

BRUNO CÉSAR FLORES

**RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PROVENIENTES DOS
PROCESSOS DE INJEÇÃO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá
2012

Flores, Bruno César

F634r Recuperação de resíduos plásticos provenientes dos processos de injeção/ Bruno César Flores – Guaratinguetá : [s.n], 2012.

74 f : il.

Bibliografia: f. 73-74

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Polipropileno I. Título

CDU 678.742.5



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PROVENIENTES DOS PROCESSOS
DE INJEÇÃO

BRUNO CÉSAR FLORES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Antonio Wagner Forti
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
UNESP-FEG

Eng. Cristina Sayuri Fukugauchi
UNESP/FEG

Setembro de 2012

DADOS CURRICULARES

BRUNO CÉSAR FLORES

NASCIMENTO	09.01.1983 – Botucatu - SP
FILIAÇÃO	Wilson José Flores Ruth Castanheira Flores
2003/2012	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

Dedicatória

de modo especial, aos meus pais, Wilson e Ruth, que com muito esforço me mantiveram durante meus estudos e sempre foram a grande motivação para que eu me superasse a cada dia, e aos meus amigos, que me apoiaram nos momentos difíceis e de indecisão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus que com sua sabedoria nos deu o dom do conhecimento e da busca incessante por respostas à nossas curiosidades. Agradeço a Ele pela oportunidade de realizar minha formação nesta Escola e por ter me dado calma, tranquilidade e inteligência nos momentos mais difíceis.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira* que me deu força e me incentivou na hora que precisava de apoio. Sem a sua orientação, auxílio, paciência e análise crítica este estudo não teria sido realizado.

aos meus pais *Wilson e Ruth*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

aos meus chefes *Bruno Iacuzio e Fabio Mello* que sempre acreditaram em meu trabalho e me ajudaram a desenvolver meus conhecimentos e, com isso, crescer profissionalmente.

aos engenheiros da qualidade *Hugo Urbano, Rodrigo Bernardo e Edson Nolasco* que me ajudaram a realizar este estudo, pois, sem a determinação e empenho deles não teria conseguido concluir este trabalho.

aos meus amigos que estão sempre ao meu lado nos momentos de felicidade e tristeza.

aos meus irmãos, em especial minha irmã *Daniela Flores* que sempre apostou em mim e que vibra com minhas conquistas e realizações.

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

Albert Einstein

FLORES, B. C. **Recuperação de resíduos plásticos provenientes dos processos de injeção**. 2012. 77 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

Resumo

A competitividade entre mercados globalizados, a necessidade constante por redução dos custos de fabricação e, ainda, o crescente engajamento ambiental, vêm estimulando o desenvolvimento de técnicas para o reprocessamento de resíduos gerados nos processos industriais. Dentre as variadas áreas produtivas de uma empresa, destacam-se àquelas que envolvem a transformação de matérias-primas derivadas do petróleo, como os polímeros (resinas), que podem levar séculos para se decompor no meio ambiente e, ainda, se apresentam como um ponto econômico e ambientalmente estratégico. Dessa forma, este trabalho estudou a recuperação de resíduos de polipropileno, provenientes dos processos de injeção de uma grande multinacional do ramo de eletrodomésticos, através da “reciclagem” por um processo composto pela moagem, extrusão e picagem deste material residual. De fácil implantação, esta proposta visou reduzir a níveis ínfimos o descarte (sucateamento) destes resíduos, bem como a reintegração destes no processo produtivo em peças não visuais e sem importância estrutural, visando a redução dos custos e a diminuição dos impactos ambientais provocados. Após o levantamento de dados, em quilogramas de material residual gerado num determinado espaço de tempo, e o estudo das alterações de propriedades do material, se viabilizou a reutilização de forma constante no processo de injeção.

Palavras-chave: Recuperação de resíduos, Reciclagem de polipropileno, Polipropileno, Injeção de polímeros, Reciclagem de polímeros.

FLORES, B. C. **Recovery residual plastic from injection processes.** 2012. 77 f. Graduation Paper (Graduation in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The competitiveness among global markets, the constant need for reducing manufacturing costs and also the growing environmental commitments are fueling the development of techniques for recovery residual parts generated by industrial processes. Among the various areas of a company, we highlight those that involve the processing of raw materials derived from oil, such as polymers (resins), which may take centuries to decompose in the environment and also present as a economic and environmentally strategic point. Thus, this study would examine the recovery of waste polypropylene, from the injection process of a major multinational in the field of home appliances through the "recycling" by a process comprising the milling, extrusion and chipping of waste material. Easy to deploy, this proposal aims to reduce levels negligible disposal (scrap) of these residues as well as the reintegration of the production process into pieces no visual and no structural importance, aimed at cutting costs and reducing environmental impacts caused. After the survey data in kilograms of waste material generated in a given period of time, and the study of changes in material properties, it would enable the reuse steadily in the injection process.

KEYWORDS: *Recovery residual parts, Polypropylene Recycling, Polypropylene, Polymers Injection, Polymers .*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Seqüência de etapas de um ciclo de injeção	19
FIGURA 2 – Principais componentes de uma máquina injetora hidráulica	20
FIGURA 3 – Representação da unidade de injeção de uma injetora	21
FIGURA 4 – Representação esquemática de um parafuso de injeção com as zonas de trabalho	22
FIGURA 5 – Sistema de fechamento com 5 articulações	24
FIGURA 6 – Sistema de travamento por 3 pontos	25
FIGURA 7 – Sistemas de fechamento hidráulico	26
FIGURA 8 – Exemplo de reação de obtenção de um polímero de adição	27
FIGURA 9 – Exemplo de reação de obtenção de um polímero de condensação	28
FIGURA 10 – Polimerização do polipropileno	29
FIGURA 11 – Exemplo de reação de polimerização do tipo	30
FIGURA 12 – Representação das diferentes configurações da cadeia do polipropileno.....	31
FIGURA 13 – Representação espacial das cadeias do polipropileno	32
FIGURA 14 – Esferulito do polipropileno	33
FIGURA 15 – Comparativo dos custos por volume de diferentes polímeros	35
FIGURA 16 – Exemplos de perfis extrudados.....	36
FIGURA 17 – Principais componentes de uma extrusora	37
FIGURA 18 – A zonas das roscas de extrusão	37
FIGURA 19 – Principais elementos de uma rosca de três zonas	39
FIGURA 20 – Diferentes tipos de roscas disponíveis comercialmente para extrusão	40
FIGURA 21 – Elementos mistura/cisalhamento mais comumente encontrados	40
FIGURA 22 – Exemplo de rosca utilizada na extrusão do polipropileno.....	41
FIGURA 23 – Granulador a frio utilizado nos processos de peletização.....	42
FIGURA 24 – Corte transversal de um moinho de facas evidenciando seu rotor radial de martelos e sua carcaça	42
FIGURA 25 – Material contaminado por outro tipo de material e impurezas do ambiente	43
FIGURA 26 – Peça não preenchida totalmente, resultante de início de processo	44
FIGURA 27 – Esquema de galho de injeção com suas partes	45
FIGURA 28 – Exemplo de galho de injeção	45
FIGURA 29 – Borrás de limpeza de canhão de injeção	46

FIGURA 30 – Geração de material residual semanal	47
FIGURA 31 – Instalação da central de recuperação de polímeros	50
FIGURA 32 – Dimensões do corpo de prova para ensaios de tração	52
FIGURA 33 – Dispositivo para ensaio de tração	53
FIGURA 34 – Dispositivo pendular para ensaios de impacto utilizado no ensaio	54
FIGURA 35 – Corpo de Prova dos ensaios Charpy	54
FIGURA 36 – Variabilidade dos resultados obtidos	56
FIGURA 37 – Gráfico \bar{X} , mostra a média das resistências à Tração dos corpos de prova ensaiados.....	58
FIGURA 38 – Distribuição dos resultados obtidos dos ensaios para deformação máxima	59
FIGURA 39 – Gráfico da variabilidade para a Força Máxima	63
FIGURA 40 – Gráfico da média para a Força Máxima	63
FIGURA 41 – Variabilidade dos dados para o Ensaio de Impacto	65
FIGURA 42 – Variabilidade dos dados para o Ensaio de Impacto, analisando a Deformação até Ruptura	67
FIGURA 43 – Média dos resultados obtidos no ensaio de impacto	68
FIGURA 44 – Média dos resultados obtidos no ensaio de impacto, para deformação até ruptura	68
FIGURA 45 – Máquina injetora utilizada no teste de injeção	70
FIGURA 46 – Cotas críticas analisadas no ensaio dimensional	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparação dos diferentes tipos de polipropileno comerciais	30
TABELA 2 – Propriedades gerais do polipropileno	33
TABELA 3 – Temperaturas de trabalho na extrusão e suas aplicações	38
TABELA 4 – Geração de material residual e o montante acumulado em três meses	47
TABELA 5 – Estratégia de amostragem	55
TABELA 6 – Matérias-prima utilizadas com seus índices e as características que serão ensaiadas	56
TABELA 7 – Dados obtidos no ensaio de tração	57
TABELA 8 – Resultados finais do ensaio de tração	59
TABELA 9 – Resultados obtidos nos ensaios de tração quanto à deformação máxima nos corpos de prova	60
TABELA 10 – Resultado final do Estudo da Deformação Máxima	61
TABELA 11 – Resultados obtidos nos ensaios de tração quanto à força máxima	62
TABELA 12 – Resultado final do Estado da Força Máxima até Ruptura	64
TABELA 13 – Dados obtidos no Ensaio de Impacto, analisando a força de ruptura ao impacto e a deformação provocada	66
TABELA 14 – Resultados finais do Ensaio de Impacto, considerando Força de Ruptura	69
TABELA 15 – Resultados finais do Ensaio de Impacto, considerando Deformação de Ruptura	69
TABELA 16 – Principais características da Máquina Injetora utilizada	70
TABELA 17 – Resultados da análise dimensional	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	- "American Society for Testing and Materials"; Sociedade Americana de Testes e Materiais
CD	- Compact Disc; Disco compacto
CH ₃	- Radical Metila, composto por um átomo de carbono e três de hidrogênio
DVD	- Digital Video Disc; Disco de video digital
PC	- Policarbonato
PE	- Polietileno
PP	- Polipropileno
PP CP	- Polipropileno Copolímero
PP H	- Polipropileno Homopolímero
PS	- Poliestireno
PVC	- Policloreto de Vinila
TiCl ₄	- Cloreto de Titânio

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro	<i>Mm</i>
d	Densidade	<i>g/cm³</i>
L	Comprimento	<i>Mm</i>
T _a	Temperatura de Amolecimento	<i>°C</i>
T _f	Temperatura de Fusão	<i>°C</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O Processo de Injeção	18
2.1.1 As Máquinas Injetoras	20
2.1.2 Unidade de Injeção	21
2.1.2.1 Parafuso de Injeção.....	22
2.1.3 Unidade de Fechamento	22
2.1.4 Os Moldes	26
2.2 O Polipropileno e Suas Propriedades	27
2.2.1 Mecanismo de Reação	29
2.2.2 Estrutura do Polipropileno.....	31
2.2.3 Propriedades Mecânicas e Reológicas do Polipropileno.....	33
2.2.3.1 Dispersão de Pesos Moleculares	33
2.2.3.2 Viscosidade.....	34
2.2.3.3 Cristalinidade.....	34
2.2.3.4 Compostos e Misturas	34
2.2.4 Aspectos Comerciais	34
2.3 Processos de Extrusão	36
2.3.1 Parafuso ou Rosca	38
2.3.2 Roscas para Polipropileno	40
2.4 Processos de Reprocessamento de Termoplásticos.....	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Estudo de Caso	43
3.2 Apresentação dos Dados.....	47
3.3 Implantação da Central de Recuperação de Polímeros	48
3.4 Estudo da Utilização do Material Reciclado	50
3.5 Metodologia de Ensaio	52
3.5.1 Ensaio de Tração	52
3.5.2 Ensaio de Impacto	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Resistência à Tração	56
4.2 Deformação Máxima	59
4.3 Força Máxima de Ruptura	61
4.4 Resistência ao Impacto	64
4.5 Teste de Injeção	69
5 CONCLUSÃO	72
6 REFERÊNCIAS	73

GLOSSÁRIO

Bags. Embalagem de matéria-prima, comumente utilizada para polímeros. Em geral, esses sacos têm de 700kg a 1000kg.

Borra. Massa polimérica resultante da limpeza do canhão de injeção das injetoras. Se dá pelo afastamento do canhão quando aciona-se a dosagem e posterior injeção do material, ejetando a massa derretida no vazio.

Pay-back. Expressão em inglês para *Amortização*, isto é, o tempo que levará para o investimento realizado apresentar retorno financeiro.

Try-out. Expressão em inglês para *Teste, Experiência*. É no try-out que se testa características dimensionais da peça, parâmetros de injeção, comportamento do material, entre outros.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a busca pela redução de custos e de peso e, ainda, a melhoria da estética dos produtos, principalmente nas áreas automobilística, de eletrodomésticos e utensílios domésticos em geral, gera uma demanda crescente pela injeção de polímeros.

Os processos de injeção são caracterizados por sua elevada produtividade e por excelente acabamento, reduzindo os custos de fabricação e aumentando a qualidade e confiabilidade das peças fabricadas.

O polipropileno (PP) é a terceira resina mais utilizada em todo o mundo, ficando atrás apenas do polietileno (PE) e do policloreto de vinila (PVC), estando entre os polímeros mais processados por injeção. Os fatores que dão esse status ao polipropileno são as relativamente baixas temperaturas de trabalho, baixa propensão à contaminação e umidade, baixo custo da resina, entre outros fatores.

É prática comum nas indústrias automobilística e de eletrodomésticos a utilização de determinadas porcentagens de material reciclado misturado ao virgem. Esta porcentagem de mistura é função da aceitabilidade dos clientes, não estando vinculadas eventuais interferências nas propriedades mecânicas e reológicas do material.

Neste trabalho, foi analisada uma proporção virgem/reciclado tal que equilibrasse a relação geração/consumo do reciclado, utilizando uma média semanal de geração, buscando a eliminação de estoques e a utilização permanente e racional deste material. Para isso, foi proposto a utilização da mistura nos *tanques* de lavadoras de roupas e, ainda, em peças não visuais e não estruturais, uma vez que as peças injetadas com reciclado apresentam pintas de contaminação e alterações em suas propriedades físico-químicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Processo de Injeção

A injeção é o principal processo de fabricação de peças plásticas, por apresentar elevadíssima produção, excelente acabamento – em geral, em bons moldes a peça é extraída da injetora já acabada – além de possibilitar a fabricação de peças dos mais variados pesos e geometrias.

Os processos de injeção possuem diversas técnicas, cuja as mais utilizadas são a injeção convencional, tratada neste estudo, a injeção a água, a injeção a gás, microinjeção e nanoinjeção, injeção por compressão, injeção de espumas, injeção rápida, entre outras.

O processo de moldagem por injeção é considerado um processo rápido, em razão de que o tempo total de ciclo de injeção gira em torno de 10 a 20 segundos para peças pequenas e até dois minutos para peças grandes.

Os ciclos dos processos de injeção são compostos das seguintes etapas, segundo Harada (1991):

- 1) Fechamento do molde;
- 2) Avanço do conjunto injetor;
- 3) Injeção do polímero;
- 4) Recalque ou compactação (início do resfriamento);
- 5) Dosagem;
- 6) Descompressão;
- 7) Recuo do conjunto injetor;
- 8) Abertura do molde;
- 9) Extração da peça.

Quando o parafuso gira, o material sólido proveniente do funil é arrastado contra a parede interna do cilindro de aquecimento. Assim, a força de atrito criada aquece e empurra o material pelo canal, em direção à ponta do parafuso. Com o aquecimento por atrito e o calor proveniente das resistências elétricas que envolvem a parede externa do cilindro, aos poucos o material é plastificado, até que, próximo à ponta do parafuso, não resta mais nenhuma partícula sólida.

Como o bico de injeção deve estar encostado no molde fechado e preenchido ou então fechado por uma válvula, o material plastificado não consegue sair do cilindro, e acumula-se à frente do parafuso. A pressão do material empurra o parafuso para trás, até que atinja uma

posição pré-determinada pelo operador. Segundo Manrich (2005) nesse ponto, o parafuso pára de girar e termina o processo de plastificação. A massa de material plastificado, que fica dosada entre o bico de injeção e a ponta do parafuso deve ser suficiente para preencher totalmente a cavidade e o canal de alimentação do molde.

Uma vez dosado, o material deve ser injetado, ou seja, transportado para a cavidade do molde fechado. O parafuso avança, como se fosse o êmbolo de uma seringa, criando a pressão necessária para que o material consiga passar pelo canal do bico de injeção, canal de alimentação do molde e ponto de entrada da cavidade e preencher a cavidade. Como as paredes do molde possuem canais para circulação de água ou óleo, gradualmente a peça moldada e o material que fica no canal de injeção são resfriados. Após o preenchimento, ocorre o recalque: o parafuso é mantido avançado até que o ponto de entrada do material na cavidade seja solidificado. O resfriamento da peça injetada prossegue, e aos poucos a cavidade e o canal de alimentação solidificam-se por completo.

Michaeli ET AL (1995) diz que durante o resfriamento o parafuso está ocioso e a prensa está fechada, a máquina pode aproveitar esse tempo para plastificar e dosar o material que será injetado no ciclo seguinte. Uma vez solidificada e resfriada até uma temperatura em que não seja mais deformada tão facilmente, a peça está pronta para ser extraída. Realiza-se, então, o ciclo seco, que consiste das etapas de abertura do molde, extração (desgrudar a peça do molde) e fechamento.

Terminado o ciclo, o material dosado é injetado, repetindo-se o ciclo até que a produção desejada seja atingida (Figura 1).

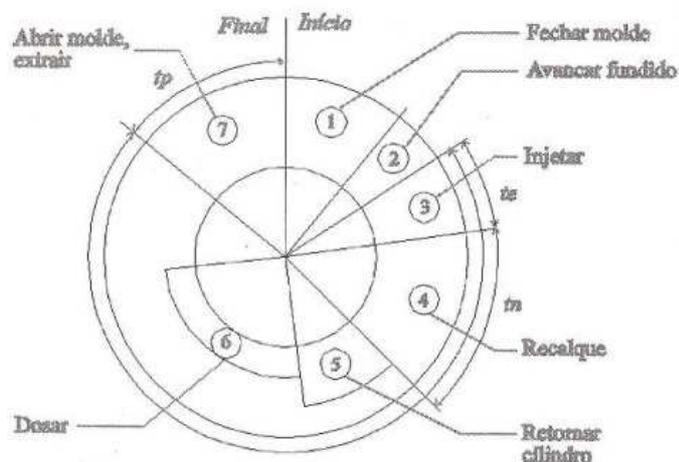


Figura 1 - Seqüência de etapas de um ciclo de injeção. (Michaeli et al, 1995)

2.1.1 As Máquinas Injetoras

Existem diversas configurações de máquinas injetoras no mercado. As máquinas horizontais de moldagem por injeção são as mais difundidas, mas encontramos muitas máquinas de estrutura vertical, outras com a unidade de fechamento do molde na horizontal e o grupo injetor disposto verticalmente ou vice e versa.

Conforme Michaeli et al (1995) cita, as configurações existentes de injetoras são:

- a) **Injetora horizontal:** esta é a configuração mais utilizada. As unidades de injeção e fechamento são horizontais e em linha, para que a injeção do material seja efetuada por um canal perpendicular ao plano de separação do molde, e não mais pela superfície de fechamento, quando se usa uma prensa vertical.
- b) **Injetora vertical:** utilizada para moldagem com insertos metálicos. A injeção do material é efetuada verticalmente para baixo, perpendicular ao plano de separação do molde.
- c) **Injetora a 90 graus:** tanto a unidade de fechamento quanto a de injeção são horizontais, porém, em posição angular, uma à outra.
- d) **Injetora em tandem:** a máquina possui uma unidade de injeção lateral à unidade de fechamento, na qual são fixados dois moldes. A unidade de injeção alimenta os dois moldes ao mesmo tempo, duplicando a produção.

Os principais elementos de uma injetora horizontal são mostrados na Figura 2.

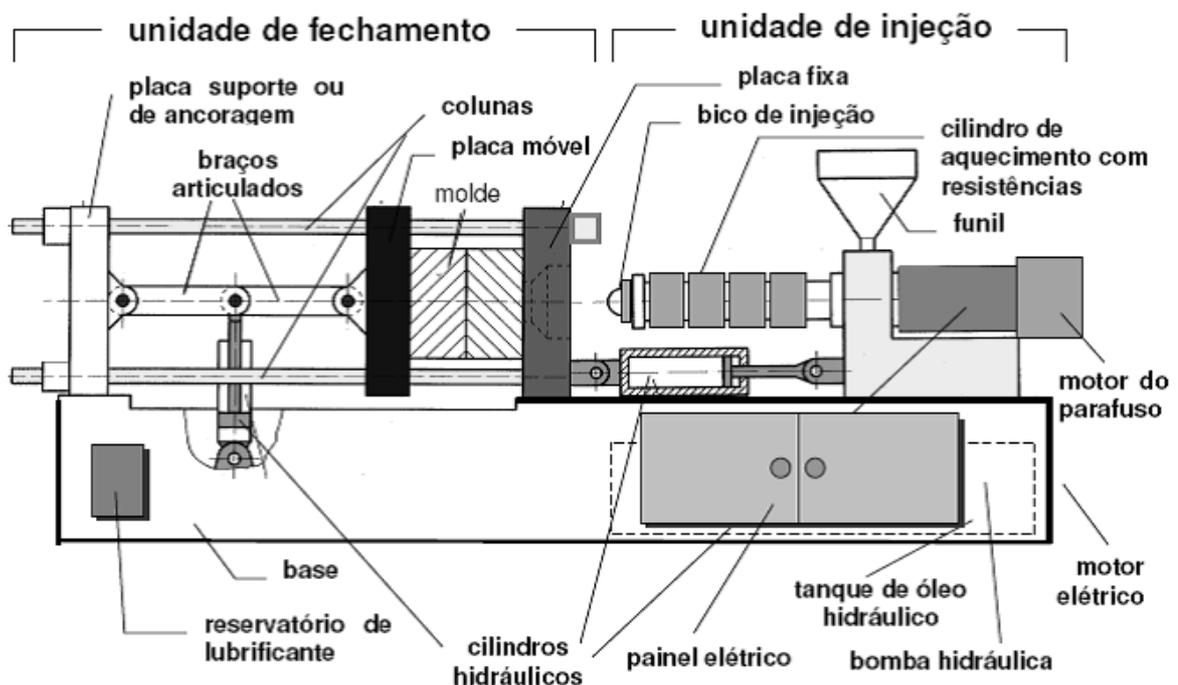


Figura 2 - Principais componentes de uma máquina injetora hidráulica. (Harada, 1991)

2.1.2 – Unidade de Injeção:

É composto de um cilindro aquecido por resistências elétricas ou, em raros casos, por vapor superaquecido, onde internamente funciona uma rosca, denominada *rosca de injeção*, que possui o mesmo princípio de funcionamento da *rosca de Arquimedes*, com a função de homogeneizar o material polimérico fundido e injetá-lo nas cavidades do molde (Figura 3). Ao término desta operação, é aplicada uma pressão a fim de compactar o material à cavidade do molde.

Para Michaeli et al (1995), a unidade de injeção é composta por:

- a) **Funil de alimentação:** serve como depósito de material granulado para ser processado e deve ser mantido tampado para evitar contaminação.
- b) **Cilindro de aquecimento:** suporte metálico para resistências e invólucro da rosca de injeção.
- c) **Resistências elétricas:** responsáveis pelo aquecimento do cilindro de injeção e conseqüente fusão do material polimérico.
- d) **Bico de injeção:** elemento que permite a passagem de material plástico do cilindro de aquecimento para o molde.
- e) **Bloqueio de passagem de material granulado:** impede ou libera a passagem do material granulado para dentro do cilindro de aquecimento.
- f) **Motor hidráulico:** movimenta a rosca para transportar o material para dentro do cilindro no instante da dosagem, fazendo com que ocorra a plastificação e a homogeneização do material.

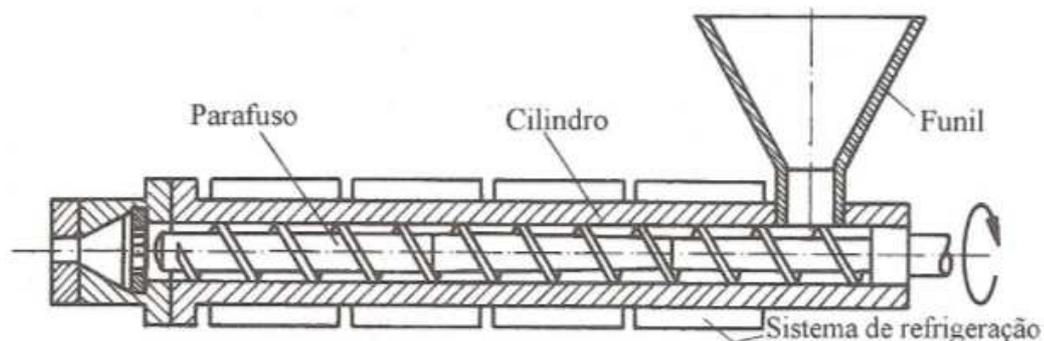


Figura 3 – Representação da unidade de injeção de uma injetora. (Michaeli et al, 1995)

2.1.2.1 Parafuso de Injeção:

São muito semelhantes e possuem as mesmas funções que os fusos empregados no processo de extrusão. Porém, além do movimento de rotação, os parafusos de máquinas-injetoras devem possuir também um movimento de translação (na direção do seu eixo), atuando e avançando como um pistão para transportar o material já plastificado e dosado para

o molde. O fuso deve poder recuar para efetuar a dosagem do material, à medida que o material plastificado se deposita à sua frente, sem passar pelo bico de injeção. Um elemento dosador estabelece o curso de recuo do parafuso em função do volume de material necessário para a moldagem.

Devido à relação L/D , sendo L o comprimento do canhão e D seu diâmetro, afetar as características de plastificação, estes valores devem ser dimensionados a fim de se obter uma velocidade de plastificação adequada ao tamanho e à capacidade de produção da máquina. Também as dimensões do fuso especificam a capacidade de plastificação de máquina. Já a capacidade de injeção está diretamente ligada com o seu diâmetro e seu curso, pois o volume deslocado pelo fuso é igual ao volume de material plástico a ser injetado em um ciclo. Para Michaeli et al (1995) a relação L/D recomendada é de 16 a 24:1 enquanto que a razão de compressão de 3:1 a 4:1. Os parafusos projetados para a moldagem das resinas semicristalinas, devem providenciar suprimento de calor maior que o exigido para resinas amorfas, isto se explica por precisarmos de uma maior energia para conseguir destruir a estrutura cristalina e atingirmos uma temperatura de fluxo adequada ao processamento.

A qualidade do material plastificado pode por vezes ser avaliada, fazendo-se “injetadas” de purgação com mesma massa da injetada real do ciclo de produção. As partículas não fundidas, ou a irregularidade de fluxo causadas por tais partículas, são visíveis com frequência no fluxo em plastificação que sai do bico, principalmente no final da injetada.

A Figura 4 mostra um rosca de injeção utilizada pela fabricante brasileira de máquinas injetoras ROMI.



Figura 4 – Representação esquemática de um parafuso de injeção com as zonas de trabalho. (Catálogo ROMI, 2010)

2.1.3 Unidade de Fechamento

A unidade de fechamento é responsável por prender as partes do molde, remover os movimentos de abertura e fechamento do molde, dando-lhe as posições de fechado e travamento do molde no momento da injeção e, ainda, pela extração da peça.

Para Michaeli et al (1995) esta parte da máquina se assemelha a uma prensa, sendo composta, basicamente, por uma placa fixa, uma placa móvel, colunas, placa de extração, placa suporte e sistema de travamento (ou fechamento).

As funções deste conjunto são:

- fixar cada uma das metades do molde;
- promover os movimentos de abertura e fechamento do molde;
- manter o molde o molde fechado e travado no momento da injeção;
- ajustar a máquina para trabalhar com moldes de diferentes alturas;
- acionar a extração da peça moldada;

As placas fixa e móvel possuem furos e ranhuras para permitir a fixação das placas do molde. As unidades de fechamento mais utilizadas são as **hidráulicas** e as **hidráulico-mecânicas** (ou de joelhos).

Hidráulico-mecânicas:

Neste tipo de unidade, braços (barras) articulados ligam a placa móvel à placa suporte. Um ou dois cilindros hidráulicos, presos à placa suporte, atuam as barras articuladas, movimentando a placa móvel, para abrir ou fechar o molde. A este conjunto de braços e articulações dá-se o nome de braçagem.

Com a máquina devidamente regulada para a altura do molde em trabalho, quando as faces do molde se encostam a braçagem ainda não está completamente estendida. O cilindro hidráulico do fechamento precisa acionar as barras articuladas com uma pressão também alta para empurrar a placa móvel para frente, comprimindo o molde, e a placa suporte para trás, estirando as colunas da máquina, realizando o travamento do molde. A alta pressão da massa plástica sendo injetada no interior das cavidades gera uma força no sentido da abertura da placa móvel. Porém, a força de reação das colunas estiradas mantém a posição da placa móvel, ou seja, o molde fechado.

Após o travamento do molde, não haverá variação nesta força de fechamento, porque passa a existir uma força mecânica exercida nas juntas (pontos, articulações) que é suficiente para suportar a ação da pressão de injeção, sem que haja deslocamento da placa móvel para trás. O operador da máquina deve, portanto, programar uma força de fechamento suficiente para que a placa móvel não recue e abra o molde, pois isto ocasionaria o aparecimento de rebarbas na peça moldada.

Para regular a força de fechamento, move-se a placa suporte na direção da placa móvel, estendendo mais ou menos os braços articulados, ainda com o molde aberto. A força de fechamento será maior quanto mais recolhidas estiverem as barras, ou seja, quanto mais se avançar a placa suporte. Uma vez que cada molde possui uma altura diferente, é necessário ajustar a máquina a cada troca de molde, o que também se consegue através do movimento da placa suporte.

Michaeli et al (1995) diz que o número de articulações (pontos, juntas, joelhos) é variável de máquina para máquina, segundo a configuração adotada. As máquinas mais antigas utilizavam sistemas de fechamento de três pontos. As mais modernas, por sua vez, utilizam quatro ou cinco juntas entre seus braços articulados, pois, quanto maior o número de pontos, maior pode ser o curso da placa móvel sem que o comprimento da máquina aumente.

Junto à placa móvel, uma placa de extração (ou ejeção), acionada por outros cilindros hidráulicos, possibilita um curso para o sistema de extração do molde (independentemente do movimento da placa móvel). As Figuras 5 e 6 ilustram esse tipo de fechamento.

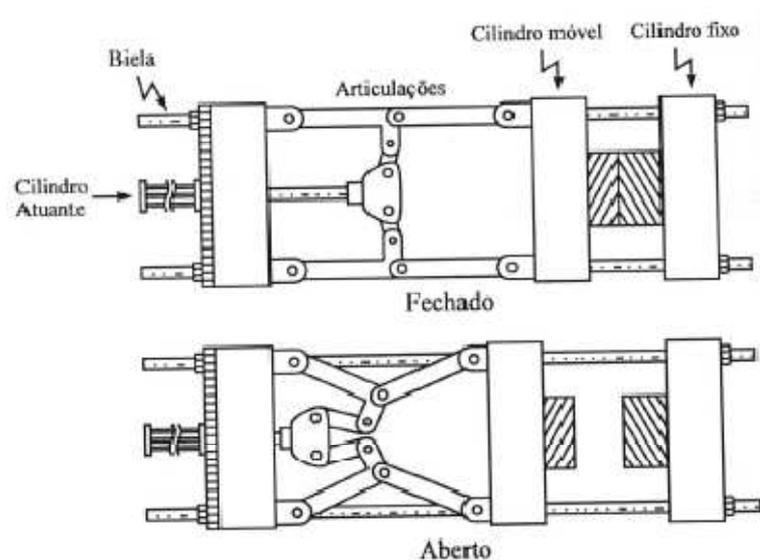


Figura 5 – Sistema de fechamento com 5 articulações aberto e fechado (Michaeli et al, 1995).

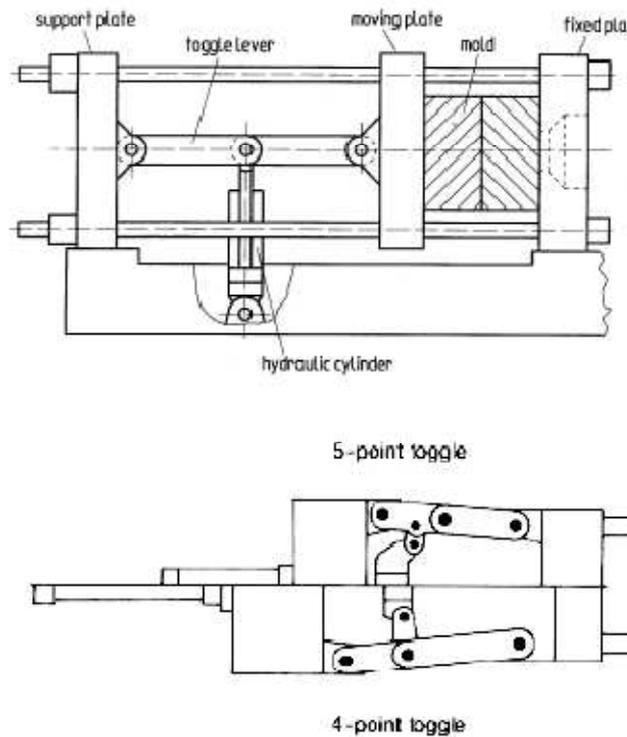


Figura 6 - Sistema de travamento por 3 pontos; em baixo, a comparação entre os sistemas de 4 e 5 pontos, mostrando que a máquina com 5 pontos pode ter o mesmo curso que a de 4 pontos, mas com um comprimento menor (Michaeli et al, 1995).

Unidade de fechamento hidráulica:

Neste tipo de unidade não há barras articuladas, sendo o cilindro hidráulico responsável pelo movimento da placa móvel, pelo travamento e pela manutenção da força de fechamento durante a injeção. Muitas máquinas deste tipo usam um ou mais cilindros menores e por isso mais rápidos, apenas para os movimentos de abertura e fechamento, enquanto um cilindro central maior (de maior pressão) proporciona o travamento, conforme Figura 7.

Dependendo da máquina, a ajustagem da altura do molde é feita por placas espaçadoras montadas na placa móvel (junto ao molde) ou pelo deslocamento da posição inicial do pistão do cilindro hidráulico.

As diferenças entre o fechamento hidráulico e o fechamento com barras articuladas são:

- o maior custo de energia elétrica, pois o motor elétrico trabalha mais para que a bomba hidráulica comprima todo o óleo necessário para preencher o cilindro hidráulico, que é muito grande;

- no sistema hidráulico, a pressão no cilindro deve ser maior do que a pressão na cavidade durante a injeção; no sistema hidráulico-mecânico, o cilindro hidráulico pode ser menor (e mais barato, portanto), pois a braçagem age como um multiplicador da pressão hidráulica;
- em sistemas puramente hidráulicos a força de fechamento pode ser ajustada de forma mais precisa, evitando deformações exageradas do molde (por compressão de uma placa contra outra) quando o mesmo dilata após um determinado número de ciclos;
- a menor rigidez do sistema de fechamento, devido à compressibilidade do óleo;
- a maior velocidade de fechamento/abertura;
- o controle mais preciso da velocidade do movimento da placa móvel.

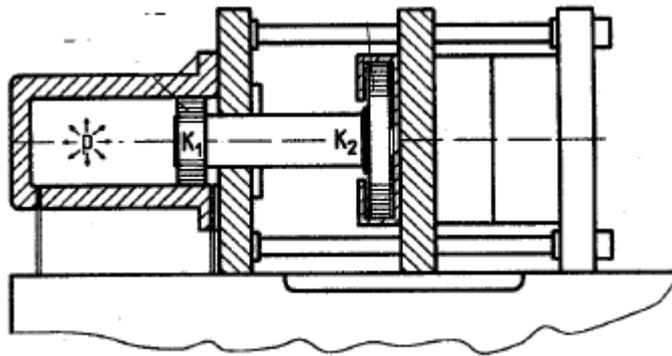


Figura 7 - Sistemas de fechamento hidráulico. (Michaeli et al, 1995)

2.1.4 Os Moldes

Molde é a estrutura que dá forma à peça que se deseja injetar. É, talvez, a parte mais complexa de se projetar e fabricar de todo o processo de injeção, por sua complexidade geométrica, estrutural – exigindo canais internos para o escoamento da matéria prima e de fluidos refrigerantes, e, ainda, pela necessidade de se ter uma superfície extremamente polida, o que proporciona um excelente acabamento superficial.

Harada (1991) divide os molde em duas categorias: moldes convencionais e moldes com câmara quente.

- **Moldes Convencionais:** existem dois tipos principais de moldes dessa categoria; os moldes de duas placas, onde uma de suas metades é fixada junto à parte fixa da injetora e, a outra metade, é fixada à parte móvel da máquina, sendo esta responsável pela ejeção das peças – é nela que se encontra o extrator. Já os moldes de três placas possuem, além das duas como o anterior, uma terceira placa intermediária, que

proporciona a separação da peça de seu canal de injeção – chamado, popularmente, de galho.

- Moldes com Câmara Quente: nestes moldes não existe o galho pois possuem canais que são aquecidos por resistências elétricas internas ao molde, alimentadas por um *controlador de temperatura*, externo à injetora, que fazem com que o material permaneça sempre fundido, na temperatura certa para a injeção seguinte. Estes moldes contribuem para uma elevada produção, altíssima qualidade e, ainda, com economia de matéria-prima, uma vez que os galhos se tornam uma perda inerente ao processo.

2.2 O Polipropileno e Suas Propriedades

A palavra *polímero* é originária da junção de duas palavras do grego: *poli* (muitos) e *meros* (partes); portanto, significa que os polímeros são formados por muitas partes. Essas partes são chamadas de monômeros, que se ligam entre si por meio de ligações covalentes, do tipo C-C. Essa reação é denominada *polimerização*.

Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais mais notáveis são a celulose e o látex, originários de plantas, a caseína, proveniente do leite e, ainda, a seda. Já os polímeros sintéticos são aqueles originários do Nafta, derivado do petróleo, tais como o polietileno (PE), o polipropileno (PP), a poliamida (comercialmente conhecido como Nylon), entre outros.

Os polímeros sintéticos são classificados, inicialmente, conforme o tipo de reação de polimerização que resulta na resina. Basicamente, são divididos em dois grupos: os de adição e de condensação.

Os polímeros de adição são formados por monômeros iguais e possuem, em geral, cadeias lineares. Um exemplo de polímero de adição é o policloreto de vinila (PVC), que é formado pela quebra da ligação dupla covalente entre os átomos de carbono centrais, formando o monômero apresentado na Figura 8.

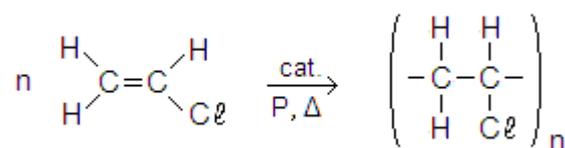


Figura 8 – Exemplo de reação de obtenção de um polímero de adição. (adaptado de Trombini, 2004)

Os polímeros de condensação podem ser formados pela reação tanto entre monômeros iguais como diferentes, gerando subprodutos, em geral água. Esses polímeros possuem cadeias complexas, geralmente ramificadas que, dependendo do grau de ramificação, define a natureza desse polímero entre termoplástico ou termorrígido. A poliamida, que comercialmente é conhecida pelo nome de Nylon, é um exemplo clássico de polímero de condensação, onde monômeros de ácido adípico (hexanodióico) se ligam à moléculas de 1-6-hexanodiamina (hexametilenodiamina), tendo como subproduto a água, como ilustrado na Figura 9.

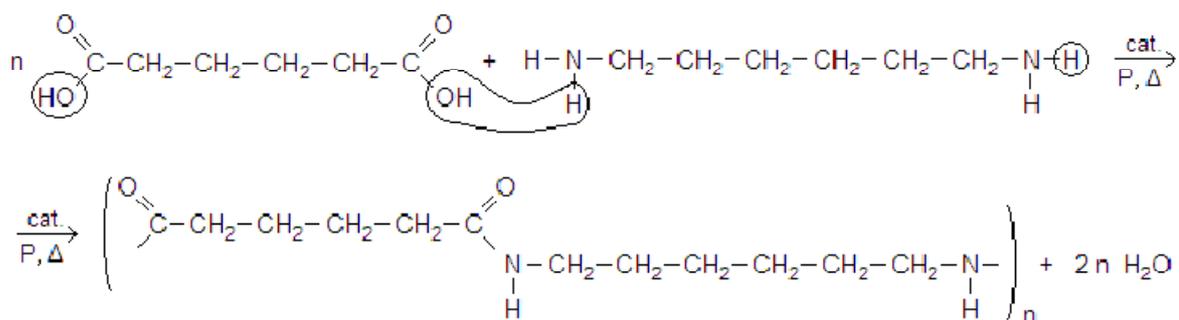


Figura 9 – Exemplo de reação de obtenção de um polímero de condensação. (adaptado de Trombini, 2004)

Segundo Trombini (2004) os polímeros sintéticos também são classificados quanto a sua fusibilidade. Neste caso, podem ser definidos como termoplásticos e termorrígidos (termofixos). O primeiro, pode ser fundido por aquecimento, adquirindo “altíssima” fluidez e baixa viscosidade e podem ser solidificados por resfriamento. O segundo, infusíveis, não permitem o reprocessamento e, na presença de altas temperaturas, carbonizam.

Os polímeros termoplásticos são classificados de acordo com suas propriedades mecânicas, tais como durabilidade, resistência e desempenho, podendo ser chamados de *convencionais* ou *de engenharia*. Os termoplásticos de engenharia apresentam melhores propriedades térmicas e mecânicas que os convencionais, porém, possuem custos mais elevados.

Entre os polímeros termoplásticos, podemos destacar o polietileno (PE), que se trata da mais simples e barata resina industrialmente utilizada, o policarbonato (PC), utilizado na fabricação de discos compactos (CD, DVD), o poliestireno (PS), e ainda, podemos destacar o polipropileno (PP), amplamente utilizado no ramo automobilístico e de eletrodomésticos, por seu reduzido custo de processamento e de matéria-prima.

O polipropileno é um polímero termoplástico semicristalino, que é obtido pela polimerização do propeno na presença de um catalisador estéreo específico, conhecido como Ziegler-Natta, o que resulta em um polímero de cadeia linear, caracterizado pelo radical metil – CH₃ – conforme ilustrado na Figura 10.

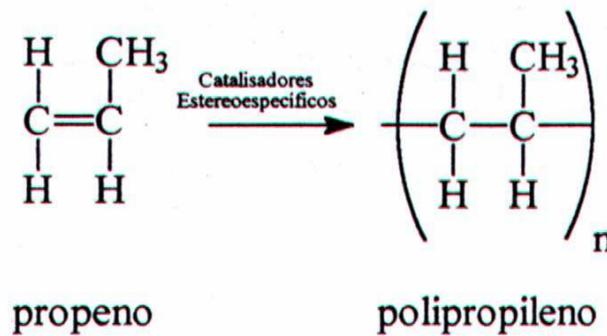


Figura 10 – Polimerização do polipropileno. (adaptado de Trombini, 2004)

A polimerização catalítica do polipropileno foi descoberta em 1954, pelo químico italiano Giulio Natta. Essa descoberta foi um marco na ciência de materiais, por sua potencial aplicação em escala industrial.

Aplicando catalisadores especiais, Natta obteve um polímero cristalino formado pelo alinhamento ordenado de moléculas de propileno. Os altos rendimentos que essa reação apresentou, levou a uma rápida exploração comercial, o que gerou, no mesmo ano de 1954, patentes comerciais e publicações científicas, porém, sua comercialização só começou no ano de 1957, pela empresa italiana Montecatini. A difusão mundial do polipropileno se deu quando grandes empresas petroquímicas, como ICI e Shell, começaram a comercializar a resina.

2.2.1 – Mecanismo de Reação:

A polimerização do propileno é uma reação de adição que emprega catalisadores de coordenação. Estes catalisadores são compostos de metais de transição que, por meio de ligações metal-carbono, permite a inserção de monômeros à cadeia. A Figura 11 ilustra o mecanismo do tipo TiCl₄, onde o metal titânio é usado como ponte para inserção de monômeros à cadeia.

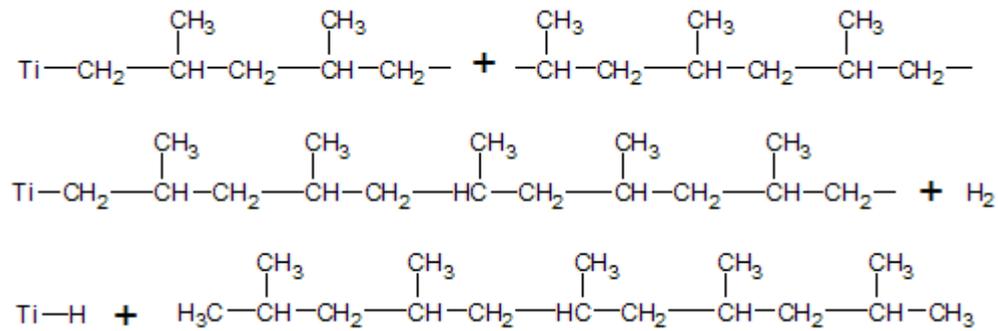


Figura 11 – Exemplo de reação de polimerização do tipo TiCl_4 . (Trombini, 2004)

Os mecanismos de reação do sistema catalítico explicam a estrutura linear da cadeia de polipropileno. Como pode ser visto na Figura 11, as cadeias do polímero aumentam em etapas sucessivas sobre o catalisador que abre uma lacuna para a ligação de um novo monômero à cadeia. A reação é cessada graças a ação de agentes como o hidrogênio, que controla o “comprimento” da cadeia e, conseqüentemente, seu peso molecular, viscosidade, entre outras propriedades reológicas.

Se durante a polimerização só existir o monômero propileno, teremos o polipropileno homopolímero. Caso se introduza à reação um segundo monômero, o comonômero, obter-se-á um copolímero. O comonômero mais amplamente utilizado é o etileno.

Atualmente, o Polipropileno é dividido em três categorias: *homopolímero*, *copolímero alternado* e *copolímero estatístico* ou *randômico*. Os três tipos apresentam diferentes características e propriedades, tendo aplicações específicas, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação dos diferentes tipos de polipropileno comerciais

CATEGORIA	PROPRIEDADES BÁSICAS			APLICAÇÃO
	Rigidez	Resistência ao impacto (baixas temperaturas)	Transparência	
Homopolímero	alta	baixa	intermediária	Fibras
Copolímero Alternado	baixa	intermediária	alta	Embalagens
Copolímero Estatístico	intermediária	Alta	baixa	Automóveis / Eletrodomésticos

Fonte: *Innovation et Organisation - Les Cas de l'Industrie des Polymers de José Vitor Martins*

Existem, atualmente, inúmeras pesquisas que estão criando uma revolução na produção do polipropileno, com uma nova geração de catalisadores, os chamados *metallocenos*, que são uma família de compostos organometálicos que controlam com maior precisão a regularidade da estrutura do polímero, assim como sua distribuição e peso

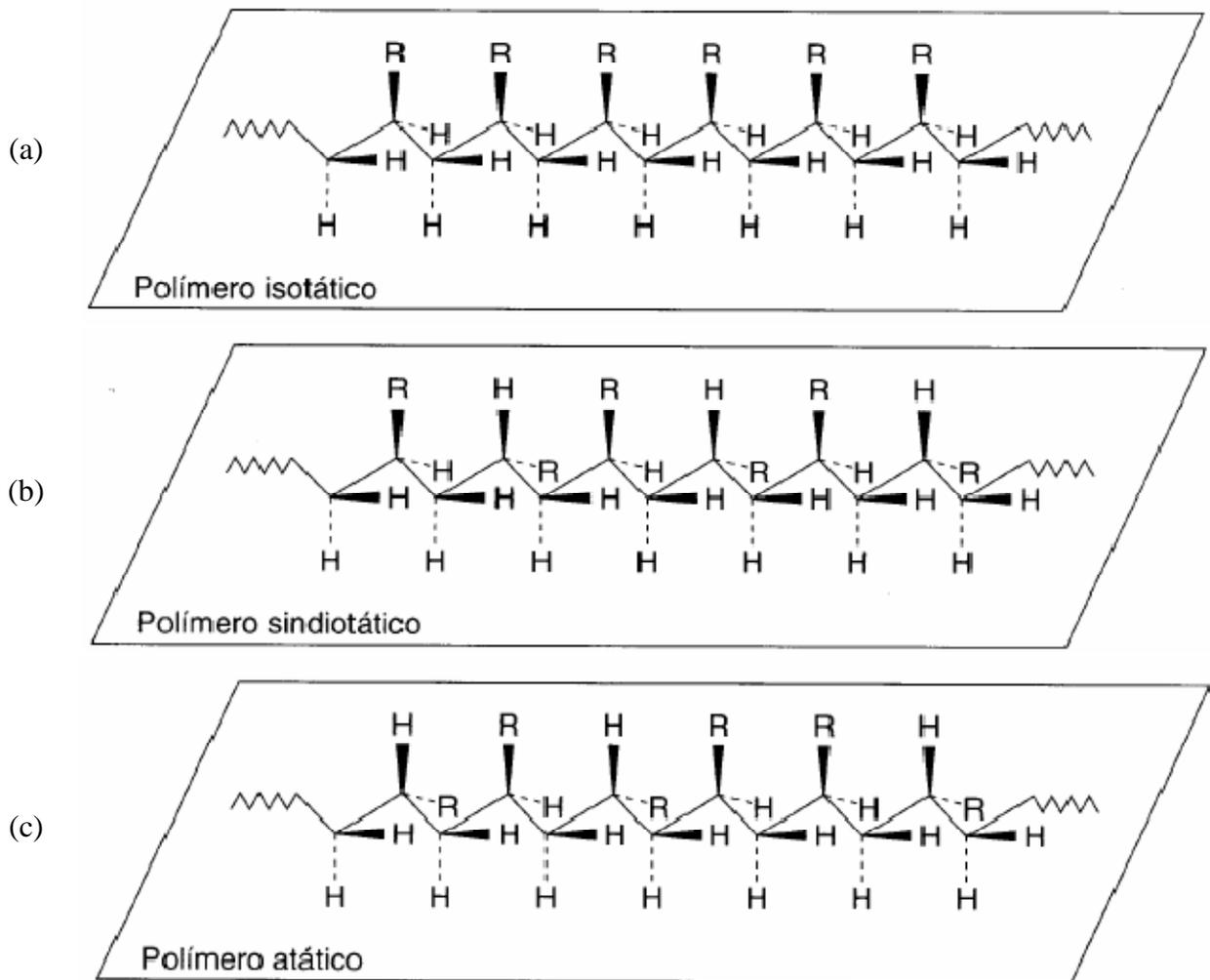


Figura 13 – Representação espacial das cadeias do polipropileno; (a) Configuração isotática; (b) Configuração sindiotática; (c) Configuração atática. (Trombini, 2004)

Lieberman (1989) diz que esta configuração influenciará na cristalização do polímero. Tanto as cadeias isotáticas como as sindiotáticas favorecem a cristalização por permitir um “encaixe” perfeito entre diferentes cadeias, isto é, tendem, no estado sólido, à uma disposição espacial ordenada, que confere ao material propriedades físico-químicas excepcionais, despertando maior interesse comercial. É importante salientar que não existe uma configuração 100% de uma espécie ou de outra. O que existe, de verdade, é uma tendência a uma determinada configuração, o que gera uma cristalização não total, mas parcial do polímero. É por isso que se diz que o polipropileno é um polímero semicristalino, uma vez que o grau de cristalinidade deste pode ser de, no máximo, 65 por cento. Nesses níveis de cristalização, há a formação de agregados cristalinos, denominados *esferulitos*, como representado na Figura 14.



Figura 14 – Esferulito do polipropileno. (LIEBERMAN, 1989)

2.2.3 Propriedades Mecânicas e Reológicas do Polipropileno:

As propriedades mecânicas do polipropileno isotático são largamente influenciadas por sua cristalinidade. Devido à sua temperatura de fusão cristalina ser relativamente alta, quando em comparação a outros polímeros, sua fase cristalina lhe confere uma certa resistência mecânica até altas temperaturas. A tabela 2 relaciona as propriedades gerais do polipropileno.

Tabela 2 – Propriedades gerais do polipropileno (adaptado de Lieberman, 1989)

PROPRIEDADE	VALOR
Temperatura de fusão (°C)	160-175
Temperatura de amolecimento (°C)	140-160
Densidade (g/cm ³)	0,90
Peso molecular médio (Mn)	>10 ⁶
Intervalo de decomposição (°C)	328-410

2.2.3.1 Dispersão de pesos moleculares

O comprimento das cadeias do polipropileno não é uniforme. O que realmente se obtém é uma ampla dispersão de pesos moleculares, que influencia nas propriedades mecânicas do produto. Essa distribuição dos pesos moleculares é restringida pelos processos de fabricação – condições de operação e, principalmente, os sistemas catalíticos empregados.

2.2.3.2 Viscosidade

A viscosidade do material fundido é, junto com a dispersão dos pesos moleculares, uma das características mais importantes na classificação dos tipos de polipropileno, uma vez que influem diretamente nas condições de processamento e, portanto, nos custos de transformação da resina. Quanto maior a viscosidade, menor é o índice de fluidez e, esta propriedade é inversamente proporcional ao peso molecular do polímero. Em geral, os homopolímeros apresentam altíssima fluidez a baixas temperaturas – por volta de 200°C – sendo seu processamento muito simples e de baixos custos.

2.2.3.3 Cristalinidade

Por se tratar de um polímero de cadeia altamente linear, as moléculas do polipropileno tendem a formar uma estrutura ordenada, semicristalina. As moléculas formam cadeias largas e estáveis, com altos pesos moleculares. Isto lhe confere excepcionais propriedades mecânicas, em especial a alta dureza, alta resistência à tração e boa rigidez.

2.2.3.4 Compostos e misturas

Como outros termoplásticos, o polipropileno permite ser pós processado, isto é, ser tratado fora do reator, depois de sua síntese. É comum o emprego deste material em misturas com outros polímeros ou com cargas minerais (comercialmente conhecido como “PP com carga”) em altas proporções (superiores a 10%), formando materiais compostos. Estes compostos apresentam propriedades diferenciadas do material puro, podendo ter significativo aumento de rigidez e resistência ao impacto.

Os diferentes tipos de polipropileno incorporam indistintamente diversos aditivos, em proporções inferiores a 1%, com a finalidade de melhorar sua estabilidade termo-oxidativa e suas propriedades físico-químicas, tais como sua transparência, aspecto superficial e rigidez.

Dessa forma, o polipropileno pode ser considerado como um grupo de polímeros, com propriedades variadas e como sendo um único produto. É por esse motivo que o PP vem sendo tão utilizado comercialmente, nas mais variadas aplicações.

2.2.4 Aspectos Comerciais

Os principais motivos que fazem o polipropileno estar entre as resinas mais utilizadas industrialmente, são:

- Propriedades de engenharia: alta rigidez, resistência ao impacto à altas temperaturas, baixo peso específico e, ainda, transparência e translucidez;
- Alta fluidez: suas propriedades favorecem os processos de injeção, sendo a resina de mais simples processamento;
- Propriedades mecânicas: com a utilização de reforços, pode substituir materiais de engenharia de custo muito superiores.

Esses três principais motivos fazem do PP um material de baixíssimo custo, sendo um dos polímeros de menor custo por volume, além de processos de transformação barateados por suas características que reduzem tempo e investimento. A Figura 15 mostra um comparativo entre os principais polímeros utilizados industrialmente, destacando o baixo custo por volume do polipropileno.

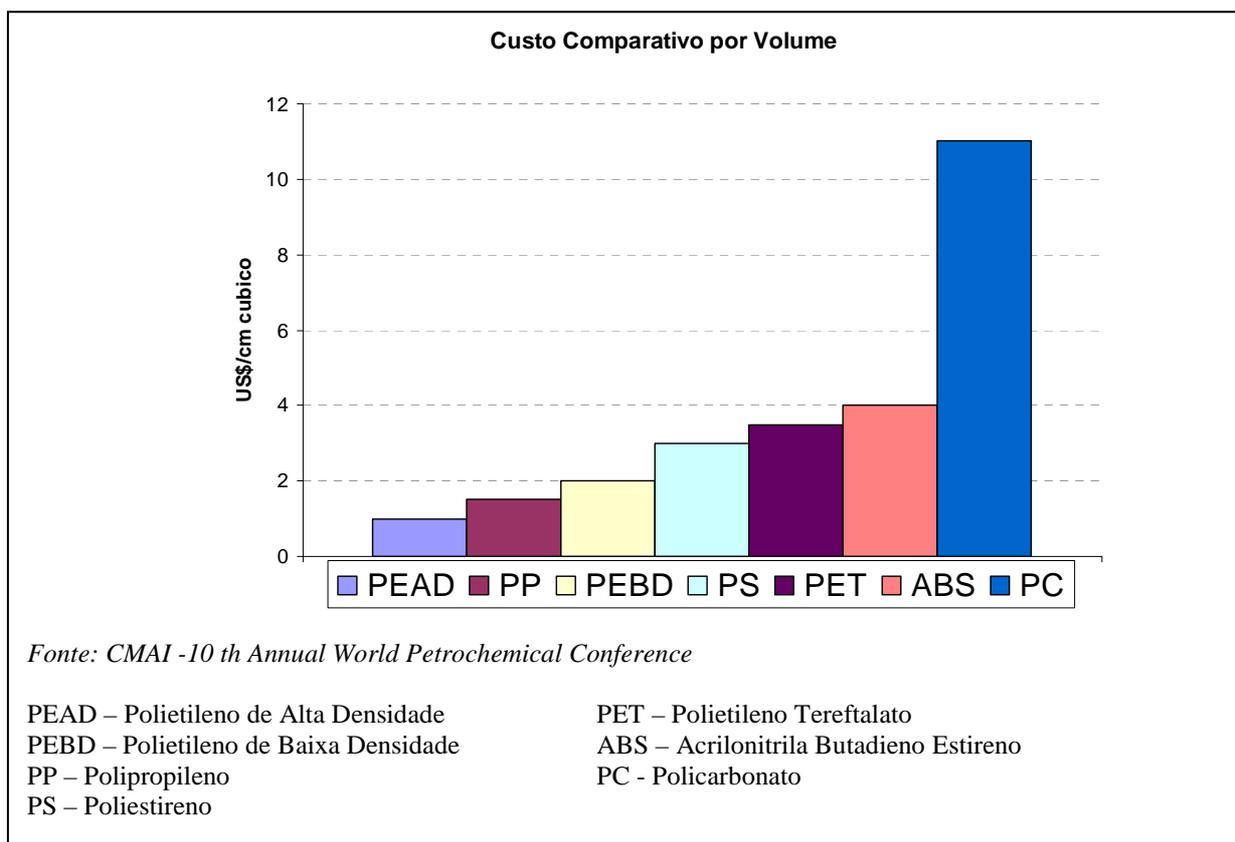


Figura 15 – Comparativo dos custos por volume de diferentes polímeros.

2.3 PROCESSOS DE EXTRUSÃO

A extrusão é o processo de fabricação de produtos semi-acabados de forma contínua, como barras, tubos, chapas, placas e, ainda, perfis de geometria complexa (Figura 16). A extrusão também é usada nos pré processos de sopro, onde se forma a ampola para posterior sopro.

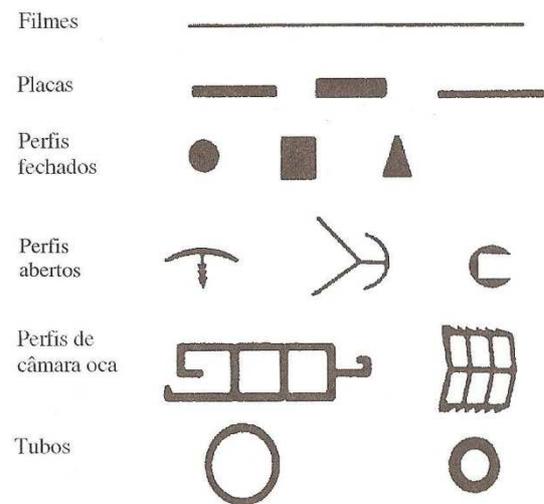


Figura 16 Exemplos de perfis extrudados, (Michaeli et al, 1995)

Basicamente, a extrusão produzirá uma massa homogênea e fundida do polímero em processo e conduzi-lo-á a alta pressão através da ferramenta com o perfil desejado. A Figura 17 apresenta os principais componentes de uma extrusora, o componente padrão de todas as instalações de extrusão. Para Manrich (2005) uma extrusora é composta por um cilindro com um parafuso, chamado de *rosca*, em seu interior, um funil de alimentação de material que pode ser em pó ou granulado (moído), abraçadeiras térmicas durante o comprimento do cilindro que fornecerá calor para a total fusão do material e, ainda, um bico contendo a ferramenta de perfil por onde a massa fundida será forçada.

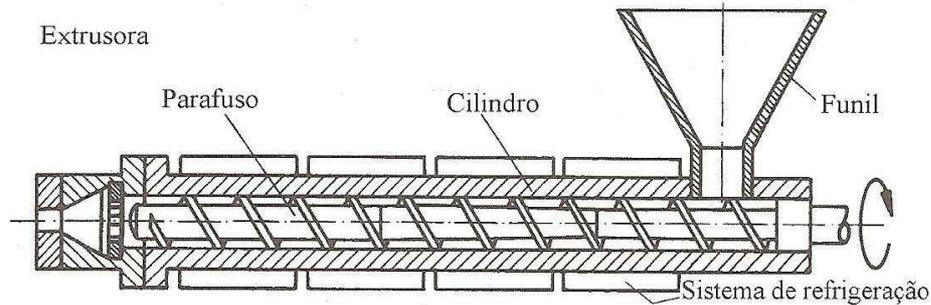


Figura 17 – Principais componentes de uma extrusora (Michaeli et al, 1995)

Para Manrich (2005), a rosca é o principal componente da extrusora, por este transportar, fundir, homogeneizar e plastificar o polímero. É neste que é obtido cerca de 80% da energia necessária para fundir o material, através do atrito gerado pelo movimento relativo entre o plástico e a rosca que faz o aparecimento de forças de cisalhamento. Os 20% de energia restantes é obtido pelas abraçadeiras externas ao cilindro que são resistência elétrica que aquecerão todo o canhão da extrusora.

De forma geral, as roscas são compostas por três zonas: zona de alimentação ou de entrada, zona de compressão e zona de calibragem ou controle de vazão. A zona de entrada é a área onde se é feita a alimentação da extrusora. Nesta zona o material é transportado para frente, para a zona de compressão, onde o material será fundido e compactado. Isso se dá pelo aumento do diâmetro do parafuso o que reduzirá o volume que o material ocupa, entre cilindro e rosca, aumentando o atrito, gerando energia mecânica. Por fim, na zona de controle da vazão o material será homogeneizado e plastificado, alcançando a temperatura de trabalho. A Figura 18 esquematiza as zonas de uma rosca.

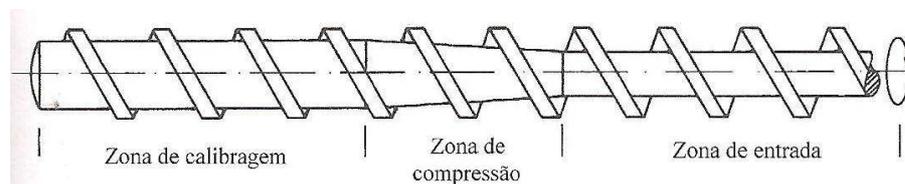


Figura 18 – As zonas das roscas de extrusão (Michaeli et al, 1995)

Michaeli et al (1995) diz que os parafusos devem obedecer as seguintes exigências:

- 1) Avanço constante, sem pulsação;
- 2) Capacidade de formação de uma massa fundida homogênea térmica e mecanicamente;
- 3) Processar o material abaixo dos limites de degradação térmica, química e mecânica.

Os processos de extrusão são análogos aos de injeção. Basicamente, todo o conjunto de injeção é semelhante, havendo peculiaridades nas roscas e pressões. Porém, a grande diferença entre os dois processos está no estado físico do material processado, mais precisamente a fluidez. Enquanto que na injeção é necessário termos baixa viscosidade e alta fluidez para facilitar o preenchimento total do molde via canais de injeção e capilares de diâmetros muito pequenos, nos processos de extrusão se busca alta viscosidade, que garantirá a uniformidade e continuidade do extrudado. A Tabela 3 mostra temperaturas de trabalho e suas aplicações para determinadas resinas.

Tabela 3 – Temperaturas de trabalho na extrusão e suas aplicações. (Michaeli et al, 1995).

RESINA	FAIXA DE TEMPERATURA DE TRABALHO (°C)	APLICAÇÕES
PE	130 - 200	tubos, filmes, revestimentos
PP	180 - 260	tubos, filmes planos, fitas
PVC	180 - 210	tubos, perfis, tablet
PMMA	160 - 190	tubos, perfis, tablet
PC	300 - 340	tablet, perfis, corpos ocos

O processo de extrusão é basicamente composto pela extrusora, pelos puxadores que puxam o extrudado da ferramenta de perfil e o resfriador, que retirará calor do produto, solidificando-o.

As extrusoras, por sua vez, são compostas por 4 partes: funil, rosca, cilindro ou barril e cabeçote. Desses componentes, o de maior importância é o canhão que é o conjunto cilindro-rosca. Essa importância se deve ao fato de ser esse par responsável pelas trocas de energia térmica e mecânica do processo e, ainda, por propiciarem a transformação de forma no polímero processado.

2.3.1 Parafuso ou Rosca

O parafuso, conhecido no ambiente fabril como rosca, é a parte fundamental do processo de extrusão. Sua função é homogeneizar, misturar, puxar e fundir o material plástico. Dentre os vários tipos de roscas, as mais comuns são as de três zonas, por se tratarem de uma solução de baixo custo e pela capacidade de processar a maioria dos termoplásticos comerciais.

Dependendo do tipo de polímero a ser processado, varia-se especificações dimensionais das roscas. De modo geral, comprimento, diâmetro, ângulo da hélice e passo de

rosca têm suas especificações para cada plástico. Porém, qualquer que seja a combinação, todas exercerão o mesmo trabalho sobre o material (Figura 19). A parte inicial, chamada de zona de entrada fará o transporte do plástico abastecido pelo funil. A região intermediária, chamada zona de compressão, o plástico será comprimido, compactado e fundido e, na parte final da rosca fica a zona de saída, onde o plástico será homogeneizado e elevado à temperatura de trabalho.

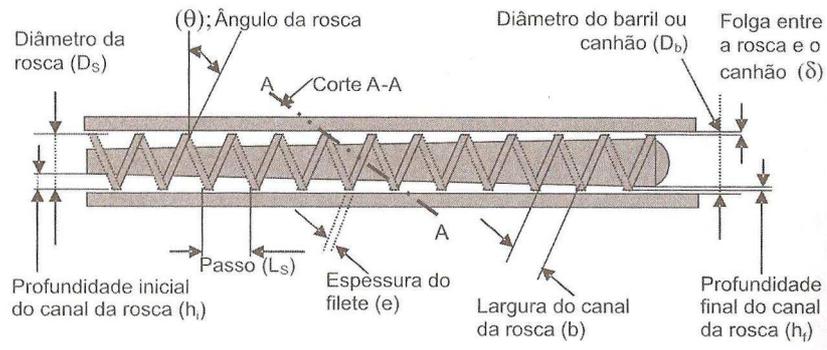


Figura 19 – Principais elementos de uma rosca de três zonas (Manrich, 2005).

Dentre as três zonas, a que ocorre o maior número de transformações físico-químicas no material é a zona de compressão. Nela, o material proveniente do funil entra na forma de pó ou grãos (pélete), que possui baixa densidade à temperatura ambiente, entre $0,3\text{g/cm}^3$ e $0,6\text{g/cm}^3$. Durante sua passagem por essa zona, o material amolece, eliminando o ar existente entre os grãos, aumentando, assim, a densidade em até 4 vezes a inicial. Dessa forma o material deverá ser comprimido à taxa igual ou superior a alteração da densidade, a fim de manter os níveis de cisalhamento necessários.

Existem vários tipos de roscas desenvolvidas para cada tipo de polímero. Dentre elas, há as cilíndricas e as cônicas, onde seu diâmetro externo varia em seu comprimento. Basicamente, alterando-se a relação L/D e ainda, ângulo e passo de rosca, pode-se alterar completamente as características das roscas. A Figura 20 mostra essas variações.

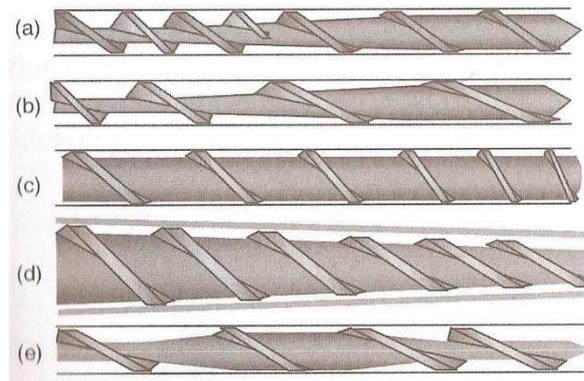


Figura 20 – Diferentes tipos de roscas disponíveis comercialmente para extrusão (Manrich, 2005).

2.3.2 Roscas Para Polipropileno

A fim de maximizar o desempenho dos processos de extrusão, pode-se adicionar às roscas ressaltos em forma de anéis, chamados de misturados e cisalhadores, dependendo do tipo. Há, para cada tipo de material, misturadores e cisalhadores recomendados, que vão otimizar a plastificação e a homogeneização do material em processo. A Figura 21 apresenta diferentes tipos de elementos mistura/cisalhamento.

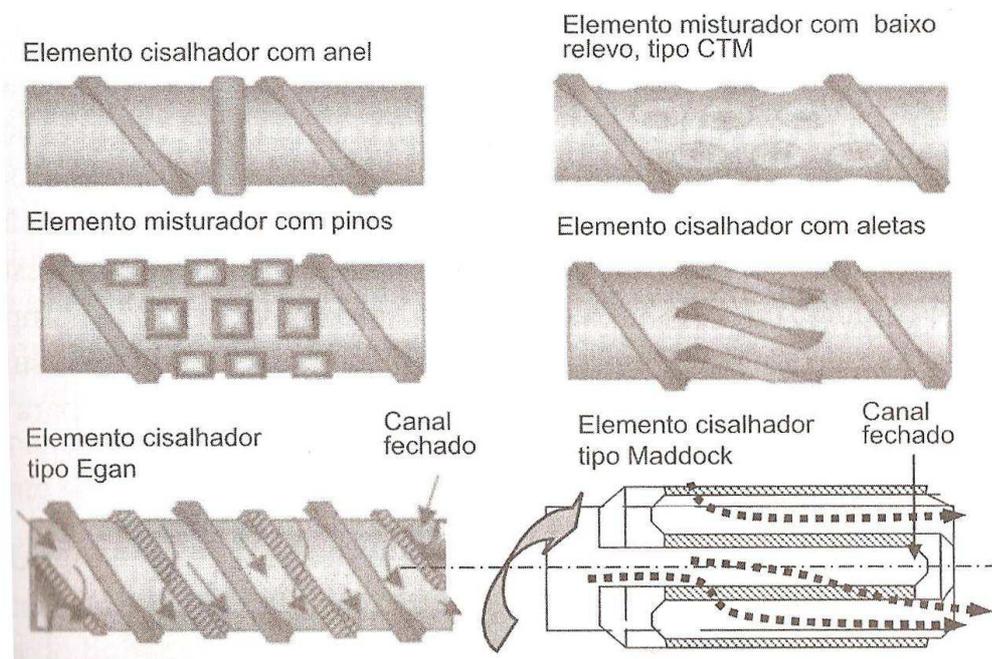


Figura 21 – Elementos mistura/cisalhamento mais comumente encontrados (Manrich, 2005).

Manrich (2005) diz que no processo de extrusão do PP, utiliza-se, normalmente, roscas com L/D em torno de 25:1. Essa relação favorece às propriedades do PP que funde a

165°C e, devido sua cristalinidade, tende a contrair bastante após resfriado. A Figura 22 esquematiza uma rosca mais comumente usada.

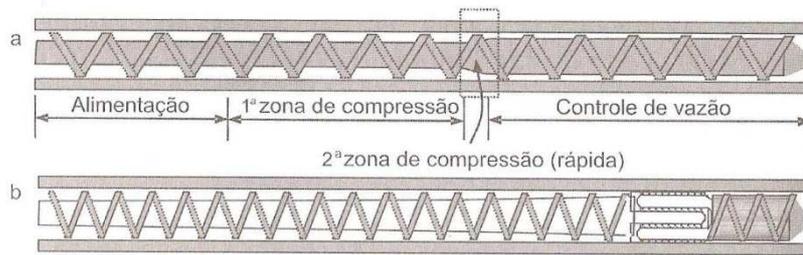


Figura 22 – Exemplo de rosca utilizada na extrusão do polipropileno (Manrich, 2005).

2.4 Processos de Reprocessamento de Termoplásticos

Existem diferentes formas para o reprocessamento, ou reciclagem, de termoplástico. Basicamente, todos seguem a mesma lógica: extração, moagem, granulagem e mistura. A extração é a obtenção do plástico a partir das matérias-primas, como o petróleo. A moagem facilitará a homogeneização do produto sólido. A granulagem, que pode ser a frio ou a quente, dará forma de pequenos pedaços, chamados péletes, ao plástico, facilitando o processamento e, a mistura é utilizada para a adição de aditivos ao plástico, tais como pigmentação, carga anti-chama, entre outros.

Nas instalações de reciclagem de plásticos, é típico encontrar a configuração moinho – extrusora – granulador. Nesse tipo de instalação o material a ser reciclado é primeiro moído, onde se tritulará o plástico em pedaços não maiores que 5mm a fim de facilitar o processo seguinte, a extrusão. Neste processo se busca não só a homogeneização do material mas a uniformidade e estabilização do plástico reprocessado. Por fim, após o banho de resfriamento do fio extrudado, encontra-se o granulador ou picador (Figura 23). Este cortará o fio em pequenos pedaços de 2mm de comprimento, chamados péletes. A este processo se dá o nome de *peletização*.

Na moagem são usados, normalmente, moinhos de facas (Figura 24) que farão com que o material fique em uma forma que facilite o posterior processamento, no caso a extrusão.

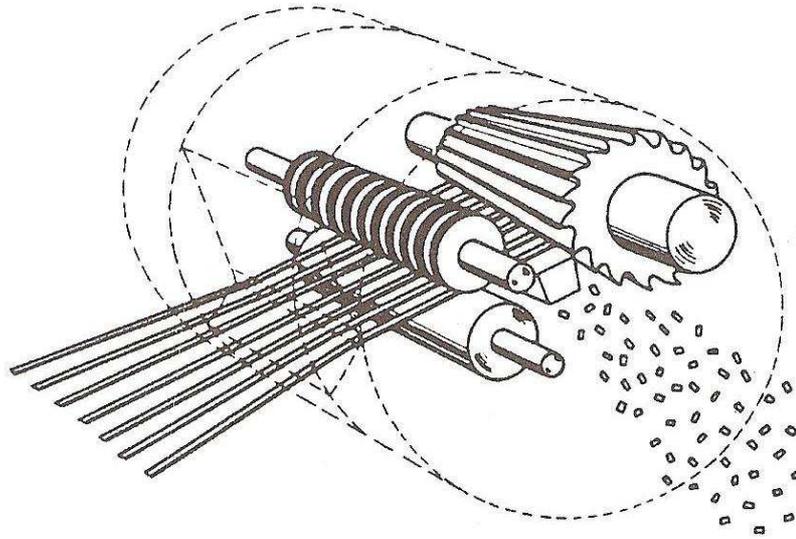


Figura 23 – Granulador a frio utilizado nos processos de peletização (Michaeli et al, 1995).

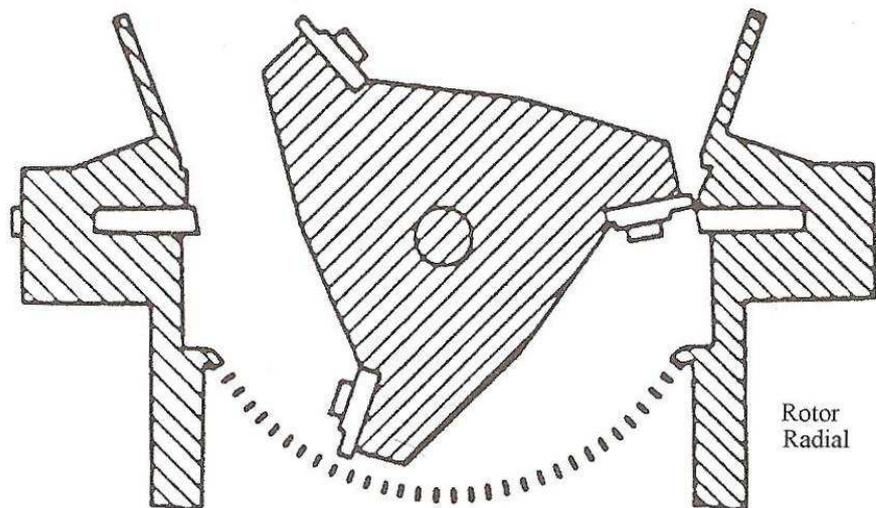


Figura 24 – Corte transversal de um moinho de facas evidenciando seu rotor radial de martelos e sua carcaça (Michaeli et al, 1995).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estudo de Caso

Como em todos os processos de fabricação, a transformação da matéria-prima em peças acabadas gera sucata referente à peças refugadas. Por inúmeros motivos, um controle de qualidade pode reprovar uma determinada peça. Esses motivos giram, quase sempre, em torno da fidelidade dimensional, da qualidade do acabamento superficial ou, ainda, à forma desse sub-produto.

Nas indústrias de injeção de polímeros a realidade não é diferente. As altíssimas taxas de produção de uma injetora plástica aliada a modernas técnicas de processamento dos polímeros não impedem a geração de resíduos via contaminação da matéria-prima por agentes contaminantes tais como óleos, graxas, pó, umidade ou, ainda, outro tipo de resina (Figura 25).



Figura 25 – Material contaminado por outro tipo de material e impurezas do ambiente.

Outra fonte de refugo são peças com falhas de injeção, como o não preenchimento da peça que ocorre quando o molde não é totalmente preenchido por material, resultando em peças inacabadas (Figura 26). Também podemos ter falhas ligadas a problemas no processo, como temperatura ambiente, temperatura de resfriamento, tempo de resfriamento, variação

das pressões de injeção e/ou recalque, entre outros fatores. Esses fatores acarretam peças com falhas de preenchimento, acabamento superficial fora dos padrões de qualidade especificados, problemas dimensionais, empenamentos, manchas escuras (degradação), entre outros de menor incidência.



Figura 26 – Peça não preenchida totalmente, resultante de início de processo.

Outra fonte de desperdício são os canais de injeção, conhecidos popularmente como *galho*. Elemento fundamental dos moldes sem câmara quente, é responsável pela distribuição da massa fluida do material do canhão da injetora até as cavidades dos moldes (Figura 27). Para o PP, o diâmetro típico do canal de injeção fica entre 4,8mm e 9,5mm (HARADA, 1991), dependendo do volume e massa da peça a ser injetada. Muitas vezes, em moldes de peças pequenas, o galho pode ter maior massa que as peças fabricadas. Dessa forma, este importante elemento se torna outro grande foco de desperdícios na indústria de transformação de plásticos (Figura 28).

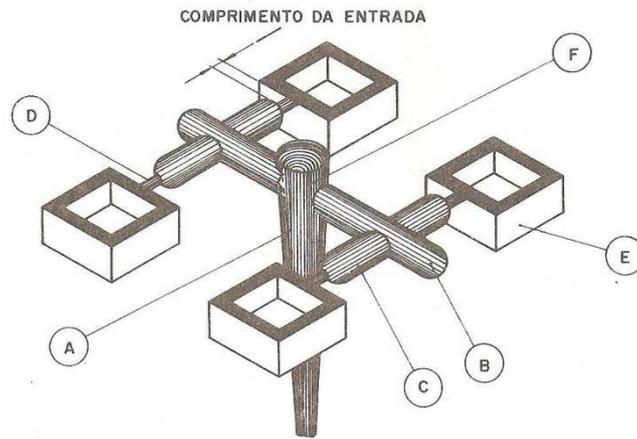


Figura 27 – Esquema de galho de injeção com suas partes: A) Canal de injeção da bucha; B) Canal de distribuição primário; C) Canal de distribuição secundário; D) Entradas ou pontos de injeção; E) Produto a ser moldado; F) Poço frio. (Harada, 1991)



Figura 28 – Exemplo de galho de injeção, onde podemos ver as 6 partes constituintes, conforme Figura 27.

É comum, após a realização de um set-up de moldes em uma injetora, o operador esvaziar o canhão de injeção, a fim de limpá-lo, impedir a degradação ou a solidificação do material no interior do canhão. Esse esvaziamento gera um resíduo, uma massa de material polimérico já processado, que, no ambiente fabril, é conhecido como *borra* (Figura 29). Essas

borras podem chegar a pesar mais de 5 quilogramas em injetoras de grande porte (acima de 1000 toneladas). Isso significa uma perda enorme no processo, principalmente em um grande parque fabril que necessite de várias trocas de moldes em curtos espaços de tempo.



Figura 29 – Borrás de limpeza de canhão de injeção.

Por último, após o set-up de moldes, as primeiras peças injetadas podem apresentar falhas de injeção ou contaminação de qualquer origem. Pode-se ter situações que se injetarão peças fora dos padrões até que se estabilize o processo ou, ainda, que o material se homogeneíze no canhão de injeção.

A indústria de eletrodomésticos, a exemplo da automobilística, é uma grande transformadora de polímeros. Os baixos custos de matéria-prima e processamento, o excelente acabamento, a altíssima produtividade e o baixo peso das peças, fazem dos termoplásticos o insumo principal na fabricação de refrigeradores, fogões, lavadoras de roupas, liquidificadores, etc. Dessa forma, esse ramo industrial sofre com a geração de resíduos plásticos, uma vez que todas possuem os problemas apontados acima, visto que são comuns e inevitáveis. Assim sendo, a recuperação desses resíduos se torna uma ação não só ambientalmente correta – visto os benefícios ecológicos do não descarte desses resíduos em

aterros – mas também extremamente estratégico, uma vez que aproveitar-se-á o que antes era vendido como sucata e, ainda, o reintegrará ao sistema produtivo, com custo reduzido.

3.2 Apresentação dos Dados

Os dados que aqui estudados, foram obtidos de uma central de resíduos, no primeiro trimestre de 2009, de uma grande multinacional do ramo de eletrodomésticos, que terá sua razão social preservada, visto a situação estratégica que compõe.

A análise dos dados apresentados na Figura 30 e na Tabela 4, nos dá a ordem de grandeza da geração de material residual, em toneladas (ton), onde este número é composto pelo refugo de peças, canais de injeção, borras, etc, de polipropileno.

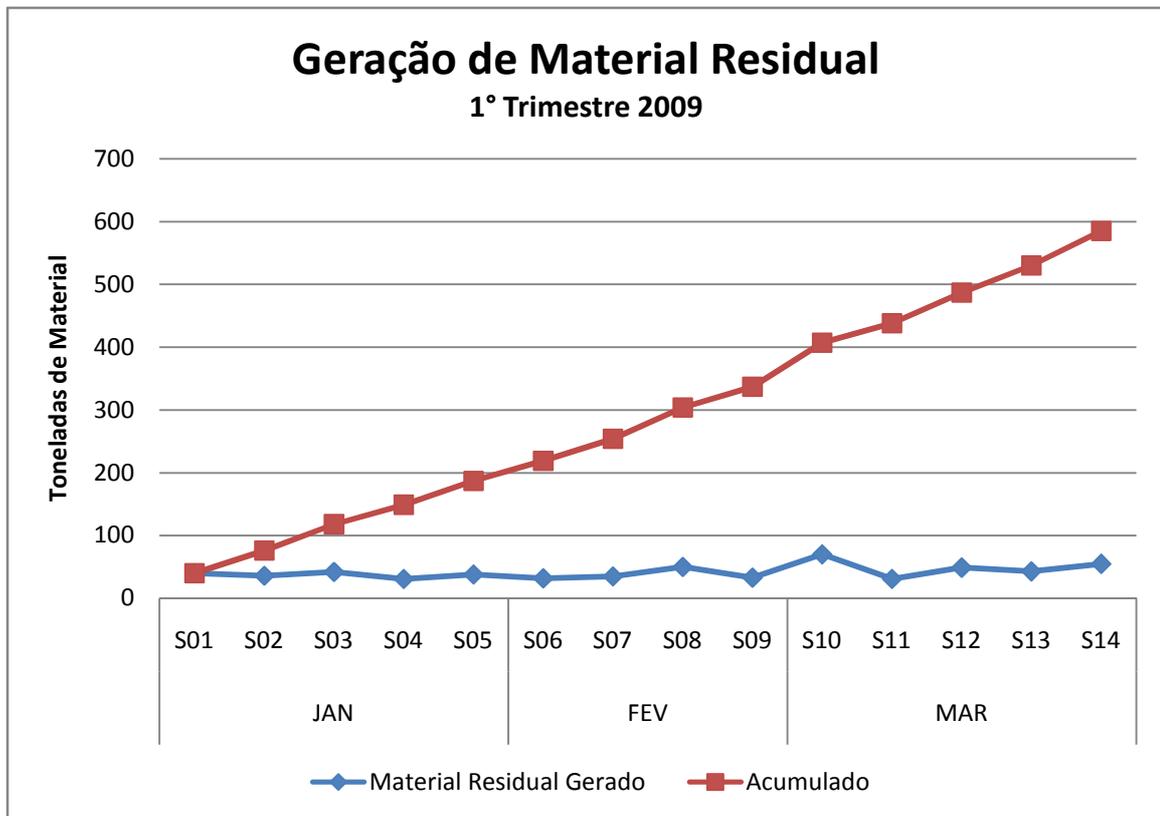


Figura 30 – Geração de material residual semanal.

Tabela 4 – Geração de material residual e o montante acumulado em três meses.

	JAN					FEV				MAR				
Semana	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14
Material Residual Gerado	40	36	42	31	38	32	35	50	33	70	31	49	43	55
Acumulado	40	76	118	149	187	219	254	304	337	407	438	487	530	585

O que se pôde notar da curva semanal da Figura 30 é que a geração de material residual segue de forma constante, tendo pequenos picos nas últimas semanas de cada mês. Isso se dá pelo fato de que os fornecedores de peças injetadas enviam os resíduos de seus processos na segunda quinzena de cada mês, gerando, assim, picos de geração. Essa constância é positiva pelo fato que podemos admitir um consumo constante na produção.

3.3 Implantação da Central de Recuperação de Polímeros

O primeiro passo para a reintegração de resíduos plásticos ao processo produtivo foi a instalação de uma central de recuperação para a moagem e a peletização do PP residual. Uma hipótese que foi analisada foi a terceirização do serviço através da contratação de uma empresa já instalada com infraestrutura pronta para realizar a reciclagem do material. Contabilizando-se os custos de processo e transporte, a terceirização do serviço inviabilizaria o projeto uma vez que a diferença entre os custos do reciclado e do material virgem eram ínfimos.

Dessa forma estudou-se a instalação de uma central completa dentro da planta, composta por moinhos de facas, extrusoras, picadores e bombas de vácuo para o transporte do material.

Desse estudo resultou um projeto que contemplava a instalação de três moinhos de facas, sendo dois com capacidade para 3ton/dia e um, menor, com capacidade de 1ton/dia, para peças de menor tamanho. Ainda foi previsto uma extrusora de capacidade de 500kg/h e três bombas de vácuo. Orçado todo o equipamento e instalação predial, fez-se o estudo de viabilidade econômica. O estudo de viabilidade econômica foi realizado, como descrito abaixo.

A. CUSTO ATUAL (utilizando matéria-prima reciclada comprada de terceiro)

- Custo da matéria-prima reciclada no mercado: R\$3,54/kg;
- Custo logístico (frete): R\$0,50/kg;
- Consumo médio de MP reciclada utilizado nas peças estudadas: 140×10^3 kg/mês, temos:

(I)

$$(140 \cdot 10^3) \times (3,54 + 0,05) = R\$502.600,00/mês = R\$6.031.200,00/ano$$

Custo anual com a compra de MP Reciclado de terceiros

B. GANHO COM A VENDA DA SUCATA PLÁSTICA

- Preço de venda da sucata plástica: R\$0,95/kg;

- Geração média de sucata plástica: $195 \times 10^3 \text{kg/mês}$:

$$(II) \quad (195 \cdot 10^3) \times (0,95) = R\$185.250,00/mês$$

C. CUSTO LÍQUIDO ATUAL

Subtraindo (II) de (I), temos:

$$(III) \quad 502.600,00 - 185.250,00 = R\$317.350,00/mês = R\$3.808.200,00/ano$$

Custo líquido da utilização da matéria-prima reciclada

D. CUSTO DO PROJETO

- Equipamentos:

○ Moinho de Facas (3ton/dia):	R\$ 190.000,00 × 2
○ Moinho de Facas (1ton/dia):	R\$ 120.000,00
○ Extrusora:	R\$ 350.000,00
○ Unidades de Vácuo:	R\$ 90.000,00 × 3
○ Tubulações:	R\$ 175.000,00
○ Instalação Predial:	R\$ 162.000,00
○ Material de Instalação Predial:	R\$ 59.000,00

$$(IV) \quad \text{○ CUSTO TOTAL:} \quad R\$ 1.966.000,00$$

E. ESTUDO DE VIABILIDADE

Com a implantação da central de reciclagem, não mais se comprará material reciclado de terceiros, porém não mais se venderá sucata plástica. Dessa forma, teremos as seguintes considerações de cálculo:

- Não serão contabilizados custos com insumos (materiais de processo, energia elétrica, água, etc);
- Não será contabilizado o custo com a venda de material residual (que não será reutilizado por falta de demanda);
- O custo estimado de mão-de-obra será: $6 \text{ operadores} \times R\$1.800,00/\text{operador} \times 12\text{meses} = R\$129.600,00/\text{ano}$, dessa forma será desprezado;

Assim sendo, podemos calcular a amortização do projeto, dividindo (IV) por (III):

$$\frac{R\$1.966.000,00}{R\$3.808.200,00} = 0,52 \text{ anos}$$

Haja visto uma amortização (payback) de 0,52 anos sendo inferior a 1 ano, aprova-se economicamente o projeto.

A Figura 31 esquematiza a instalação da central.

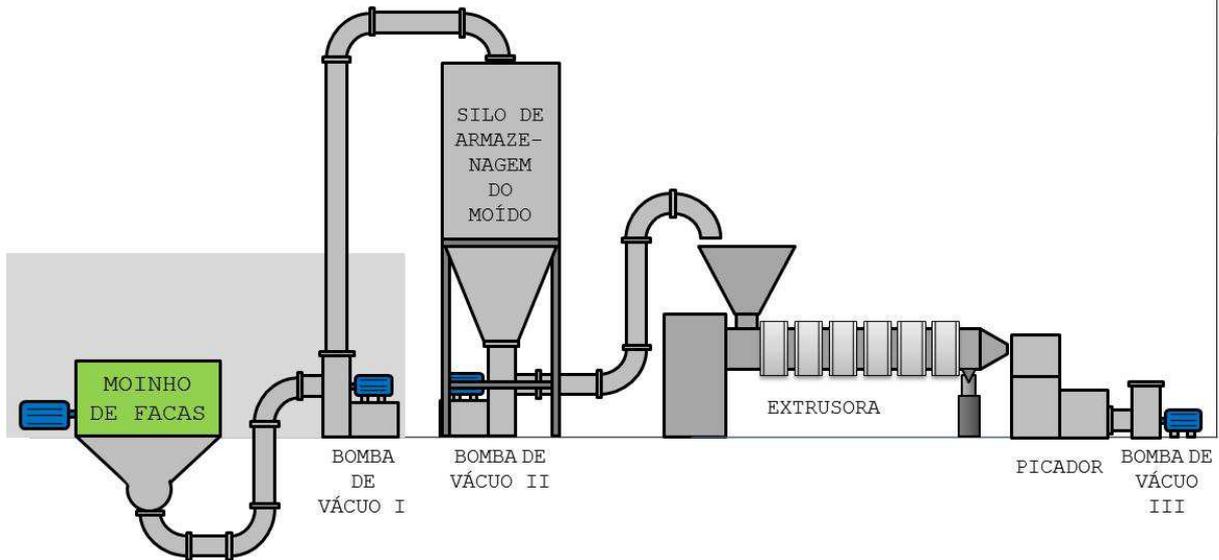


Figura 31 – Instalação da central de recuperação de polímeros.

3.4 Estudo da Utilização do Material Reciclado

Os processos de recuperação de resíduos plásticos consistem na moagem, extrusão e picagem do extrudado. Este processo é passível de contaminação por outros materiais, óleos lubrificantes, ou por qualquer outro elemento, envolvido no processo de reciclagem, que não seja o polipropileno. Outro problema é a umidade a qual o material pode ser exposto e, ainda, o pó gerado durante a moagem das peças. Este pó é fino e fica suspenso no ar, podendo se depositar nos *bags* de material já processado ou a processar.

Esses fatores provocam o aparecimento de manchas e pintas escuras nas peças injetadas com este material. A umidade provoca manchas de fluxo, parecidas com a espuma formada pelas ondas do mar. O pó, por possuir mínima área superficial, funde-se antes do restante do material e, ao chegar ao molde este terá se degradado, o que fará com que apareçam pintas escuras na peça injetada. Outro tipo de contaminação, a por outros polímeros, causa problemas dimensionais, haja visto que os pontos de fusão dos dois materiais são distintos e, então, os tempos de resfriamento também o serão. As peças contaminadas por outros materiais apresentam *escamas* superficiais e, ao quebrá-las apresentam camadas em forma de lâminas evidenciando a mistura de materiais.

Uma vez que se torna dispendioso o controle de todos esses contaminantes, se torna impossível a utilização do polipropileno reciclado em peças visuais, onde o consumidor tem

contato visual direto, tais como painéis, tampas, portas, etc. Dessa forma, foi estudado a quantidade específica de material que pudesse ser injetado à uma peça interna à uma lavadora de roupas. Essa quantidade foi determinada por análises de contração e dimensional da peça e com base nos dados apresentados no item 3.2, a fim de equilibrar o consumo com a geração e, ainda, reduzir o acúmulo da massa de reciclado em estoques, buscando uma solução não somente econômica mas também ambientalmente correta.

Inicialmente, com base no desenho da peça em questão, que aqui chamaremos apenas de *tanque* (Figura 32), e ainda com os dados internos de qualidade do produto/peça, determinou-se os seguintes fatores a serem ensaiados:

- 1) Tensão máxima até ruptura;
- 2) Deformação máxima;
- 3) Força de ruptura;
- 4) Teste de impacto;
- 5) Teste de injeção – try-out.



Figura 32 – Tanque injetado com material reciclado (Peso = 45kg; Altura = 820mm; Diâmetro = 540mm).

3.5 Metodologia de Ensaaios

3.5.1 Ensaio de Tração

Inicialmente, selecionamos quatro diferentes matérias-primas para o ensaio. São eles:

1. PP CP241¹ virgem;
2. PP H503² virgem;
3. PP CP241 com 15% de reciclado;
4. PP CP241 com 10% de reciclado.

O primeiro é o material até então utilizado, no estado virgem. Trata-se de um polímero heterofásico, de alta fluidez e alta resistência ao impacto. Este serviu de controle do ensaio. O segundo, o PP H503 era o polímero utilizado anteriormente na peça em questão. Esse material foi substituído pelo PP CP241 a fim de reduzir os custos de matéria-prima do produto, uma vez que o primeiro é cerca de 5% mais custoso que o segundo. Este custo superior se deve ao fato de este apresentar baixa fluidez, alta estabilidade do fundido (estabilidade dimensional) e alta resistência ao impacto. Por fim, o terceiro e quarto materiais são misturas do PP CP241 com diferentes porcentagens de reciclado. Esta amostra teve efeito comparativo a fim de identificarmos as alterações à resistência à tração das peças injetadas com os mesmos.

Após selecionado os materiais do ensaio, partimos para a injeção dos corpos de prova, conforme Norma ASTM D638-94b, que define os parâmetros do ensaio como:

- Temperatura do ensaio: $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- Taxa de aplicação de carga: 5mm/min;
- Dimensões do corpo de prova, conforme Figura 33.

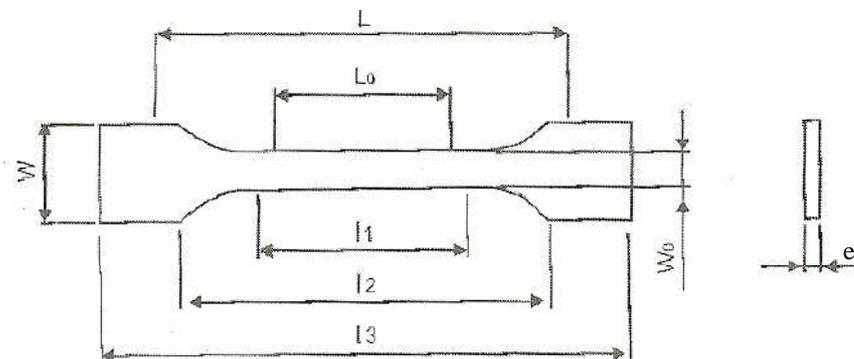


Figura 33 – Dimensões do corpo de prova para ensaios de tração, conforme Norma ASTM D638. $l_3 = 215\text{mm}$, $W = 19\text{mm}$, $l_2 = 100\text{mm}$, $l_1 = 60\text{mm}$, $L = 120\text{mm}$, $e = 3\text{mm}$. (CANEVAROLO, 2004)

¹ PP CP241 é o nome comercial do Polipropileno Copolímero 241;

² PP H503 é o nome comercial do Polipropileno Homopolímero 503.

Este ensaio foi realizado utilizando o dispositivo para ensaios de tração em polímeros, ilustrado na Figura 34, cujos dados aferidos são enviados diretamente à uma central computacional que faz a compilação dos resultados.



Figura 34 – Dispositivo para ensaio de tração.

3.5.2 Ensaio de Impacto

Os ensaios de impacto tem por objetivo medir a resistência de um determinado material ao choque mecânico. Este ensaio se dá com o uso do dispositivo pendular de ensaios de impacto (Figura 35). Este ensaio é de grande importância em peças estruturais.



Figura 35 – Dispositivo pendular para ensaios de impacto utilizado no ensaio.

Neste estudo utilizamos o Ensaio Charpy, conforme norma ASTM D6110, com os corpos de prova obedecendo às dimensões apresentadas na Figura 36.

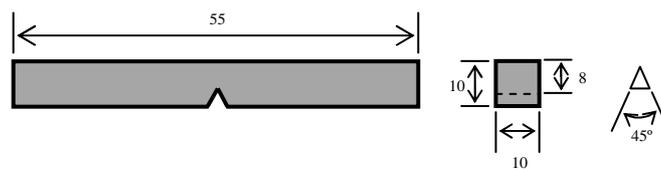


Figura 36 – Corpo de Prova dos ensaios Charpy (CANEVAROLO, 2004).

Os ensaios de impacto realizados testaram, também, os quatro materiais utilizados no ensaio de tração.

Tabela 6 – Matérias-primas utilizadas com seus índices e as características ensaiadas.

COMPARATIVO CARTA DE CONTROLE		
	TIPO MATERIAL / CORPO PROVA	CARACTERÍSTICA
1	PP Cp241 Virgem (Atual)	Resistência à Tração Deformação Máxima Resistência ao Impacto Força até Ruptura
2	PP H503 Virgem (Antes)	
3	PP Cp 241 Com 15% de Reciclado	
4	PP Cp 241 Com 10% de Reciclado	

4.1 Resistência à Tração

A peça estudada apresenta papel fundamental na estrutura do produto, haja visto que a mesma tem de suportar todo o peso do conjunto mecânico funcional acrescido do peso do cesto (onde as roupas são armazenadas durante os ciclos de lavagem) e toda a água utilizada no processo de lavagem. A especificação de projeto é que sua resistência à tração deve ser maior ou igual a 20MPa, que corresponde a aproximadamente 204kgf/cm².

Submetido os dez corpos de prova ao Ensaio de Tração, obtiveram-se os dados apresentados na Tabela 7.

Utilizando os dados da Tabela 7 no Software de Análise Estatística JMP, versão 6.0, plotou-se o gráfico da Variabilidade, que é mostrado na Figura 37.

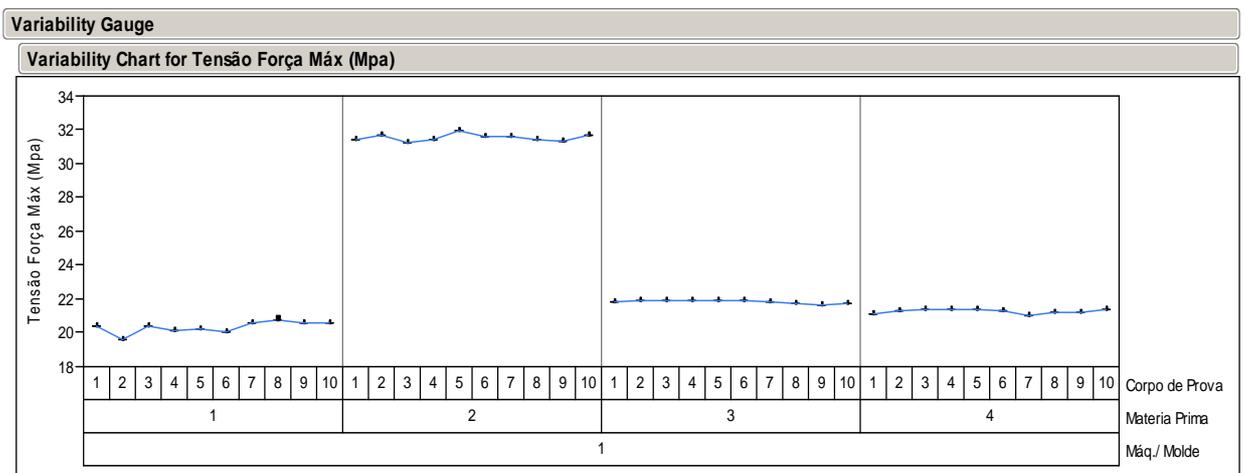


Figura 37 – Variabilidade dos resultados obtidos. Os números 1, 2, 3 e 4 se referem à matéria prima e os números de 1 a 10 são os corpos de prova de cada amostra.

Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio de tração

Máq./ Molde	Corpo de Prova	Material	Tensão Força Máx (MPa)
1	1	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,43
1	2	PP Cp241 Virgem (Atual)	19,58
1	3	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,36
1	4	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,12
1	5	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,23
1	6	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,07
1	7	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,61
1	8	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,72
1	9	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,55
1	10	PP Cp241 Virgem (Atual)	20,55
1	1	PP H503 Virgem (Antes)	31,41
1	2	PP H503 Virgem (Antes)	31,68
1	3	PP H503 Virgem (Antes)	31,24
1	4	PP H503 Virgem (Antes)	31,39
1	5	PP H503 Virgem (Antes)	31,95
1	6	PP H503 Virgem (Antes)	31,62
1	7	PP H503 Virgem (Antes)	31,58
1	8	PP H503 Virgem (Antes)	31,44
1	9	PP H503 Virgem (Antes)	31,33
1	10	PP H503 Virgem (Antes)	31,73
1	1	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,81
1	2	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,87
1	3	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,95
1	4	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,89
1	5	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,89
1	6	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,93
1	7	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,86
1	8	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,76
1	9	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,68
1	10	PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	21,70
1	1	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,13
1	2	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,33
1	3	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,38
1	4	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,37
1	5	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,35
1	6	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,30
1	7	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,02
1	8	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,24
1	9	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,19
1	10	PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	21,41

O gráfico da Variabilidade tem como função nos mostrar a dispersão dos resultados em relação ao *controle* (1), evidenciando a diferença entre os resultados obtidos nos diferentes materiais.

Da Figura 37, pôde-se concluir que (3) e (4) apresentam Resistência à Tração muito próximas às de (1). Essa proximidade nos mostrou que a escolha do percentual de utilização de 10% e 15% de material reciclado ao PP CP241 foi correta, pois não tivemos grandes amplitudes entre os diferentes resultados.

Outra conclusão é quanto ao percentual a ser utilizado. Da leitura do gráfico da Variabilidade podemos ver claramente que não houve diferença significativa entre os resultados obtidos dos materiais (3) e (4), estando, junto ao material virgem (2) no mesmo range de resistência – de 20MPa a 24MPa.

Da mesma forma da variabilidade, traçou-se o gráfico da média (\bar{X}). Este gráfico é apresentado na Figura 38.

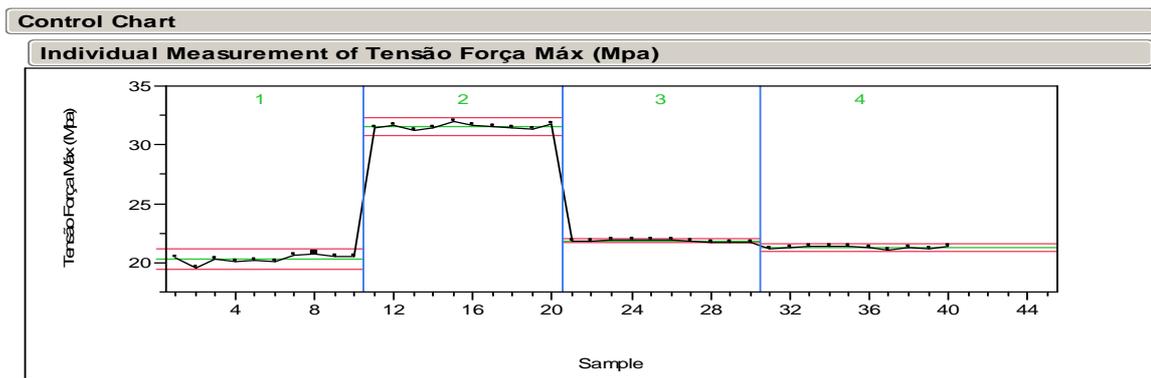


Figura 38 – Gráfico \bar{X} , mostra a média das resistências à Tração dos corpos de prova ensaiados.

Analisando a Figura 38, pôde-se concluir sem maiores estudos que a mistura de material reciclado ao virgem não compromete sua propriedade de resistência à tração. Pelo contrário, obteve-se melhora nos resultados quando comparado ao controle. Analisando cada material individualmente temos os resultados finais do ensaio realizado (Tabela 8).

Concluiu-se desse resultado que a adição de material reciclado ao virgem, formando o que é conhecido no ambiente fabril como *blenda*³ aumenta, mesmo em pequena grandeza, a resistência à tração do material, dando a certeza que a escolha não afeta os requisitos de projeto da peça estudada. Logo, para efeitos de formalização, aprovou-se as blendas (3) e (4) e seguiu-se os ensaios para aprovação de outros requisitos.

³ A Palavra *Blenda* vem do inglês *Blend*, que quer dizer mistura, combinação.

Tabela 8 – Resultados finais do ensaio de tração. Os resultados do Limite Superior e Inferior de Controle (LSC e LIC, respectivamente) foram calculados diretamente pelo software utilizado.

Tensão Força Máxima (MPa)				
	TIPO MATERIAL / CORPO PROVA	Limite Inferior Controle	Limite Superior Controle	Média
1	PP Cp241 Virgem (Atual)	19,450	21,200	20,32
2	PP H503 Virgem (Antes)	30,820	32,260	31,54
3	PP Cp 241 Com 15%	21,700	21,980	21,84
4	PP Cp 241 Com 10%	20,950	21,600	21,27

4.2 Deformação Máxima

Para a análise da deformação máxima, foram utilizados os mesmos ensaios feitos para a resistência à tração. Foi aferido as deformações (δ) máxima ocorridas até ruptura dos corpos de prova e tabelados conforme Tabela 9.

Da mesma forma feita para o ensaio de tração, plotou-se os resultados obtendo a distribuição dos valores de deformação máxima encontrados em cada corpo de prova. Este gráfico é mostrado na Figura 39.

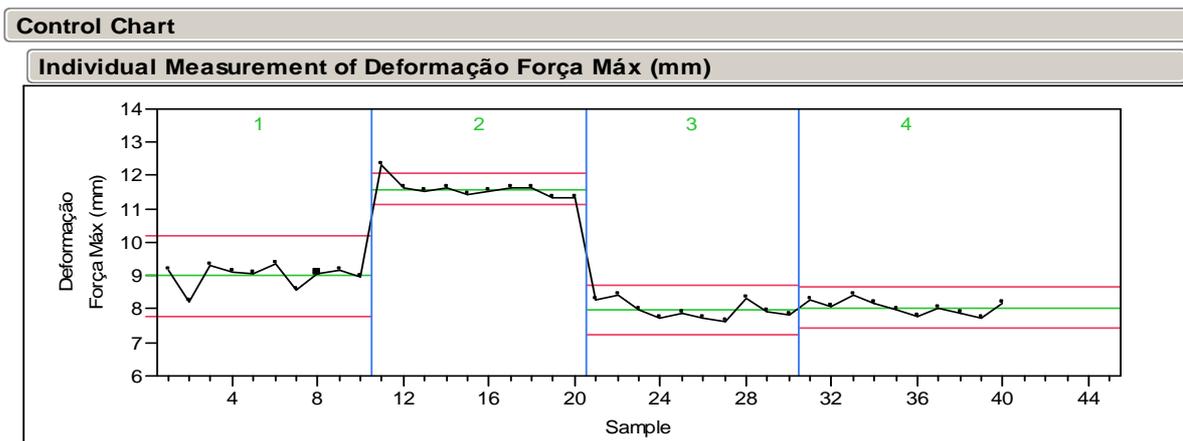


Figura 39 – Distribuição dos resultados obtidos dos ensaios para deformação máxima.

Tabela 9 – Resultados obtidos nos ensaios de tração quanto à deformação máxima nos corpos de prova.

Material	Máq./ Molde	Corpo de Prova	Deformação Força Máx (mm)
PP Cp241 Virgem (Atual)	1	1	9,184
	1	2	8,233
	1	3	9,303
	1	4	9,113
	1	5	9,065
	1	6	9,351
	1	7	8,566
	1	8	9,042
	1	9	9,161
	1	10	8,947
PP H503 Virgem (Antes)	1	1	12,300
	1	2	11,610
	1	3	11,540
	1	4	11,640
	1	5	11,440
	1	6	11,540
	1	7	11,640
	1	8	11,640
	1	9	11,330
	1	10	11,350
PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	1	1	8,256
	1	2	8,399
	1	3	7,995
	1	4	7,733
	1	5	7,900
	1	6	7,709
	1	7	7,614
	1	8	8,328
	1	9	7,923
	1	10	7,804
PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	1	1	8,256
	1	2	8,066
	1	3	8,423
	1	4	8,161
	1	5	7,971
	1	6	7,781
	1	7	8,019
	1	8	7,876
	1	9	7,733
	1	10	8,161

Analisando a Figura 39, pode-se ver exatamente a diferença entre as ductilidades de cada material. Para o controle (1), a deformação variou entre 8,2mm e 9,3mm, com grande

amplitude entre os diferentes resultados. Esse comportamento é esperado nos copolímeros de cadeia curta, cujo mecanismo de deformação segue as camadas da cadeia onde uma desliza sobre a outra, gerando pontos de concentração de tensão. Outra observação importante é o comportamento do homopolímero estudado (2), onde o mesmo se apresentou muito mais dúctil que os demais, apresentando uma zona elástica mais extensa que outros plásticos de engenharia. Essa característica o faz o preferido em peças estruturais por resistir à grandes forças, reagindo a elas via deformação e após o esforço retornar à condição inicial. Por fim, vemos o comportamento das blendas (3) e (4), onde ambas apresentaram mesmo patamar de deformação – menor que os outros dois - com amplitudes muito pequenas. Esse fato é resultado da adição do material reciclado que, com cadeia já processada, reduz sua ductilidade porém confere estabilidade dimensional à peça.

Os resultados finais do estudo de deformação máxima é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado final do Estudo da Deformação Máxima.

Deformação Força Máxima (mm)				
	TIPO MATERIAL / CORPO PROVA	Limite Inferior Controle	Limite Superior Controle	Média
1	PP Cp241 Virgem (Atual)	7,773	10,220	8,997
2	PP H503 Virgem (Antes)	11,133	12,073	11,603
3	PP Cp 241 Com 15%	7,227	8,705	7,966
4	PP Cp 241 Com 10%	7,412	8,677	8,045

A especificação de projeto diz que o material deve ter deformação máxima de 7,5mm. Dessa forma, para efeitos do ensaio, aprovou-se as amostras.

4.3 Força Máxima de Ruptura

A exemplo do que foi feito para aferição da Deformação Máxima (δ), aproveitou-se os resultados do ensaio de tração e obtivemos os dados da Força Máxima até Ruptura dos corpos de prova. Lembrando que esses dados são fornecidos pelo equipamento de ensaio de tração utilizado e os mesmos estão em kilograma-força (kgf), tais resultados são expressos na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados obtidos nos ensaios de tração quanto à força máxima.

Material	Máq./ Molde	Corpo de Prova	Força Máx (kgf)
PP Cp241 Virgem (Atual)	1	1	89,68
	1	2	85,94
	1	3	89,34
	1	4	88,30
	1	5	88,78
	1	6	88,09
	1	7	90,45
	1	8	90,93
	1	9	90,17
	1	10	90,17
PP H503 Virgem (Antes)	1	1	137,90
	1	2	139,00
	1	3	137,10
	1	4	137,80
	1	5	140,20
	1	6	138,80
	1	7	138,60
	1	8	138,00
	1	9	137,50
	1	10	139,20
PP Cp 241 Com 15% de PP 20%	1	1	95,71
	1	2	95,99
	1	3	96,34
	1	4	96,06
	1	5	96,06
	1	6	96,27
	1	7	95,92
	1	8	95,51
	1	9	95,16
	1	10	95,23
PP Cp 241 Com 10% de PP 20%	1	1	92,73
	1	2	93,63
	1	3	93,84
	1	4	93,77
	1	5	93,70
	1	6	93,50
	1	7	92,25
	1	8	93,22
	1	9	93,01
	1	10	93,98

Da Tabela 11, podemos plotar os gráficos de dispersão dos resultados (Figura 40) e da média (Figura 41), para análise.

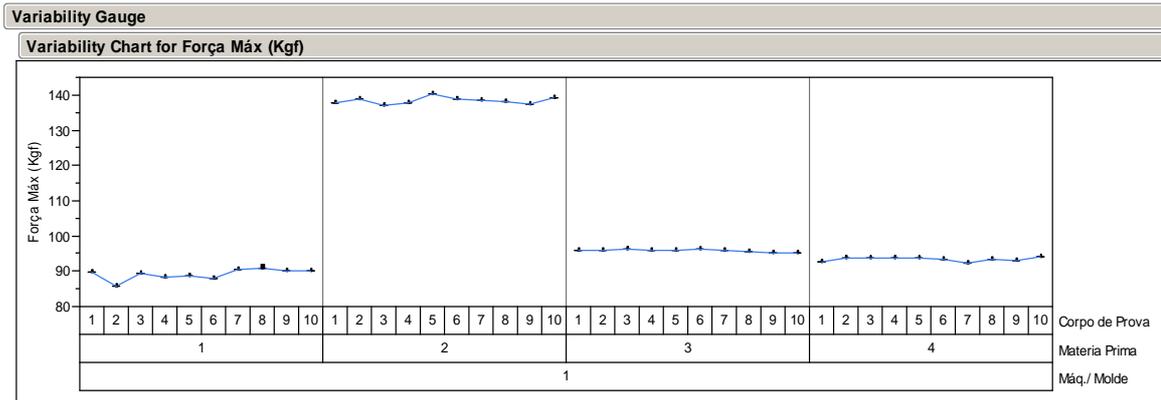


Figura 40 – Gráfico da variabilidade para a Força Máxima: pode-se analisar as dispersões dos resultados obtidos.

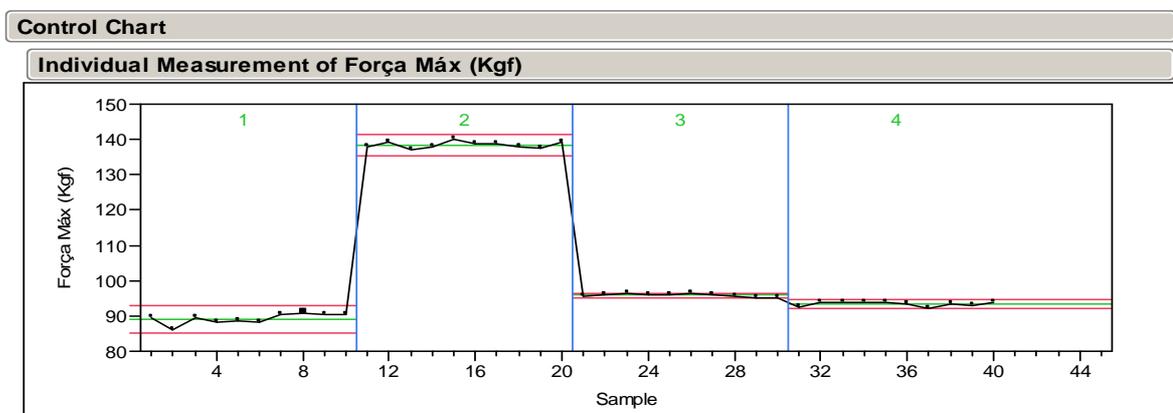


Figura 41 – Gráfico da média para a Força Máxima: nítido equilíbrio entre as blendas e o controle.

Analisando a Figura 40, vemos que a dispersão dos resultados das blendas estudados obedecem a um padrão linear, com baixíssima amplitude amostral. Nas amostras de material virgem (1) e (2) pudemos ver resultados dispersos, com amplitudes relativamente altas. Essa diferença no comportamento entre os dois grupos é mais uma prova da estabilidade estrutural que a adição de material reciclado proporciona à mistura.

Não diferente, o gráfico da média (Figura 41) mostrou-nos o mesmo tipo de comportamento, sempre com as blendas apresentando maior resistência do que nosso controle. Outra característica importante é a baixa amplitude entre os limites superior e inferior de controle, que nos assegura a especificação do material, uma vez que o mesmo não terá grandes vales e/ou picos quando submetido ao esforço exigido no funcionamento do produto.

Dessa forma, temos a Tabela 12, apresentando os resultados finais da análise.

Tabela 12 – Resultado final do Estado da Força Máxima até Ruptura.

Força Máxima (kgf)				
	TIPO MATERIAL / CORPO PROVA	Limite Inferior Controle	Limite Superior Controle	Média
1	PP Cp241 Virgem (Atual)	85,360	93,010	89,19
2	PP H503 Virgem (Antes)	135,310	141,510	138,41
3	PP Cp 241 Com 15%	95,150	96,500	95,83
4	PP Cp 241 Com 10%	91,930	94,800	93,36

Haja vista a especificação de projeto para a força máxima sendo igual a 78,95kgf (774,235N), vemos que todas as amostras atenderam à especificação. Outra informação importante é o resultado da amostra (3) que, com maior percentual de reciclado, obteve o segundo melhor resultado do ensaio. Assim sendo, aprovou-se todas as amostras para efeitos de força máxima até ruptura.

4.4 Resistência ao Impacto

A peça estudada sofre grande estresse durante sua vida útil de funcionamento, porém esse estresse começa ainda no processo produtivo. Por se tratar de uma peça de grande porte e elevada massa, durante o resfriamento, ainda dentro do molde, pode-se ter a criação de zonas de concentração de tensão nos pontos críticos da peça. Essa concentração se deve por diferenças entre os resfriamentos das paredes interna e externa, devido à concentração de massa em certas regiões. Dessa forma, a peça pode apresentar pontos de fragilidade e se quebrar durante sua movimentação no processo produtivo, montagem ou, ainda, funcionamento do produto.

Para contornar esse problema, podem-se realizar algumas manobras como redução de massa em pontos críticos, raiamento do molde nos pontos concentradores de tensão, isto é, eliminando cantos vivos no molde e, por fim, aumentar o tempo de resfriamento, fazendo com que o mesmo se faça de maneira mais gradual. Os dois primeiros são bastante factíveis uma vez que, apesar de não eliminar o problema totalmente, melhora substancialmente o aparecimento das zonas de fragilidade. Na contrapartida, aumentar o tempo de resfriamento faz com que se aumente o ciclo de injeção provocando perda de produtividade. Assim sendo, especifica-se um material de maior resistência ao impacto a fim de compensar esse efeito.

Dessa forma, o material a ser utilizado deve obedecer à critérios estabelecidos em projeto para que se apresente como alternativa válida ao uso na produção. Os resultados obtidos no Ensaio de Impacto realizado são apresentados na Tabela 13. É importante salientar que os resultados serão apresentados em quilograma-força [kgf] para a Força de Ruptura ao Impacto e em milímetros [mm] para a Deformação ao Impacto, ao invés de em Joules [J], como é de costume. Essa escolha se dá pelo fato de todas as especificações de projeto estarem em kgf e mm.

Dos dados obtidos no experimento, plotou-se os gráficos da variabilidade e da média para ambas as grandezas estudadas. Os gráficos são apresentados nas Figuras 42, 43, 44 e 45, respectivamente.

A variabilidade no caso do ensaio de impacto foi fundamental para a análise dos dados. As Figuras 42 e 43 mostram altas amplitudes na amostragem ensaiada. Uma vez que máquina, molde e parâmetros de injeção dos corpos-de-prova são idênticos, podemos ver que simples alterações de temperatura ambiente ou umidade relativa do ar fazem com que apareçam porosidades ou gradientes de temperatura na peça injetada. Isso fará com que tenhamos dados muito dispersos entre si, prejudicando a análise.

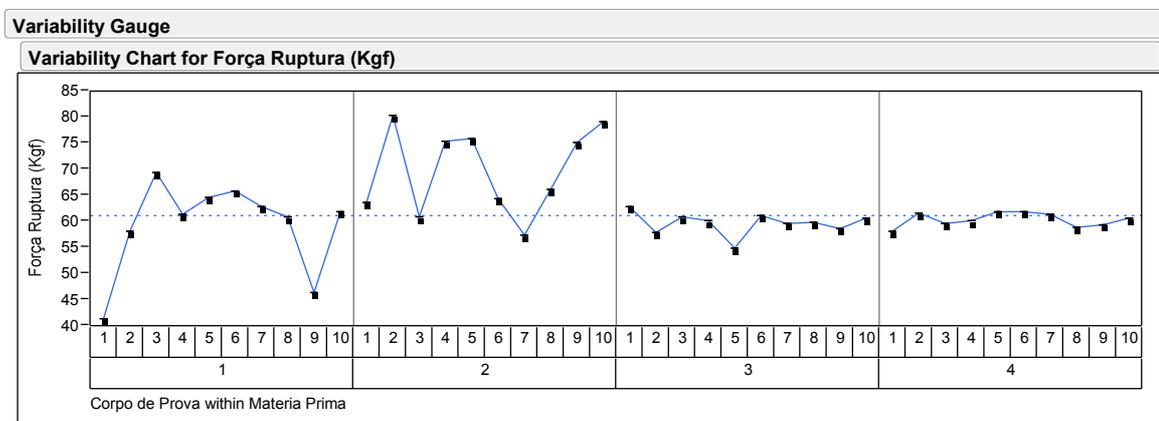


Figura 42 – Variabilidade dos dados para o Ensaio de Impacto, analisando a Força até Ruptura, em kgf.

Tabela 13 – Dados obtidos no Ensaio de Impacto, analisando a força de ruptura ao impacto e a deformação provocada.

Material	Máq./ Molde	Corpo de Prova	Força Ruptura (kgf)	Deformação Ruptura (mm)
PP Cp241 Virgem (Atual) (1)	1	1	41,58	82,45
	1	2	58,36	26,34
	1	3	69,59	233,90
	1	4	61,61	90,32
	1	5	64,73	289,50
	1	6	66,05	318,60
	1	7	63,00	79,28
	1	8	60,99	124,60
	1	9	46,44	318,20
	1	10	61,96	62,05
PP H503 Virgem (Antes) (2)	1	1	63,83	73,05
	1	2	80,61	121,80
	1	3	60,99	80,40
	1	4	75,41	74,86
	1	5	76,10	69,38
	1	6	64,46	64,08
	1	7	57,59	71,69
	1	8	66,26	82,92
	1	9	75,34	71,33
	1	10	79,15	66,34
PP Cp 241 Com 15% de PP (3)	1	1	63,00	31,84
	1	2	57,94	28,93
	1	3	60,92	30,08
	1	4	60,37	21,89
	1	5	55,10	29,89
	1	6	61,34	30,15
	1	7	59,81	33,19
	1	8	59,95	28,34
	1	9	58,77	30,05
	1	10	60,64	39,31
PP Cp 241 Com 10% de PP (4)	1	1	58,36	26,86
	1	2	61,68	57,68
	1	3	59,67	30,74
	1	4	60,16	29,15
	1	5	62,10	30,81
	1	6	62,10	31,12
	1	7	61,41	36,52
	1	8	58,91	29,72
	1	9	59,54	28,20
	1	10	60,85	26,08

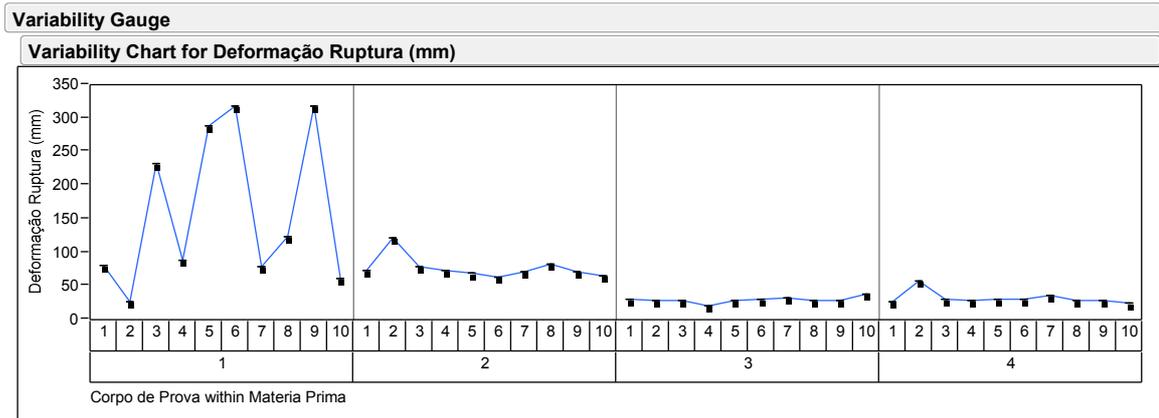


Figura 43 – Variabilidade dos dados para o Ensaio de Impacto, analisando a Deformação até Ruptura, em mm.

Para este estudo foi adotada uma estratégia de análise onde se desprezou os pontos de mínimo e de máximo e consideramos uma média geral de amostragem (linha tracejada da Figura 42). Dessa forma, podemos concluir que as blendas obtiveram resultados muito próximos ao geral, enquanto que o controle (1) ficou ligeiramente acima, porém com duas amostras descartadas.

Para a deformação de ruptura, com exceção das amostras do PP CP241 (1), os demais tiveram uma distribuição uniforme dos resultados. Como era esperado, na média o Copolímero deformou muito mais que os demais, provando sua alta fluidez e ductilidade. O fato mais importante deste ensaio foi concluir que, para efeitos de deformação da peça após impacto, as blendas se comportam muito próximo ao PP H503 (2) que, até então, apresentava resultados muito acima dos demais, mostrando-se um material “superior” quando comparado aos outros três no quesito propriedades mecânicas.

Como dito anteriormente, devido à amplitude da amostragem, a média é menos significativa que a variabilidade, uma vez que a confiabilidade dos resultados é questionável. De qualquer forma, plotou-se os gráficos das médias e os limites superior e inferior de controle para força de ruptura e deformação (Figuras 44 e 45).

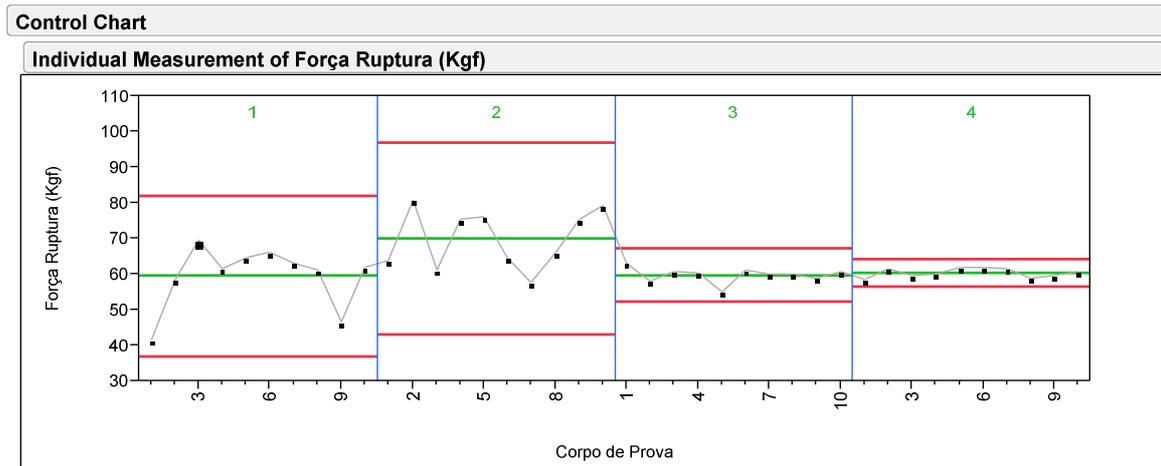


Figura 44 – Média dos resultados obtidos no ensaio de impacto, para força de ruptura, em kgf.

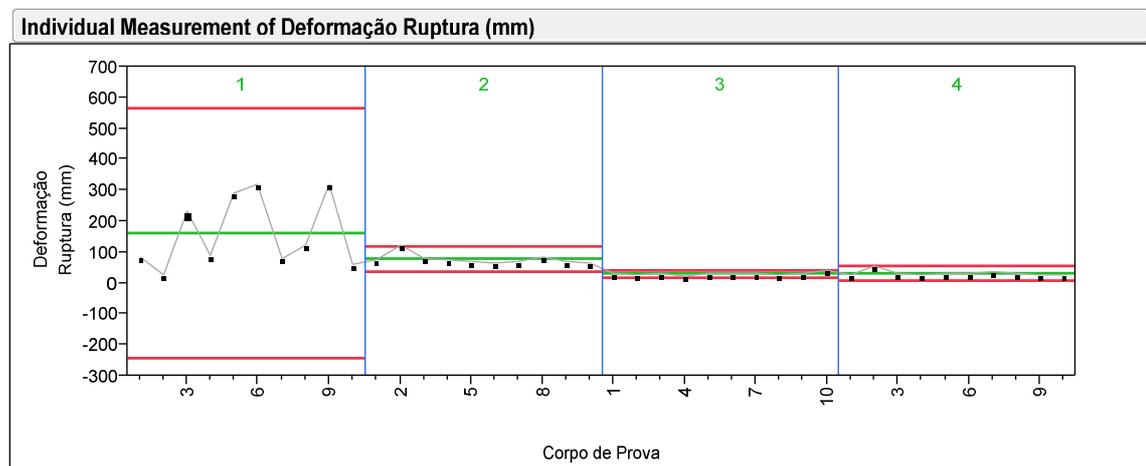


Figura 45 – Média dos resultados obtidos no ensaio de impacto, para deformação até ruptura, em mm.

Analisando os gráficos da média, é importante notar o quão próximos estão as blendas em relação ao H503 (2). Outra importante característica é que ambas as blendas performaram dentro dos limites do H503, mostrando-nos que as blendas são mais indicadas ao uso estudado que os materiais virgens pela estabilidade dos resultados.

Os resultados finais e compilados do ensaio de impacto são apresentados na Tabela 14 e Tabela 15, para força de ruptura e deformação.

Por outro lado, as blendas tanto com 10% como com 15% de reciclado atenderam perfeitamente as especificações de força e deformação. Esta última, devido aos baixos limites encontrados, mostra que melhoramos utilizando as blendas. Logo, para efeitos de resistência ao impacto, aprovam-se as blendas (3) e (4).

Tabela 14 – Resultados finais do Ensaio de Impacto, considerando Força de Ruptura.

Força de Ruptura (kgf)				
	TIPO MATERIAL / CORPO PROVA	Limite Inferior Controle	Limite Superior Controle	Média
1	PP Cp241 Virgem (Atual)	37,110	81,752	59,43
2	PP H503 Virgem (Antes)	42,920	97,028	69,97
3	PP Cp 241 Com 15%	52,452	67,116	59,78
4	PP Cp 241 Com 10%	56,670	64,286	60,48

Tabela 15 - Resultados finais do Ensaio de Impacto, considerando Deformação de Ruptura.

Deformação até Ruptura (mm)				
	TIPO MATERIAL / CORPO PROVA	Limite Inferior Controle	Limite Superior Controle	Média
1	PP Cp241 Virgem (Atual)	0,000	567,211	162,5
2	PP H503 Virgem (Antes)	35,669	119,501	77,59
3	PP Cp 241 Com 15%	18,737	41,997	30,37
4	PP Cp 241 Com 10%	9,894	55,482	32,69

4.5 – Teste de Injeção

Após todos os ensaios com os corpos-de-prova, foi realizada a última etapa do processo de aprovação – a injeção das peças com as duas blendas estudadas, com 10% e 15% de adição de polipropileno reciclado.

Este teste teve a finalidade de garantir a manufaturabilidade das propostas e, principalmente, a fidelidade dimensional das peças injetadas com os respectivos materiais.

Para este teste, foi utilizado a injetora Battenfeld de 1250ton (Figura 46), cujas especificações segue na Tabela 16.



Figura 46 – Máquina injetora utilizada no teste de injeção.

Tabela 16 – Principais características da Máquina Injetora utilizada.

Característica	Unidade	Valor
Força de fechamento	t	1250
Curso de abertura	mm	1400
Diâmetro do parafuso de injeção	mm	125
Razão de Injeção	L/D	20
Curso máximo de injeção	mm	500
Volume máximo de injeção	cm ³	6200
Pressão do sistema	bar	180

Do teste, chamado de try-out, extraímos 50 peças de cada mistura a fim de avaliarmos as condições e parâmetros de injeção e ainda avaliarmos possíveis impactos nas cotas críticas, conforme Figura 47.

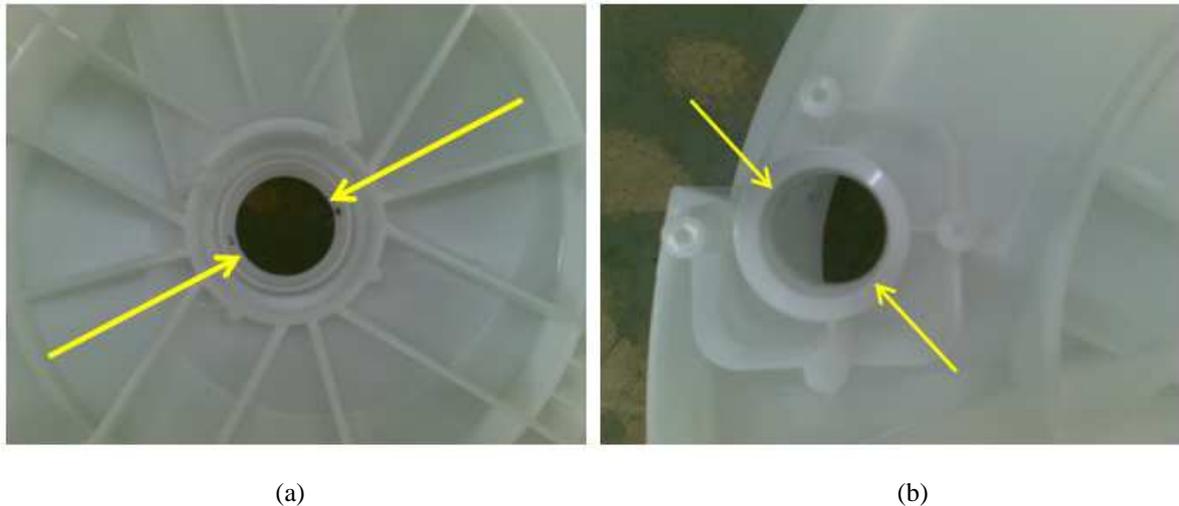


Figura 47 – Cotas críticas analisadas no ensaio dimensional. (a) Diâmetro do alojamento do retentor. (b) Diâmetro do alojamento da bomba.

Os resultados da análise dimensional são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da análise dimensional.

COMPARATIVO CARTA DE CONTROLE			
Características Dimensionais			
Característica Crítica	Limite Inferior Controle	Limite Superior Controle	Média
Diâmetro Alojamento Retentor	62,890	63,150	63,005
Diâmetro Alojamento Bomba	34,650	35,050	34,860

Outro ponto importante e inesperado foi a redução dos tempos de ciclo de injeção obtidos. As misturas (3) e (4), por terem apresentado menor variabilidade amostral em todos os testes mecânicos, pôde-se reduzir em 10% o tempo de resfriamento da peça e garantindo a especificação desejada.

Dessa forma, pode-se confirmar que a adição do material reciclado não afeta o dimensional da peça, garantindo capacidade de processo.

5. CONCLUSÕES

Após todos os ensaios realizados, os dados levantados e toda análise concluída, fica evidente as diferenças entre os materiais estudados e como pôde-se alterar as propriedades mecânicas dos polímeros através da adição do material reciclado.

A princípio, temos o material anteriormente utilizado, o polipropileno homopolímero PP H503, que foi muito superior aos demais em todos os ensaios, mostrando ser um material muito nobre para a aplicação, sendo sua aplicação superdimensionada para a injeção da peça em estudo.

Na outra extremidade temos o polipropileno copolímero PP CP241, que era, até então, o material utilizado na injeção do tanque. O que pudemos ver é que suas propriedades são muito instáveis, sendo suscetíveis a inúmeras variáveis de processo, o que ocasionavam grandes amplitudes na amostragem desse material.

A adição do polipropileno reciclado ao PP CP241 tanto em 10% como em 15%, proporcionou uniformidade dos resultados e estabilização das propriedades mecânicas na mistura, sendo menos suscetíveis a fatores externos como temperatura e umidade do ambiente. Assim sendo, as blendas foram sempre superiores ao material virgem e, ainda, propiciaram ganho de ciclo da máquina. Este ganho girou em torno de 10%, gerando ganho em eficiência e produtividade da peça.

Dessa forma, aprovou-se a utilização da blenda (3) – PP CP241 + 15% Reciclado – na fabricação das peças. Essa aprovação gerou ganhos em três frentes:

- 1) Econômica: deixamos de vender o material residual e começamos a consumi-lo internamente no processo produtivo. Outro ponto é que compra-se menos matéria-prima virgem, gerando ganhos em insumos para a fabricação;
- 2) Produtividade: pela estabilização alcançada, pôde-se reduzir o ciclo de injeção na ordem de 10%, tendo ganho de produtividade, isto é, injeta-se 10% mais peças no mesmo tempo. Outro fator importante que auxiliou na produtividade foi a estabilidade dimensional, reduzindo a incidência de peças rejeitadas.
- 3) Ambiental: Além de não se descartar o material no meio ambiente ainda compra-se menos matéria-prima, reduzindo o consumo de derivados do petróleo e a emissão dos gases estufa, mesmo que de maneira discreta.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. **O plástico na Prática**. 1. ed. Porto Alegre: Editora Sangra Luzzatto, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-94b**: Standard test method for tensile properties of plastic. Philadelphia, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6110**: Standard test method for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastic. Philadelphia, 1994.

Brasken - Industria Brasileira de Polímeros - www.braskem.com.br, Abril, 2009.

Battenfeld GmbH - <http://www.battenfeld.com>, Novembro, 2008.

CALLISTER Jr., W. D., **Fundamentals of Materials Science and Engineering a Interactive**. John Wiley & Sons, Inc: New York, 2001.

CANEVAROLO Jr., S. V., **Técnicas de caracterização de polímeros**. Artliber Editora: São Paulo, 2004.

Catálogo de Informações Técnicas sobre o Polipropileno Prolen – Polibrasil - Revisão 1” - Dezembro, 1999.

EGGLESTONE, Mark - **Amoco Chemicals. Polypropylene - Stability in the storm**. Houston: CMAI 10 th. World Petrochemical Conference, 1995.

Engineered Materials Handbook Vol. 2: **Engineering Plastics Handbook**: ASM Publication, 1988.

HARADA, J. **Moldagem por injeção: Projetos e Princípios Básicos**. 1.ed. São Paulo: Medialdea, 1991.

Indústrias Romi S.A. - www.romi.com.br, Maio, 2010.

LIEBERMAN, R. B., BARBE, P. C. **Propylene polymers** - In: Mark, H.F. et al **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. 2. ed., New York: John Wiley and Sons, 1989.

MICHAELI, W.; GREIF, H.; KAUFMANN, H.; VOSSEBÜRGER, F.J. **Tecnologia dos Plásticos**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

MANRICH, S.. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. 1.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

OLIVEIRA, A. J. D. **Caracterização Mecânica e Reológica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.

Revista Eletrônica Plástico Moderno - <http://www.plastico.com.br>, Abril, 2009.

Sindicato dos Trabalhadores nas Indústrias Químicas - <http://www.sindiquimicos.org.br>, Maio, 2010.

STRONG, B. A. **Plastics Materials and Processing**, 2. ed., New Jersey: Prentice Hall, 2000.

TROMBINI, R. C. **Desenvolvimento e Caracterização de Composições Polipropileno/Cargas Retardantes de Chama**. 2004. 196 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.