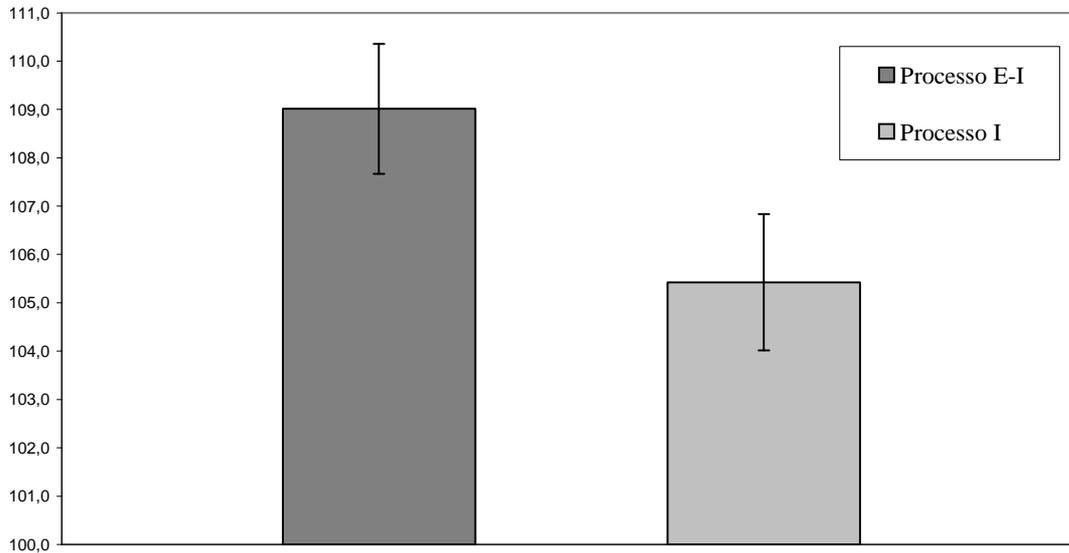


Figura 4.10: Temperatura de amolecimento VICAT dos Processo E-I e I.

4.5 Morfologia por Microscopia

As amostras dos processos E-I e I foram submetidas à MEV, onde foi analisada a superfície das amostras. A análise foi realizada com aumentos de 60, 250, 5.000, 25.000 e 40.000 vezes, apresentadas da Figura 4.11 até a Figura 4.15. Na Figura 4.16 foi utilizada a técnica de elétrons retroespalhados, e na Figura 4.17 algumas incrustações presentes na amostras analisadas.

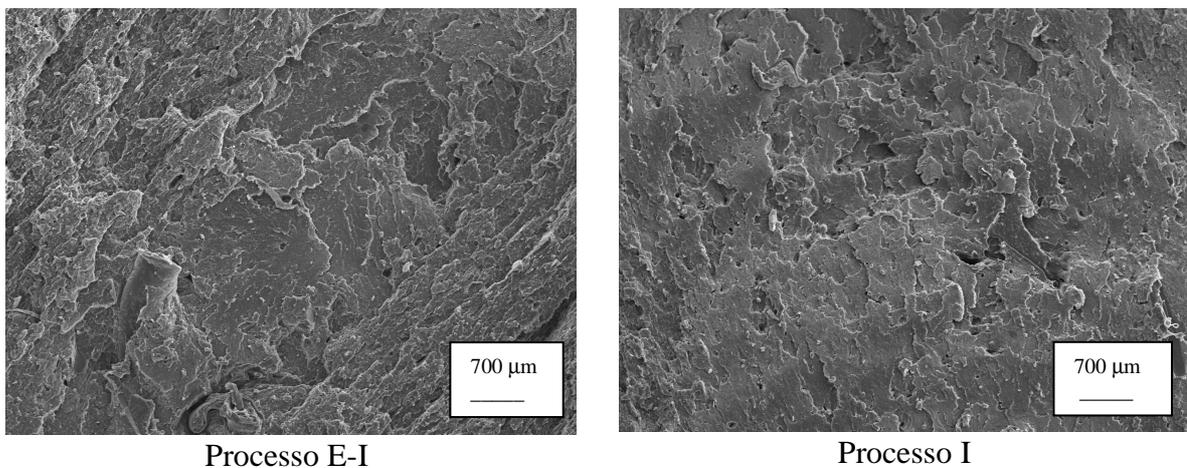


Figura 4.11: Imagens de amostras dos processos E-I e I (originais com 60x de aumento)

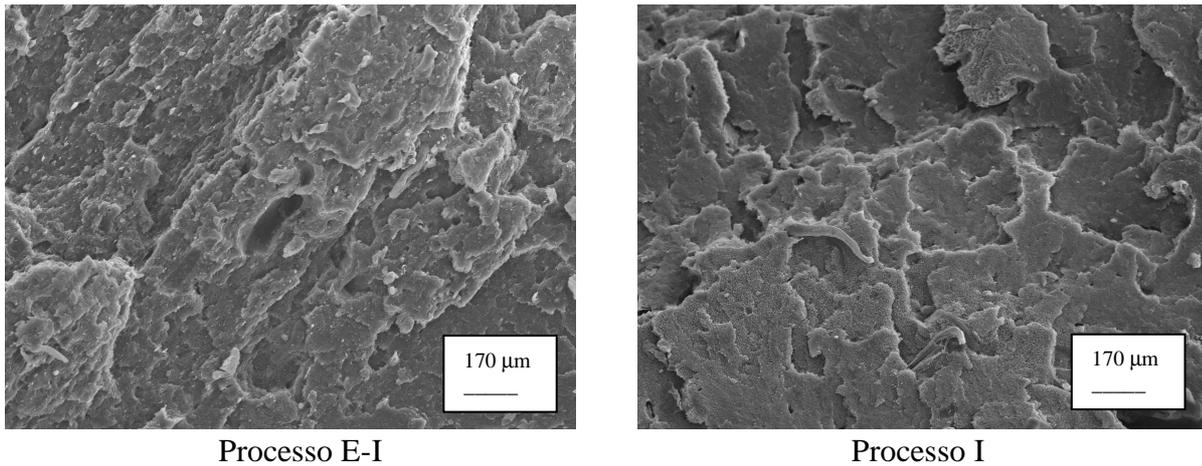


Figura 4.12: Imagens de amostras dos processos E-I e I (originais com 250x de aumento)

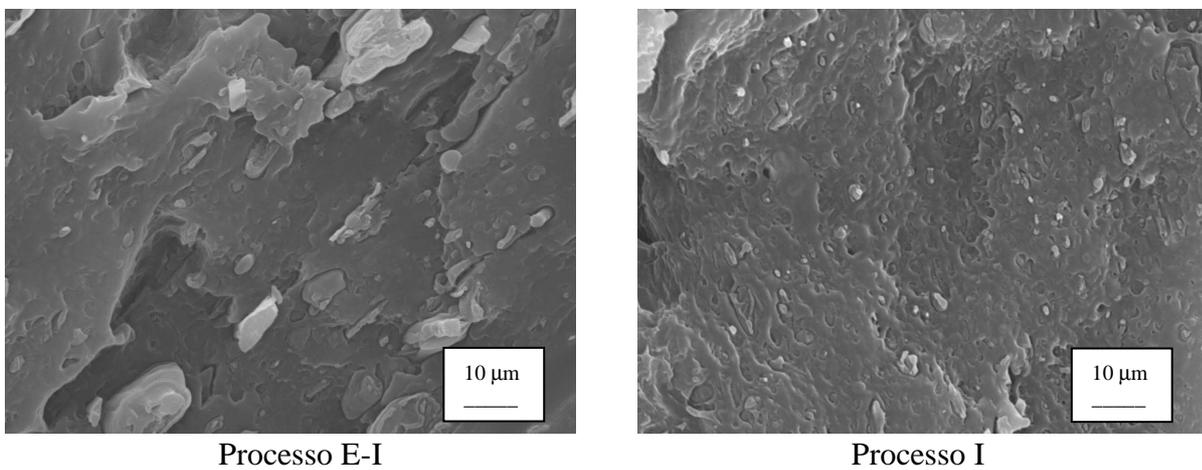


Figura 4.13: Imagens de amostras dos processos E-I e I (originais com 5000x de aumento)

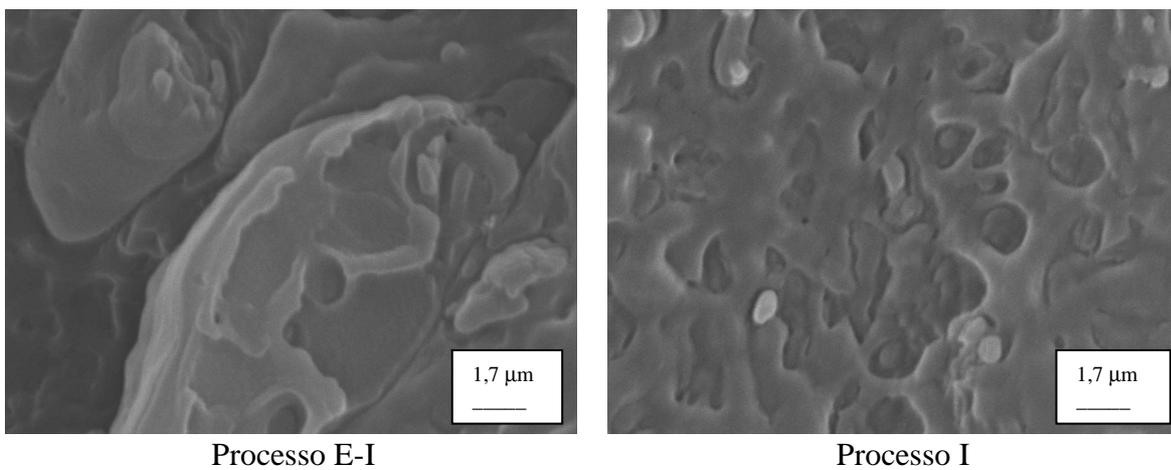
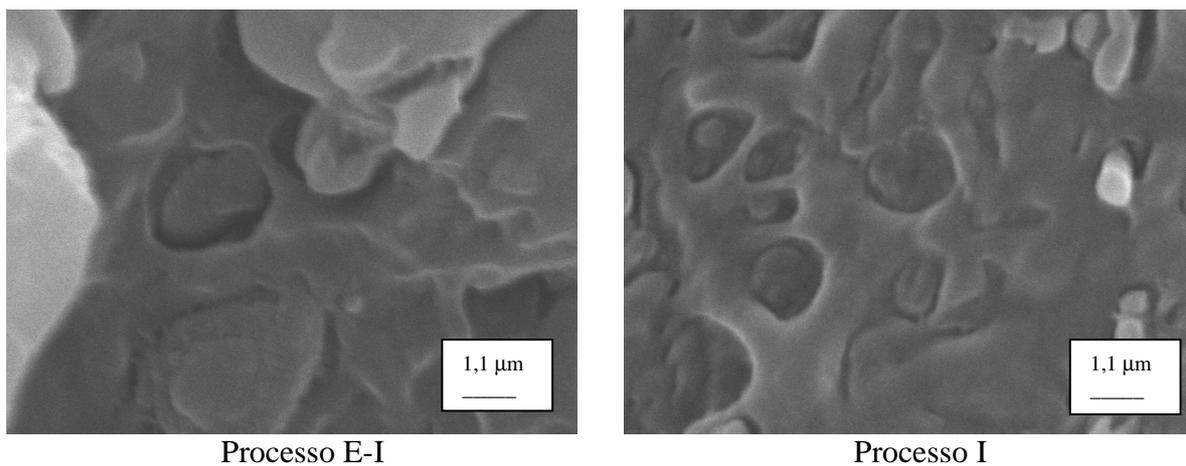
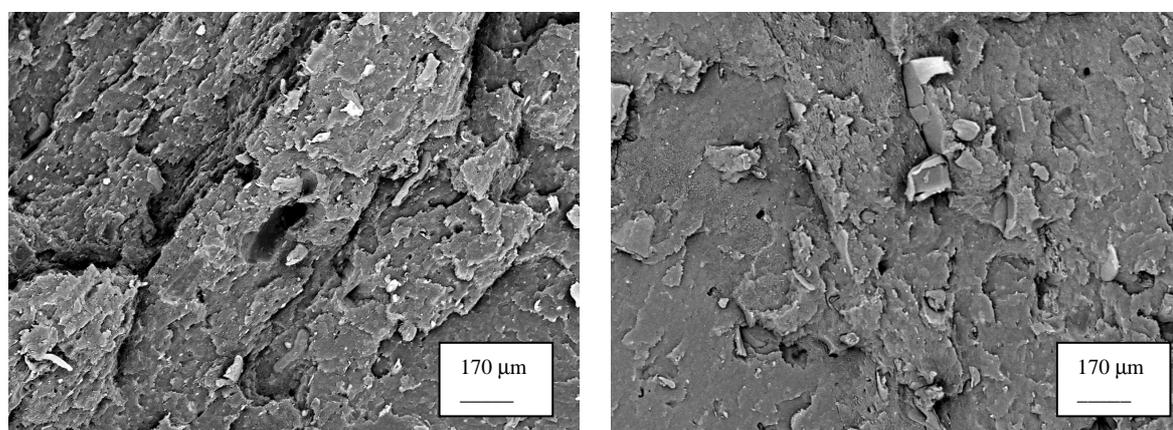


Figura 4.14: Imagens de amostras dos processos E-I e I (originais com 25000x de aumento)



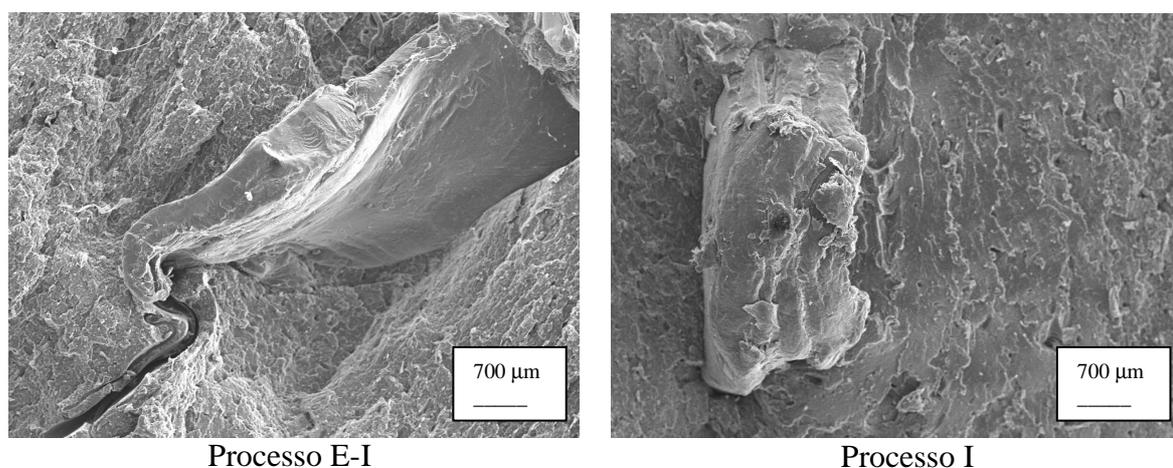
Processo E-I

Processo I

Figura 4.15: Imagens de amostras dos processos E-I e I (originais com 40000x de aumento)

Processo E-I

Processo I

Figura 4.16: Imagens de amostras dos processos E-I e I; elétrons retoespalhados (originais com 250x de aumento)

Processo E-I

Processo I

Figura 4.17: Imagens de incrustações encontradas nas amostras (originais com 60x de aumento).

Pode-se observar que todas as amostras apresentam caráter multifásico, com partículas dispersas em uma matriz contínua (Figura 4.11 a 4.15). Embora as fases não tenham sido analisadas separadamente, pode-se esperar que a fase dispersa seja composta principalmente por PP, que é o polímero presente em menor quantidade na mistura, sendo a fase contínua formada por PEs.

Outro aspecto importante é a presença de incrustações (Figura 4.17) nas amostras, sendo que tais incrustações são provavelmente formadas por resíduos de materiais como PET, os quais tenham sido arrastados com a fase sobrenadante na etapa de lavagem.

Por outro lado, a comparação das amostras dos processos extrusão-injeção (E-I) e injeção em passo único (I) nas Figura 4.11 a 4.15 mostra duas diferenças importantes entre as morfologias das fases geradas pelos dois processos, que dizem respeito ao tamanho médio das partículas da fase dispersa e à presença de orientação.

O tamanho médio das partículas da fase dispersa no processo E-I é maior que o do processo I. Portanto, além da degradação, o processo E-I não foi melhor para a dispersão. Para analisar este comportamento, deve-se ter em conta que entre os fatores mais importantes na determinação das dimensões da fase dispersa em uma blenda imiscível estão a razão de viscosidades e a tensão interfacial. Na comparação dos dois processos, os fatores relacionados à tensão interfacial são aproximadamente constantes, visto que a composição da mistura polimérica é a mesma nos dois processos. Isto indica que as diferenças morfológicas obtidas nos dois processos devem estar associadas a diferenças de viscosidade geradas durante o processamento no caso do processo E-I, provocadas pela influência da etapa de extrusão. Tais diferenças poderiam estar associadas a um maior nível de degradação nas amostras do processo E-I, devido a etapa adicional de extrusão utilizada nesta rota de processamento. Suporte para esta afirmação pode ser encontrado na literatura.

No PE, ocorre um aumento da massa molar, embora ocorra e existência do carbono terciário em pequenas proporções nos PE com ramificações. Vários autores estudaram estas duas rotas de degradação do polietileno, que atuam em sentidos opostos. No caso do PEAD, um dos mecanismos de degradação é a quebra da cadeia, o que provoca uma redução da viscosidade, e o outro é a ramificação da cadeia, o que provoca um aumento da viscosidade do polímero. Estes mecanismos são concorrentes e influenciados pela taxa de cisalhamento e pela temperatura de processamento (POCK, 2003; PINHEIRO, 2004, 2006). Já outros autores estendem a análise para as poliolefinas, sendo que os PE possuem grande tendência às ramificações da cadeia e o PP tendência à quebra da cadeia (SANTOS, 2002; LUZURIAGA, 2005). Alguns autores estudaram o fenômeno da degradação do PEAD com o aumento do número de extrusões (LOULTCHEVA, 1996; DINTCHEVA, 2002) Segundo Loutcheva (1996), a contínua porém leve diminuição na viscosidade com o aumento do número de extrusões é observada a altas taxas de cisalhamento, e um leve aumento na viscosidade foi verificado a baixas taxas de cisalhamento. Este aumento da viscosidade a baixas taxas de cisalhamento está de acordo com os resultados apresentados neste trabalho. Durante o processamento do PEAD, os efeitos termomecânicos provocam tanto a quebra da cadeia quanto o aumento do tamanho molecular, devido à formação de ramificações de cadeia. A

presença de tensão de cisalhamento a baixas temperaturas tende a promover ramificações da cadeia, enquanto que a degradação térmica preferencialmente induz à quebra da cadeia. Por outro lado, no caso do PP, a degradação provoca quebra da molécula pela fragilização do carbono terciário (JANSSON, 2003), reduzindo sua viscosidade, efeito este que se intensifica com o aumento do número de reciclagens (AURREKOETXEA, 2001a, 2001b; MARTINS, 2001, 2002; COSTA, 2005).

Com base nos resultados da literatura discutidos acima, e levando em conta que o PE é um dos principais componentes da amostra, seria admissível esperar um aumento da viscosidade nas amostras obtidas pelo processo E-I. Isto justifica tanto as diferenças de morfologia e distribuição do tamanho das fases encontradas nos dois processos (Figuras 4.13, 4.14 e 4.15), como a presença de orientação nas amostras do processo E-I (Figuras 4.11 e 4.12).

Além das análises por microscopia eletrônica, realizou-se também a análise por microscopia ótica, cujos principais resultados são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19.

A Figura 4.18 mostra a diferença de tonalidade entre as amostras do processo E-I (metade superior das figuras) e as do processo I (metade inferior das figuras). Esta diferença está associada ao maior grau de degradação sofrido pelo acréscimo da etapa de extrusão. A figura apresenta uma imagem comparativa das duas amostras e no detalhe, a superfície lateral destas, onde se confirma maior irregularidade da superfície da amostra (E-I) em relação à amostra (I).

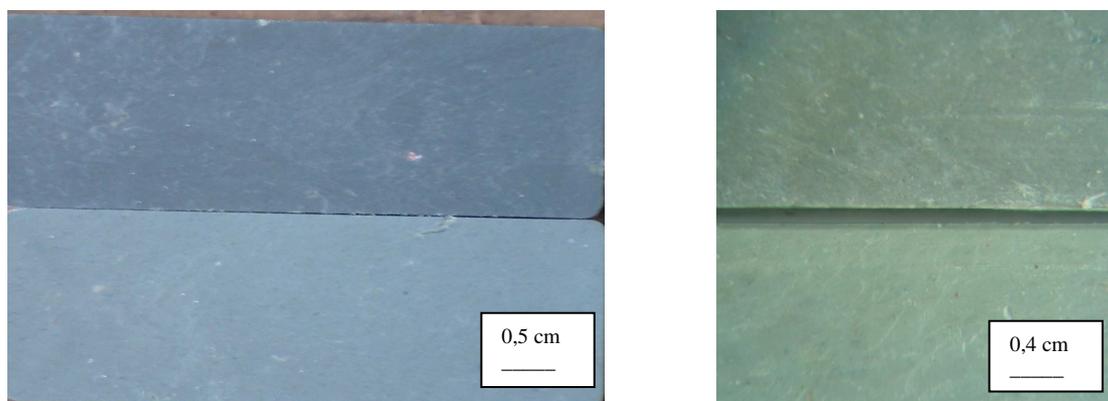


Figura 4.18: Comparação entre as amostras dos processos E-I (acima) e I (abaixo).

A Figura 4.19 mostra a superfície da quebra, ou seja, a mesma analisada por MEV. Pode ser observada a superfície mais regular na amostra do processo I (metade inferior das figuras) e maior irregularidade superficial na amostra do processo E-I (metade superior das figuras).

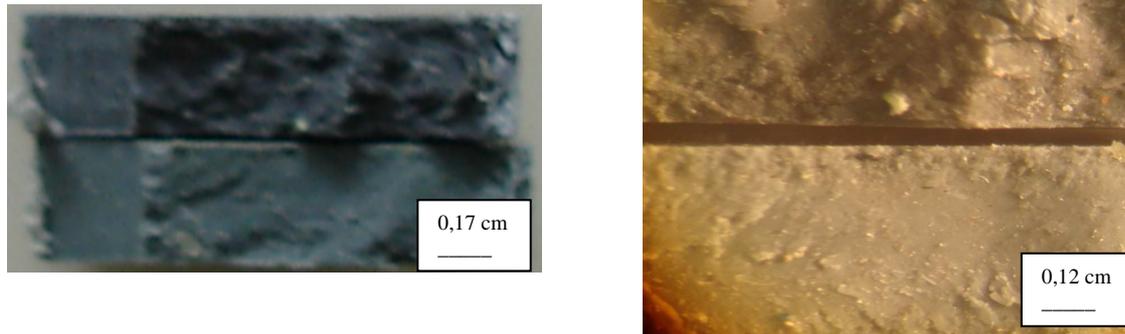


Figura 4.19: Comparação das superfícies das amostras dos processos E-I (acima) e I (abaixo).

Por outro lado, é importante mencionar que as observações feitas nas análises por microscopia podem ser utilizadas para uma melhor compreensão dos resultados de propriedades mecânicas discutidas na seção 4.4.

Assim, por exemplo, os menores valores de resistência ao impacto, apresentados pelas amostras do processo E-I, estão de acordo com a distribuição mais grosseira da fase dispersa e com a maior irregularidade superficial observada nestas amostras, em comparação com as amostras do processo I. A mesma interpretação poderia ser estendida aos resultados de tração.

Por outro lado, a maior degradação e maior aumento do tamanho médio de cadeia, sugerido pelas diferenças na dispersão de fases encontrados por MEV, justificariam o fato de as amostras do processo E-I apresentarem maior temperatura de amolecimento VICAT.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como propostas para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões deste trabalho

Amostras de plásticos misturados rejeitados após separação na Unidade de Triagem da Coleta Seletiva de Porto Alegre foram coletadas em diferentes períodos do ano. A caracterização destas amostras apresenta diferentes composições, podendo ser consequência da variação da quantidade e tipos de material consumidos pela população durante o ano. Esta diferença de composição dificulta a determinação das condições ideais de processamento visto que os parâmetros de controle utilizados são relacionados com o tipo de polímero a ser processado.

A idéia inicial de processamento dos plásticos misturados sem lavagem, por extrusão e injeção, não foi possível devido a grande variedade de polímeros processados, resultando em um produto degradado e não homogêneo. Contudo, os resultados encontrados indicam que valeria a pena o estudo de rotas alternativas de processamento para este material.

Os resultados obtidos durante o processamento dos plásticos misturados presentes na Fração Leve resultante da lavagem foram melhores que os esperados inicialmente, uma vez que tinha-se conhecimento da grande dificuldade de obtenção de bons parâmetros para o processamento de materiais misturados.

Os métodos de secagem utilizados não foram satisfatórios, optando-se então pela aglutinação do material. Desta forma, obteve-se um material agregado e com baixo teor de umidade.

O processamento por injeção da Fase Leve gerou peças homogêneas com considerável resistência mecânica, resultado comprovado através de ensaios mecânicos, peças estas que poderão ser utilizadas em produtos comerciais.

Nos dois processos utilizados, injeção direta (I) e extrusão seguida de injeção (E-I), os valores de resistência ao impacto Izod obtidos foram muito bons, sendo da mesma ordem dos valores encontrados para resinas virgens. Porém, a injeção direta (I) apresentou-se como a rota mais adequada para o processamento deste tipo de produto, visto que a degradação gerada pela etapa de extrusão reduz a resistência ao impacto Izod final. Este comportamento também pode ser verificado com os resultados de resistência á tração. Já os valores de VICAT apresentaram-se contrários, com os melhores resultados apresentados pelas amostras do processo E-I.

Comparando as propriedades apresentadas pelas amostras dos processos E-I e I com as propriedades das resinas virgens, verifica-se que a maioria das propriedades medidas nas amostras deste trabalho enquadraram-se na faixa de valores típicos das resinas virgens.

Os resultados sugerem que o processamento da Fração Leve resultante da lavagem do material misturado é possível, que o perfil de processamento utilizado foi apropriado, que não degradou o material a ponto de perder em propriedades mecânicas e que o produto final obteve uma boa homogeneização.

Logo, ao pensar-se em desenvolvimento de produtos a partir de materiais poliméricos misturados, constata-se que a rota a ser utilizada de forma mais adequada é a da injeção direta.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, sugerimos:

- Processamento dos plásticos misturados sem lavagem, buscando rotas alternativas que possibilitem a produção de materiais com valor agregado.
- Utilização de peróxidos para avaliar o efeito “compatibilizante” das frações poliméricas.
- Utilização de antioxidantes e/ou outros aditivos avaliando a redução da degradação do produto final e o aumento do valor agregado.
- Lavagem do material utilizando tensoativos, analisando a água desta lavagem e a possível necessidade de uma estação de tratamento de efluentes.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

AGUIAR, A., PHILIPPI, A. Reciclagem de Plásticos de Resíduos Domésticos: Problemas e Soluções. São Paulo: FSP/USP, 1998, 19p

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Urbana e Resíduos Especiais. Disponível em <<http://www.abrelpe.com.br>> Acesso em julho de 2004.

ANSEMS, A.M.M., GROOT ,J.L.B., JANSSEN, K.H.P., VAN DER VLUGT, M., WIEGERSMA, S. Best Practices for the mechanical recycling of post-user plastics. TNO Institute of Industrial Technology, APME, September, 2000. 116p.

APME. Plastics: At work for a sustainable future. 2004. Disponível em <<http://www.plasticseurope.org>> ou <<http://www.apme.org>>, Acesso em julho de 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR – 12.980 Normas Brasileiras Registradas, 1993, item 3.84. p.5

ASTM D 256, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 2003.

ASTM D 638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2002.

ASTM D 790, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 1997.

ASTM D 882, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, 1997.

ASTM D 1525/97, Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics, 2000.

- AURREKOETXEA. et al. Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotatic polypropylene. **Journal of Material Science**, v. 36, 2607-2613, 2001a.
- AURREKOETXEA. et al. Fracture behavior of virgin and recycled isotatic polypropylene. **Journal of Material Science**, v. 36, 5073-5078, 2001b.
- AVILA, A.F. et al. A dual analysis for recycled particulate composites: linking micro- and macro-mechanics. **Materials Characterization**, Ed Elsevier, v. 50, p. 281-291, 2003.
- BAROULAKI, I. et al. Preparation and study of plastic compounds containing polyolefins and post used newspaper fibers. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Ed Elsevier, v. 37, n. 10, p. 1613-1625, 2006.
- BERTIN, S., ROBIN, J.J. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends. **European Polymer Journal**, v. 38, 2255-2264, 2002.
- BISIO, A.L., XANTHOS, M., How to Manage Plastics Waste: Technology and Market Opportunities. Munich: Hanser Publishers, 1994. 252p.
- BORGES, C., LANNES, V. Lixo urbano: um artigo de luxo no Brasil, **Banas Ambiental**, nº4, Ano 1, Fevereiro de 2000, Editora Banas.
- BRANDRUP, J., Recycling and Recovery of Plastics. Munich: Hanser Publishers, 1996. 893p.
- BRASIL, Constituição. Brasília: Senado Federal, 1988
- BRESLIN, V., SENTURK, U., BERNDT, C.C. Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction. **Resources Conservations & Recycling**, Ed Elsevier, v. 23, p. 243-258, 1998.
- CALDERONI, S. Os Bilhões Perdidos no Lixo. 4ª ed. São Paulo: Editora Humanitas, 2003.
- CARNEVAROLO JR., S. Ciência de Polímeros. São Paulo: Artliber Editora, 2004.
- CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA (CEFET). Análise qualitativa dos plásticos durante a queima, Porto Alegre: 2000.
- CHAABAN, M. Hazardous waste source reduction in materials and processing technologies. **Journal of Materials Processing Technology**, Egypt: Ed Elsevier, v. 119, p. 336-343, 2001.
- COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE Disponível em <<http://www.cempre.org.br>>, Acesso em julho de 2006.

- COSTA, H.M., RAMOS, V.D., ROCHA, M.C.G. Rheological properties of polypropylene during multiple extrusion. **Polymer Testing**, Ed Elsevier, v. 24, p. 86-93, 2005.
- COSTA, M. Resíduos Sólidos: Os caminhos para resolver o problema. **Banas Ambiental**, nº5, Ano 1, Abril de 2000, Editora Banas.
- CZVIKOVSKY, T., HARGITAI, H., RÁCZ, I., CSUKAT, G., Reactive compatibilization in polymer alloys, recyclates and composites. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Ed Elsevier, v. 151, p. 190-195, 1999.
- DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA, DMLU, Disponível em <<http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmlu>>, Acesso em março de 2002 e julho de 2006.
- DIMITROVA, T.L. On the compatibilization of PET/HDPE blends through a new class of copolyesters. **Polymer**, Ed Elsevier, v. 41, p. 4817-4824, 2000.
- DINATO, M. R., NASCIMENTO, L. F., OLIVEIRA, J. M., SILVA, M.M. O comportamento ambiental do consumidor de Porto Alegre, CEPA, UFRGS. Porto Alegre, 1999.
- DING, W., LIANG, J., ANDERSON, L., Thermal and catalytic degradation of high density polyethylene and commingled post-consumer plastic waste. *Fuel Processing Technology*, Ed Elsevier, v. 51, p. 47-62, 1997.
- DINTCHEVA, N.T. et al. Reprocessing and restabilization of greenhouse films. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 75, p. 459-464, 2002.
- EHRIG, R.J. *Plastics Recycling: Products and Processes*. Munich: Hanser Publishers, 1992. 289p.
- EPA - Environmental Protection Agency and the American Plastics Council, Evaluation of Recycled Plastics Lumber for Marine Applications, EPA/600/R-93/166, page 10, USA, September 1993.
- ESPÍNDOLA, L.C., WASSERMANN, A.I., CASTILHOS, A.F. et al, Análise dos efluentes gerados na reciclagem de plásticos misturados. III Simpósio Ambiental de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, 2002.
- FERRARA, G.; MELOY, T.P. Low dense separations media process: a new process for low density solid separation. **Powder Technology**, Ed Elsevier, v. 103, p. 151-155, 1999.
- FRIEDRICH, K. et al. Direct electron microscopic observation of transcrystalline layers in microfibrillar reinforced polymer-polymer composites. **Journal of Material Science**, v. 37, 4299-4305, 2002.

- GARFORTH, A.A., ALI, S., MARTINEZ, J.H., AKAH, A. Feedstock recycling of polymer wastes. **Current Opinion in Solid State & Materials Science**, Ed Elsevier, v. 8, p. 419-425, 2004.
- GRIPPI, S. LIXO, Reciclagem e sua História. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.
- GRISON, E.C.; HOINACKI, E. Identificação de Materiais Poliméricos. Porto Alegre: Fundação de Ciência e Tecnologia, 1985.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – Brasil 2002. Página na internet: www.ibge.gov.br. Acesso em 29/09/2003.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000, IBGE, Rio de Janeiro, 2002.
- IPIRANGA PETROQUÍMICA S.A. Caracterização Geral das Resinas Produzidas pela IPQ, Disponível em: <<http://www.ipq.com.br>>, Acesso em fevereiro de 2003.
- JANSSON, A., MOLLER, K., GEVERT, T. Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling – mechanical properties. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 82, p. 37-46, 2003.
- JAYARAMAN, K., BHATTACHARYYA, D. Mechanical performance of woodfibre-waste plastic composite materials. **Resources Conservations & Recycling**, Ed Elsevier, v. 41, p. 307-319, 2004.
- JED LYONS, S.J. Processing and properties of cryogenically milled post-consumer mixed plastics waste. **Polymer Testing**, Ed Elsevier, v. 24, p. 428-434, 2005.
- JOSE, S. et al. Phase morphology, crystallization behavior and mechanical properties of isotactic polypropylene/high density polyethylene blends. **European Polymer Journal**, v. 40, 2105-2115, 2004.
- KAMAL, M.R., LAI FOOK, R., DEMARQUETTE, N.R. Interfacial Tension in Polymer Melts. Part II: Effects of Temperature and Molecular Weight on Interfacial Tension. **Polymer Engineering and Science**, v. 34, n. 24, 1834-1839, 1994.
- KRUSE, T.M., LEVINE, S.E., WONG, H.W., DUOSS, E., LEBOVITZ, A.H., TORKEKELSON, J.M., BROADBELT, L.J. Binary Mixture pyrolysis of polypropylene and polystyrene: A modeling and experimental study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Ed Elsevier, v. 73, p. 342-354, 2005.
- LEE, J.K., HAN, C.D. Evolution of polymer blend morphology during compounding in an internal mixer. **Polymer**, v. 40, 6277-6296, 1998.

- LIXO, Disponível em <<http://www.lixo.com.br>>, Acesso em março de 2002.
- LOUIS, G., SHIH, J.S. A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. **Socio Economic Planning Sciences**, Ed Elsevier, doi: 10.1016, 2005.
- LOULTCHEVA, M.K., PROIETTO, M., JILOV, N., LA MANTIA, F.P. Recycling of high density polyethylene containers. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 57, p. 77-81, 1997.
- LUCENA, L.C. Lixo Eletrônico: as sobras da modernidade. **Banas Ambiental**, nº13, Ano 3, Editora Banas, Agosto de 2001.
- LUZURIAGA, S., KOVÁROVÁ, J., FORTELNÝ, I. Degradation of pre-aged polymers exposed to simulated recycling: Properties and thermal stability. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 91, p. 1226-1232, 2006.
- MANO, E. B. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1991.
- MANO, E., Bonelli, C, A reciclagem de plásticos pós-consumidos. **Química Industrial** nº 698, Editora Química de Revistas Técnicas Ltda., 1994.
- MARK, J.E. Polymer Data Handbook. USA: Oxford University Press, 1999.
- MARQUES, M. Tetra Pak investe em reciclagem, **Gerenciamento Ambiental**, nº 2, Ano 1, Junho/Julho de 1998.
- MARSHALL, R., KAMIYA, T. Recycling Plastics Waste. **Chemical Engineering**, August, 2003 p 19-20.
- MARTINS, M.H., DE PAOLI, M.A. Polypropylene compounding with recycled material: I. Statistical response surface analysis. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 71, p. 293-298, 2001.
- MARTINS, M.H., DE PAOLI, M.A. Polypropylene compounding with post-consumer material: II. Reprocessing. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 78, p. 491-495, 2002.
- MAYNE, N., FISCH, H. The use of eco-efficiency assessments to determine the optimum recovery options for different plastics waste streams. APME Association of Plastics Manufacturers in Europe. February, 2002. 8p.
- MIRANDA, C. Caderno de Resíduos: Problemas e soluções na coleta, transporte, tratamento e destinação final. **Gerenciamento Ambiental**, nº12, 2000, p 42-46.

- MUSTAFA, N. *Plastics Waste Management*. New York: Marcel Dekker, 1993. 97p.
- NIELSEN, L.E. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. v.2, New York: Marcel Dekker, 1974.
- PEACOCK, A.J. *Handbook of Polyethylene – Structure, Properties and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000. 534p.
- PEROU, A.L., VERGNAUD, J.M. Contaminant transfer during the coextrusion of thin three-layer food packages with a recycled polymer between two virgin polymer layers. **Journal of Polymer Engineering**, v. 17, n. 5, 349-361. Freund, 1997.
- PETROBRÁS, Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br>>, acesso em novembro de 2007.
- PINHEIRO, L.A., CHINELATTO, M.A., CANEVAROLO, S.V. The role of chain scission and chain branching in high-density polyethylene during thermo-mechanical degradation. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 86, p. 445-453, 2004.
- PINHEIRO, L.A., CHINELATTO, M.A., CANEVAROLO, S.V. Evaluation of Philips and Ziegler-Natta high-density polyethylene degradation during processing in an internal mixer using the chain scission and branching distribution function analysis. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 91, p. 2324-2332, 2006.
- PIVA, A.M., WIEBECK, H. *Reciclagem do Plásticos*. São Paulo: Artliber Editora, 2004.
- POCK, E., KISS, C., JANECSKA, A., EPACHER, E., PUKANSZKY, B. Effect of chain structure on the processing stability of high-density polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 85, p. 1015-1021, 2004.
- RAUWENDAAL, C. *Polymer Extrusion*. 3ª ed. Munich: Hanser Gardner, 1994.
- SAECHTLING, H., *International Plastic Handbook: for the Technologist, Engineer and User*. Munich, Vienna, New York: Hanser Publishers, 1995. 3ª ed. 644p.
- SAMMARCO, C., DELFINI, L. Mercado brasileiro tem potencial para ampliar a reciclagem de plásticos. **Plástico Industrial**, Março, 1999.
- SANTOS, A.S.F., AGNELLI, J.A.M., TREVISAN, D.W., MANRICH, S. Degradation and stabilization of polyolefins from municipal plastic waste during multiple extrusions under different reprocessing conditions. **Polymer Degradation and Stability**, Ed Elsevier, v. 77, p. 441-447, 2002.
- SINO RETO, M. A., *Tributação espreme o reciclador e breca a expansão do setor*. **Plástico Moderno**, nº 313, Setembro, 2000.

- SCOTT, J.A.N. The mechanical recycling of mixed plastics waste. APME – Association of Plastics Manufacturers in Europe. Brussels, 1994.
- SEBRAE, Fábrica de Plásticos Reciclados. Perfil de Oportunidades de Investimento. Programa para o Desenvolvimento de Pequenas e Médias Empresas de Transformação de Plásticos do Rio Grande do Sul, 1999.
- TOBIM, W.J. Troubleshooting Injection Molded Parts. WJT Associates Louisville, 1996
- UTRACKI, L.A. Polymer Alloys and Blends: Thermodynamics and Rheology. Hanser. Munich: p 23, 1989.
- VAN BELLEN, H. M., Desenvolvimento sustentável: Uma descrição das principais ferramentas de avaliação. *Ambiente & Sociedade*, Vol VII, p. 67-88, 2004.
- VAN NESS, et al.. Commingled Plastics. *Plastics Recycling: Products and Processes*, p. 195, 1992
- VASILE, C., Handbook of Polyolefins, Second Edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000. 1032p.
- VILLALBA, G., SEGARRA, M., FERNANDEZ, A.I., CHIMENOS, J.M., ESPIELL, F. A proposal for quantifying the recyclability of materials. **Resources Conservation & Recycling**, Spain: Ed Elsevier, v. 37, p. 39-53, 2002.
- ZANIN, M; MANCINI, S.D. Resíduos Plásticos e Reciclagem, São Carlos: EdUFSCar, 2004.
- WALENDZIEWSKI, J. Continuous flow cracking of waste plastics. **Fuel Processing Technology**, Ed Elsevier, v. 86, p. 1265-1278, 2005.
- WASSERMANN A.I.; ESPÍNDOLA L.C.; CASTILHOS A.F.; HOLZ N.; CARDOZO N.S.M. Recycling of commingled plastics - 1st Mercosur Congress on Chemical Engineering (ENPROMER 2001).
- WWF-Brasil, Disponível em: <<http://www.wwf.org.br>>, acesso em novembro de 2007.

Capítulo 7

Anexos

Neste capítulo são apresentados os resultados de forma mais abrangente, com os valores e as tabelas completas.

7.1 Resistência ao impacto Izod

Foram avaliadas as amostras submetidas à injeção (Processo I) e submetidos à extrusão seguida de injeção (Processo E-I). Os resultados destes testes são mostrados na Tabela 7.1 e 7.2.

Tabela 7.1: Resultados de Trabalho, em J das amostras dos Processos I e E-I

	Processo I		Processo E-I		
	Pêndulo 1J	Pêndulo 2,75J	Pêndulo 1J	Pêndulo 2,75J	Pêndulo 2,75J
	Trabalho, em J				
1	0,446	0,487	0,299	0,71	0,259
2	0,664	0,531	0,291	0,247	0,262
3	0,675	0,411	0,277	0,253	0,242
4	0,451	0,487	0,305	0,224	0,246
5	0,516	0,443	0,261	0,258	0,251
6	0,498	0,491	0,255	0,25	0,24
7	0,483	0,467	0,258	0,243	0,232
8	0,490	0,489	0,297	0,239	0,278
9	0,511	0,489	0,243	0,243	-
10	0,529	0,587	0,251	0,257	-
Média	0,526	0,488	0,274	0,292	0,251
Desvio	0,080	0,047	0,023	0,147	0,015

Tabela 7.2: Resultados de Impacto Izod

Processo	Pêndulo (J)	Trabalho (J)	Espessura (mm)	Izod 23°C (J/m)	Desvio (J/m)
E-I	1,00	0,274	3,25	84,3	7,0
	2,75	0,292	3,25	89,8	45,2
	2,75	0,251	3,26	77,0	4,5
I	1,00	0,526	3,27	160,9	24,5
	2,75	0,488	3,26	149,7	14,5

7.2 Resistência à tração

As Tabelas 7.3 e 7.4 apresentam respectivamente os resultados de resistência à tração dos corpos de prova das amostras dos Processos I e E-I. Foram avaliados: a tensão e o alongamento tanto no escoamento quanto na ruptura e o Módulo de Young.

Tabela 7.3: Resultados de resistência à tração das amostras do Processo I

	Escoamento		Ruptura		Módulo Young MPa	Tensão carga máxima MPa
	Tensão MPa	Alongamento %	Tensão MPa	Alongamento %		
1	21,5	16,3	12,4	60,8	1.436	21,5
2	21,1	13,2	17,8	24,2	1.351	21,1
3	21,1	13,5	17,5	26,9	3.682	21,1
4	-	-	18,0	4,2	3.617	18,1
5	21,5	13,1	19,2	21,8	2.002	21,5
6	21,4	13,7	19,0	25,4	2.082	21,4
7	21,7	13,7	18,1	32,3	1.818	21,7
8	19,9	8,1	17,2	9,0	2.542	19,9
9	20,4	10,2	18,0	14,9	1.484	20,4
10	20,8	10,9	16,4	14,5	1.167	20,8
Média	21,0	12,5	17,3	25,5	1.952	21,0
Desvio	0,59	2,41	2,02	15,06	778	0,59
CV (%)	2,79	19,23	11,70	59,00	39,86	2,79

O resultado apresentado pelo corpo-de-prova 4 foi excluído do cálculo de média, desvio padrão e CV.

Tabela 7.4: Resultados de resistência a tração das amostras do Processo E-I

	Escoamento		Ruptura		Módulo Young MPa	Tensão carga máxima MPa
	Tensão MPa	Alongamento %	Tensão MPa	Alongamento %		
1	21,6	4,6	21,2	5,1	5.970	21,6
2	23,0	7,6	22,1	11,2	11.093	23,0
3	23,1	7,6	22,6	9,5	11.898	23,1
4	22,7	6,0	22,5	6,7	3.982	22,7
5	22,6	6,3	22,1	7,3	5.939	22,6
6	-	-	20,8	3,4	3.577	20,8
7	22,8	7,4	22,1	9,3	10.987	22,8
8	-	-	18,2	1,9	5.169	18,3
9	22,2	5,7	21,9	6,8	6.309	22,2
10	20,9	3,6	20,8	3,9	5.271	20,9
Média	22,4	6,1	21,9	7,5	7.681	22,4
Desvio	0,76	1,46	0,62	2,41	3.110	0,76
CV (%)	3,41	23,92	2,82	32,30	40,48	3,41

Os resultados apresentados pelos corpos-de-prova 6 e 8 foram excluídos do cálculo de média, desvio padrão e CV.

7.3 Resistência à flexão

As Tabelas 7.5 e 7.6 apresentam respectivamente os valores de resistência à flexão das amostras dos Processo I e E-I.

Tabela 7.5: Resultados de resistência a flexão das amostras do Processo I

	Tensão	Deformação	Deformação	Módulo
	5% MPa	5 MPa %	10 MPa %	Tangente 1% MPa
1	24,0	0,558	1,228	939
2	24,2	0,563	1,219	951
3	23,9	0,571	1,236	909
4	23,3	0,601	1,307	894
5	24,1	0,548	1,211	959
6	24,1	0,560	1,227	958
7	23,9	0,567	1,242	1.012
8	23,7	0,586	1,272	899
9	24,0	0,552	1,219	1.058
10	23,7	0,558	1,228	982
Média	23,9	0,566	1,239	956
Desvio	0,26	0,016	0,029	51
CV (%)	1,11	2,85	2,36	5,38

Tabela 7.6: Resultados de resistência a flexão das amostras do Processo E-I

	Tensão 5% MPa	Deformação 5 MPa %	Deformação 10 MPa %	Módulo Tangente 1% MPa
1	31,1	0,450	0,923	1.147
2	31,2	0,432	0,904	1.194
3	31,1	0,447	0,921	1.168
4	31,3	0,446	0,930	1.146
5	31,2	0,472	0,963	1.082
6	31,4	0,451	0,936	1.140
7	31,4	0,436	0,909	1.226
8	31,3	0,450	0,928	1.138
9	30,6	0,460	0,954	1.108
10	30,8	0,453	0,947	1.134
Média	31,1	0,450	0,932	1.148
Desvio	0,26	0,011	0,019	40,7
CV (%)	0,83	2,50	2,03	3,55