UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos

Autor: Carlos Anibal De Blasio
Orientadora: Cecília A.Carvalho Zavaglia

52/2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos

Autor: Carlos Anibal De Blasio
Orientadora: Cecília Amélia De Carvalho Zavaglia

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007
S.P . – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

De Blasio, Carlos Anibal
B612s Solução de defeitos na moldagem por injeção de termoplásticos. / Carlos Anibal De Blasio. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Termoplásticos. 2. Moldagem por injeção de plástico. 3. Controle hidráulico. 4. Inteligência artificial. I. Zavaglia, Cecília Amélia de Carvalho. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: To surface defects on thermoplastic injection moulded parts solution
Palavras-chave em Inglês: Plastics, molding for injection, Control for closed mesh, Artificial intelligence
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Célia Marina de Alvarenga Freire e Necésio Gomes Costa
Data da defesa: 29/06/2007
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos

Autor: Eng.Carlos Anibal De Blasio
Orientadora: Profª.Dra.Cecília Amélia De Carvalho Zavaglia

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Cecília A C Zavaglia

Profª. Dra.Cecília A.C.Zavaglia
Universidade Estadual de Campinas DEMA/FEM

Prof. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire
Universidade Estadual de Campinas DEMA/FEM

Prof. Dr. Necésio Gomes Costa
Universidade Federal de Itajubá UNIFEI

Campinas, 29 de Junho de 2007

2007516020

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

À Profª. Dra. Cecília Amélia De Carvalho Zavaglia, por esta oportunidade, a mais importante de minha carreira profissional, pela orientação, suporte técnico e científico, desde o início deste trabalho, valorizando e melhorando cada etapa.

Ao Prof. Dr. Helder Anibal Hermini, que no início, teve a percepção de me direcionar para a área de melhor aproveitamento, dentro do departamento de Engenharia Mecânica, transmitindo sempre apoio e confiança.

À Profª. Dra. Célia por ter me convidado a apresentar seminários para o curso de graduação da Unicamp, os quais proporcionaram importante desenvolvimento nas pesquisas e no apromoramento do material de trabalho.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia de Materiais, pela ajuda e compreensão durante este período.

A idéia da " Melhoria Contínua "
na família
e no trabalho.

Resumo

De Blasio, Carlos Anibal, *Solução de defeitos na moldagem por injeção de termoplásticos*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 150 p. Dissertação (Mestrado)

Neste trabalho foi feito um levantamento das principais causas e soluções dos defeitos que ocorrem na transformação de polímeros pelo processo de moldagem por injeção. Foram discutidos os parâmetros de preparação e regulagem dos equipamentos envolvidos no processo levando em consideração o projeto do produto auxiliado por software, bem como tipos de máquinas injetoras, tipos de moldes, roscas para processamento, definições dos parâmetros de processo e suas implicações no produto fabricado.

Foi feita uma abordagem dos defeitos típicos que aparecem nos produtos injetados sob o ponto de vista tecnológico e criadas tabelas com os principais defeitos de injeção, facilitando a visualização de suas causas e soluções para evitá-los.

O software ”moldflow” foi utilizado como alternativa para simular o processo de injeção, em três estudos de casos, mostrando-se uma ferramenta eficiente para a prevenção de defeitos de injeção.

Palavras Chave.

Termoplásticos, moldagem por injeção, controle por malha fechada e inteligência artificial.

Abstract

De Blasio, Carlos Anibal, *To surface defects on thermoplastic injection moulded parts solution*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 150 p. Dissertation (Post graduated)

In this work it was made a rising of the main causes and solutions of the defects that happen in the transformation of polymers for the molding process for injection. The preparation parameters and tuning of the equipments were discussed involved in the process taking into account the project of the product aided by software, as well as types of injection molding machines, types of molds, screws for processing, definitions of the process parameters and their implications in the manufactured product.

It was made an approach of the typical defects that they appear in the injected products under the technological point of view and maids tables with the main injection defects, facilitating the visualization of their causes and solutions to avoid them.

The software "moldflow" was used as alternative to simulate the injection process, in three case studies, being shown an efficient tool for the prevention of injection defects.

Words Key.
Plastics, molding for injection, control for closed mesh and artificial intelligence

Índice

Lista de Figuras xiv

Lista de Tabelas xix

Nomenclatura xx

Lista de Símbolos xxii

1. Introdução 1

1.1. Objetivo 5

2. Reologia de Polímeros 6

2.1. Materiais Não Ideais 12

2.2. Reologia Durante o Processo de Transformação de Polímeros 20

2.2.1. Forma de Macromoléculas e Relaxação 21

2.2.2. Viscosidade em Processo de Cisalhamento 23

2.2.3. Viscosidade em Processo de Alongamento 23

2.2.4. Evolução das Tensões até Cisalhamento Permanente 24

2.2.5. Relaxação de Tensões após Interrupção Imediata de Cisalhamento 25

2.2.6. Decaimento das Tensões 26

2.2.7. Fluxo Após Atuação de Tenções 26

2.3. Preenchimento Orientado do Polímeros Fundido 28

3. Injeção de Termoplásticos 32

3.1. Máquinas Injetoras 34

3.2. Ciclo de Injeção 35

3.3. Moldes de Injeção 36

3.3.1. Moldes com Canais Quentes 37

3.3.2. Funcionamento do Molde 38

3.3.3. Preenchimento no Molde de Injeção 38

3.3.4. Estágios do Preenchimento do Molde 39

3.3.5. Pressão Exercida pelo Pistão 40

3.3.6. Pressão de Injeção 41

3.3.7. Perda da Pressão ao Longo da Cavidade do Molde 41

3.4. Rosca 41

3.4.1. Zonas da Rosca Injetora 42

3.4.2. Variação de Temperatura na Rosca de Injeção 43

3.4.3. Roscas com degasagem 44

3.4.4. Projetos de Rosca por Computador 44

3.5. Detalhes do Pocesso de Injeção 45

3.5.1. Fusão do Polímero para Injeção no Molde 45

3.5.2. Controle do Processo de Injeção 46

3.5.3. Propriedade da Injetora 46

3.5.4. Controle das Temperaturas das Zonas de Aquecimento na Injetora 48

3.5.5. Contrapressão para Plastificação na Rosca Injetora 49

3.5.6. Rotações da Rosca 50

3.5.7. Preenchimento da Cavidade do Molde 51

3.5.8. Pressurização do Polímero dentro da Cavidade 55

3.5.9. Contração em Peças Injetadas 56

3.6.10. Controle do Ciclo de Injeção 58

3.6.11. Propriedade do Polímero Acabado em Função da Estrutura Molecular 60

4. Discussão das Variáveis 61

4.1. Defeitos de Moldagem na Injeção dos Plásticos 61

4.1.1. Temperaturas 62

4.1.2. Pressões 63

4.1.3. Tempos e Velocidades 65

4.2. Exemplos de Defeitos em Peças Injetadas 65

4.2.1. Estrias Marrons 65

4.2.2. Pontos Pretos 66

4.2.3. Efeito Diesel ou Carbonização da Frente de Fluxo 67

4.2.4. Delaminação 67

4.2.5. Vazios e Rechupes 68

4.2.6. Linhas de Solda 69

4.2.7. Rebarbas 70

4.2.8. Esguichamento 70

4.2.9. Estrias Prateadas 71

4.2.10. Manchas de Queimado 72

4.2.11. Manchas de Umidade 73

4.2.12. Manchas de Cor 74

4.2.13. Manchas Brilhantes 75

4.2.14. Jateamentos e Marcas de Fluxo 76

4.2.15. Efeito Casca de Laranja 77

4.2.16. Peças Incompletas ou Falhadas 78

4.2.17. Manchas Próximas ao Ponto de Injeção 79

5. Materiais e Métodos 81

5.1. Mold Flow 82

5.1.1. Análise do Resfriamento da Peça em Função
do Sistema de Refrigeração Utilizado 82
5.1.2. Análise da Simulação do Preenchimento e Recalque da Peça,
Incluindo a Análise de Balanceamento de Canais 84
5.1.3. Análise das Características Dimensionais tais como Deflexação e Contração
da Peça após a Injeção, além de Identificar as Causas do Empenamento da Peça 86
5.1.4. Análise dos Efeitos do Fluxo de Plásticos na Orientação das Fibras 87
5.1.5. Análise Estrutural dos Níveis de Tensionamento e Deflexões 87
5.1.6. Análise da Injeção com Gás 87
5.1.7. Análise das Contrações em Função da Geometria 88
5.1.8. Análise da Fusão dos Resultados 88
5.1.9. Análise em Peças de Parede Grossa 89
6. Resultados 90
6.1. Introdução 90
6.2. Tabela de Defeitos 91
6.3. Estudos de Casos 94
6.3.1. Estudo de Caso 1 94
6.3.2. Estudo de Caso 2 104

6.3.3. Estudo de Caso 3 113

7. Conclusões 118

Referências Bibliográficas 119

Lista de Figuras

Figura 2.1. Forças em um elemento. 7

Figura 2.2. Forças de cisalhamento atuando num elemento 9

Figura 2.3. Classe de fluido independentes do tempo , não Newtoniano (Viscoinelásticos) 14

Figura 2.4. Orientação e equilíbrio de cones em um líquido Newtoniano 14

Figura 2.5. Orientação de macromoléculas em um líquido Newtoniano sob cisalhamento 15

Figura 2.6 Fluido tixotrópico (η x t) e $\partial\eta$ / ∂t x t 17

Figura 2.7. Comportamento de um fluido tixotrópico idealizado, para condições de $\dot{\gamma}$ continuamente crescente e decrescente: τ x $\dot{\gamma}$ 18

Figura 2.8. Substância tixotrópica 19

Figura 2.9. Substância reopéxica 19

Figura 2.10. Comportamento tixotrópico - reopéxico 19

Figura 2.11. a) Tensionada ; b) relaxando 21

Figura 2.12. Macromolécula (a) na ausência de gradiente de velocidade; (b) na presença de gradientes de velocidade 22

Figura 2.13. Esquema do fluxo da evolução das tensões 24

Figura 2.14. Relaxação de tensão após um súbito cisalhamento 25

Figura 2.15. Módulo de relaxação x tempo (polímero fundido) G (Pa) e t(s) 26

Figura 2.16. Fluxo de relaxação de tensão 26

Figura 2.17. Tensão x tempo e deformação x tempo 27

Figura 2.18. Perfil de velocidade laminar no pseudoplástico 28

Figura 2.19. Orientação molecular em direção ao final do preenchimento 29

Figura 2.20 Caminhos de fluência 30

Figura 2.21. Desenho de Cantos 31

Figura 3.1. Esquema do ciclo de injeção 36

Figura 3.2. Estágios do preenchimento do molde 40

Figura 3.3. Modelo de injetora 45

Figura 3.4. Rotação da rosca alterando a viscosidade e a temperatura do polímero fundido 51

Figura 4.1. Defeitos tipo estrias marrons 66

Figura 4.2. Defeitos tipo pontos pretos 67

Figura 4.3. Defeitos tipo efeito Diesel 67

Figura 4.4. Defeito tipo Delaminação 68

Figura 4.5. Defeitos dos tipos vazios e rechupes 69

Figura 4.6. Defeito tipo linha de solda 70

Figura 4.7. Defeito do tipo rebarba 70

Figura 4.8. Defeito do tipo esguichamento 71

Figura 4.9. Defeito do tipo estrias prateadas 72

Figura 4.10. Defeito do tipo Manchas de Queimado 73

Figura 4.11. Defeito do tipo Manchas de Umidade 74

Figura 4.12. Defeito do tipo Manchas de Ar 75

Figura 4.13. Defeito do tipo Manchas de Fibra de Vidro 75

Figura 4.14. Defeito do tipo Marcas de Fluxo 76

Figura 4.15. Defeito do tipo Cascas de Laranja 78

Figura 4.16. Defeito do tipo Peça Incompleta 79

Figura 4.17. Defeito Manchas próximas ao Ponto de Injeção 80

Figura 5.1. Desgaste do anel de bloqueio monitorado por I.A. 81

Figura 6.1. Sugestão do ponto de entrada do material 96

Figura 6.2. Informação ao software do polímero utilizado HIPS 97

Figura 6.3. Sugestão do software das temperaturas do molde e de injeção 97

Figura 6.4. Sugestão do softwarw do tempo de injeção (100% de preechimento) 98

Figura 6.5. Simulação do início do preenchimento do molde 98

Figura 6.6. Simulação da continuação do preenchimento 1,09s 99

Figura 6.7. Simulação da continuação do preenchimento 1,64 s 99

Figura 6.8. Simulação do final do preenchimento para 1,84 s 100

Figura 6.9. Fotografia mostrando o preenchimento completo da peça 100

Figura 6.10. Alteração do tempo de injeção para 7,72 s (18% de preenchimento) 101

Figura 6.11. Simulação da continuação do preenchimento 1,54 s 101

Figura 6.12. Simulação da continuação do preenchimento 4,83 s 102

Figura 6.13. Simulação da continuação do preenchimento 6,95 s 102

Figura 6.14. Simulação do final do preenchimento para 7,72 s 103

Figura 6.15. Fotografia mostrando o preenchimento incompleto da peça 103

Figura 6.16. Fotografia mostrando o preenchimento incompleto da peça com aumento da pressão de injeção 103

Figura 6.17. Desenho tapete vista 1 104

Figura 6.18. Desenho tapete vista 2 104

Figura 6.19. Posicionamento do ponto de injeção 105

Figura 6.20. Análise do preenchimento 1 105

Figura 6.21. 2x pontos de injeção 106

Figura 6.22. Análise de preenchimento 2 106

Figura 6.23. 3x pontos de injeção 106

Figura 6.24. Análise de preenchimento 3 106

Figura 6.25. 4x pontos de injeção 107

Figura 6.26. Análise de preenchimento 4 107

Figura 6.27. Pontes nas ranhuras – vista 1 107

Figura 6.28. Pontes nas ranhuras – vista 2 107

Figura 6.29. Análise com 1x ponto 108

Figura 6.30. Análise com 4x pontos 108

Figura 6.31. Eliminação de ranhuras – vista 1 108

Figura 6.32. Eliminação de ranhuras – vista 2 108

Figura 6.33. Análise com 1x ponto 109

Figura 6.34. Análise com 2x pontos 109

Figura 6.35. Análise com 3 x pontos 109

Figura 6.36. Análise com 4 x pontos 109

Figura 6.37. Análise com condições maximizadas 110

Figura 6.38. Permanência do ponto crítico 110

Figura 6.39. Formato plano borda 5 mm – vista 1 111

Figura 6.40. Formato plano borda 5 mm – vista 2 111

Figura 6.41. Localização do ponto de injeção 111

Figura 6.42. Preenchimento total 111

Figura 6.43. Tempo de preenchimento 2,98 s 112

Figura 6.44. Diferença de pressão 0 – 100 mPa 112

Figura 6.45. Preenchimento acima de 170ºC 112

Figura 6.46. Presença de emendas 0,01 mm 112

Figura 6.47. Pontos com problemas de resfriamento 113

Figura 6.48. Desvio no caminho de fluência 113

Figura 6.49. Corpos de prova com cantos vivos e arredondados 114

Figura 6.50. Temperaturas durante o preenchimento, esp 2,0 mm 114

Figura 6.51. Temperaturas durante o preenchimento, esp 1,0 mm 115

Figura 6.52. Tempo de preenchimento 1,44 s 116

Figura 6.53. Sugestão ponto de injeção 116

Figura 6.54. Temperaturas durante o preenchimento com ponto de injeção alterado 117

Figura 6.55. Tempo de preenchimento 0,8 s 117

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Variação da resistência ao impacto do Poliestireno de Alto Impacto, moldado por injeção 29

Tabela 6.1. Contração da peça, chupagem e / ou bolhas internas 91

Tabela 6.2. Linhas de solda- contração oriunda da má união entre fluxos de material 92

Tabela 6.3. Rebarbas 92

Tabela 6.4. Deformação e empenamento da peça moldada 93

Tabela 6.5. Sinais de queima ou decomposição térmica 93

Tabela 6.6. Marcas de fluxo 94

Tabela 6.7. Parâmetros do processo 95

Nomenclatura

POLÍMEROS	Abreviaturas
* Acrilonitrila-Butadieno-Estireno	**ABS**
* Acetato de Celulose	**CA**
* Acetato Butirato de Celulose	**CAB**
* Acetato Propinato de Celulose	**CAP**
* Álcool Polivinílico	**PVA**
* Caseína	**CS**
* Epóxi	**EP**
* Etileno-Vinil-Acetato	**EVA**
* Etileno-Propileno-Fluorado	**FEP**
* Estireno-Acrilonitrila	**SAN**
* Fenol-Formaldeído	**PF**
* Nitrato de Celulose	**CN**
* Melamina-Formaldeído	**ME**
* Poliamida	**PA**
* Estireno-Polibutadieno-Estireno	**SBS**
* Policarbonato	**PC**
* Poliacetato de Vinila	**PVAC**
* Policloreto de Vinila	**PVC**
* Policloreto de Vinila Clorado	**CPVC**
* Policloreto de Vinilideno	**PVDC**
* Polifluoreto de Vinilideno	**PVF_2**
* Polietileno Baixa Densidade	**LDPE**
* Polietileno Alta Densidade	**HDPE**
* Polietileno Ultra Alto Peso Molecular	**UHMWPE**
* Polietileno Tridimensional (reticulado)	**XLDPE**
* Polibutileno Tereftalato	**PBT**
* Polietileno Tereftalato	**PET**
* Polimetil – Metacrilato	**PMMA**
* Polioximetileno (Poliacetal)	**POM**

* Polipropileno	**PP**
* Poliestireno de Alto Impacto	**HIPS**
* Poliestireno Cristal (PS)	**GPPS**
* Poliestireno Expandido	**EPS**
* Politetrafluoretileno	**PTFE**
* Polioxifenileno	**PPO**
*Poliimida	**PI**
* Poliisobutileno	**PIB**
* Poliisopreno	**PIS**
* Poliuretano (RIM, SMC, BMC, espumas,...)	**PUR**
* Poliuretano Termoplásticos	**TPU**
* Polivinil-Butiral	**PVB**
* Poliéster (insaturado)	**UP**
* Uréia-Formaldeído	**UF**
* Polisulfona	**PSu**
* Poliéter Sulfona	**PES**
* Polisulfeto de Fenileno	**PPS**
* Poliaril Sulfona	**PAS**
* Poliamida-Imida	**PAI**
* Poli-para-xilileno	**PPX**
* Etileno-Tetrafluoretileno	**ETFE**
* Estireno-Acrilonitrita esteracrílico	**ASA**
* Metacrilato Butadieno Estireno	**MABS**
* Polietileno Clorado	**CPE**
* Polibenzimidazol	**PBI**

Lista de símbolos

τ =	Tensão de Cisalhamento
s =	Espessura da parede
aeff =	Difusividade térmica
Tm =	Temperatura de injeção
Tw =	Temperatura do molde
Te =	Temperatura de desmoldagem máxima
F =	Força
A =	Área
$\dot{\gamma}$ =	Taxa de cisalhamento
d =	Distância
V_X =	Variação de velocidade
t =	Tempo
γ =	Deformação
η =	Viscosidade
G =	Módulo de cisalhamento ou módulo de rigidez
E =	Módulo de Young
K=	Módulo de compressibilidade
Φ =	Fluidez
T =	Temperatura
η_a =	Viscosidade não Newtoniana
λ =	Tempo de relaxação
$\eta(\dot{\gamma})$	Viscosidade em regime permanente de cisalhamento
$\bar{\eta}\dot{\varepsilon}$ =	Viscosidade em regime permanente de alongamento
ρ =	densidade
C_i =	Capacidade de injeção
V =	Volume
C_p =	Capacidade de plastificação
c =	Calor específico
P_{INJ} =	Pressão de injeção
P_{REC} =	Pressão de recalque
P_{cav} =	Pressão de cavidade
F_f=	Força de fechamento
$P_{hidráulica}$=	Pressão hidráulica
T_G =	Transição Vítrea

P =	Potência da bomba
Hmt =	Altura manométrica total
h=	Rendimento da bomba(%) - valor definido pelo fabricante
s =	Espessura de parede
aeff =	Difusividade térmica
NR =	Número de Reynolds
[v]=	Módulo da velocidade média de escoamento para frente
D=	Diâmetro do tubo
T 3 =	Temperatura de saída da água
T 4=	Temperatura de entrada da água
m=	Massa de material plástico injetado por hora no molde
a =	Conteúdo total de calor do material plástico
k=	Canais de resfriamento perfurados na placa da cavidade ou no núcleo dos machos
m2 =	Massa de água circulada

Capítulo 1

Introdução

A utilização cada vez maior de materiais poliméricos, torna o estudo do processamento desses materiais muito importante.

Um dos processos mais versáteis em transformação e processamento de polímeros é a moldagem por injeção.

Na moldagem por injeção, grânulos do polímero são comprimidos por um pistão ou rosca, aquecidos até serem moldados e injetados dentro do molde e fechado sob pressão. O polímero é esfriado abaixo da temperatura de transição vítrea T_G, o molde é aberto e o produto é ejetado. Uma quantidade em excesso de polímero é injetada para compensar a contração do molde. As moléculas do polímero são orientadas paralelas à direção do fluxo durante a injeção, fornecendo um reforço útil, porém ocorre anisotropia nas propriedades mecânicas. O processo fornece moldagens com alta precisão, pois o polímero esfria ainda sob pressão e devagar. As temperaturas típicas de moldagem por injeção de termoplásticos estão entre 150-350ºC e as pressões são acima de 120 MPa (ASHBY; JONES,1988).

A injeção é o principal processo de fabricação de peças de plástico. Cerca de 70% de todas as máquinas de processamento de plásticos são injetoras. Com elas podem ser fabricadas peças desde miligramas até vários quilogramas.

O processo de injeção é adequado para a produção em grande escala, uma vez que a matéria-prima pode ser transformada em peça pronta em uma única etapa. Ao contrário da fundição de metais e da prensagem de termofixos e elastômeros, na injeção de termoplásticos com moldes de boa qualidade, peças com geometrias complexas podem ser moldadas sem rebarbas.

A rentabilidade do processo é indicada pelo número de peças produzidas por unidade de tempo, o que depende do tempo de resfriamento da peça no molde, que por sua vez depende da espessura da parede da peça. O tempo de resfriamento cresce com o quadrado da espessura da parede conforme equação 1. Por motivos econômicos, é rara a produção de peças com grandes espessuras de parede (acima de 8 mm).

$$t = \frac{s^2}{\pi^2 aeff} \ln \left[\frac{4}{\pi} \frac{Tm - Tw}{Te - Tw} \right] \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde: t – tempo de resfriamento (s)
s - espessura da parede (mm)
aeff –difusividade térmica (mm²/s)
Tm – temperatura de injeção (ºC)
Tw – temperatura do molde (ºC)
Te – temperatura de desmoldagem máxima (ºC)

Pode-se listar algumas características vantajosas da moldagem por injeção de termoplásticos: passagem direta do material fundido para a peça pronta; quase não é necessário nenhum acabamento na peça; elevada reprodutividade da peça; elevada qualidade da peça (MICHAELI, et al,1992).

O processo por injeção possue diversas técnicas, sendo: injeção convencional, injeção a gás, injeção com água, a microinjeção, injeção por compressão, injeção por transferência, injeção de espumas estruturais, injeção de peças com superfície estruturadas, injeção rápida e injeção de

peças com paredes muito finas, injeção com decoração direta no molde, injeção de peças com núcleo fundidos, múltipla injeção ou co-injeção (neste caso, deve ser feita uma análise de temperaturas e calorimetria dos materiais moldados, para constatação da afinidade entre ambos) (EDWARDS, et al, 2003) .

De maneira sucinta, a injetora utilizada no processamento de polímeros é composta por:

- Um sistema capaz de homogeneizar e injetar o polímero fundido: rosca recíproca mantida por sistemas mecânicos, elétricos, pneumáticos e/ou hidráulico; o cilindro que contém em seu interior a rosca recíproca e resistências elétricas para aquecer o cilindro e conseqüentemente transmitir calor ao polímero.
- O molde, que deve ser capaz de dar forma ao polímero fundido, sendo que, o mesmo é injetado para o seu interior sob alta pressão e velocidade controlada; ele é capaz de gerar o resfriamento do produto através de fluidos que circula no seu interior, e possui um mecanismo capaz de extrair a peça acabada após a abertura.

Existe um grande número de problemas que ocorrem dia a dia na moldagem por injeção, uns mais fáceis de serem resolvidos, outros mais difíceis.

A solução de problemas onde poucas variáveis estão envolvidas são mais simples; na injeção, um grande número de variáveis interferem na moldagem, sendo difícil relacionar a causa específica que está provocando um determinado problema.

Normalmente, o controle de qualidade das peças obtidas na moldagem por injeção é feito pelo próprio operador da máquina, que faz a primeira checagem em termos de aparência da peça.

Nesta primeira avaliação, o operador verifica itens como enchimento do molde, deformações, manchas, rebarbas, pontos pretos, delaminação, etc. Existem peças cuja aparência é o fator preponderante, neste caso qualquer defeito é motivo de reprovação da mesma; em outros casos, um ou outro defeito não é motivo para reprová-las (KANG, JAYARAMAN, 2002).

No caso de termoplásticos, as peças reprovadas podem ser moídas e o produto moído deve voltar para o processo, misturado com grânulos virgens, por questões econômicas.

A maioria das empresas de injeção possue equipes especializadas no controle de qualidade; geralmente, o controle é feito por amostragem, previamente definida nos métodos de análise. Neste caso o controle não se limita apenas na aparência, são bem mais abrangentes.

A estabilidade dimensional é um fator dos mais importantes na moldagem de peças por injeção, principalmente aquelas que passarão por processos de montagem, colagem ou encaixe; são analisados em equipamentos apropriados, e determinam se a peça está dentro dos parâmetros dimensionais projetados.

Algumas peças também são submetidas à caracterização mecânica, cujo objetivo é determinar seu desempenho quando sujeitas a alguma deformação, principalmente aquelas que serão usadas como engrenagem, suportes, batedores, etc.

É de grande importância o controle do material recuperado (moído). O moinho deve ser bem limpo antes da moagem; peças contaminadas com graxa, óleo, resíduos de pintura, insertos metálicos, papel, etc, deverão ser eliminadas; pedaços grandes provenientes do moinho devem ser separados, pois podem interromper a alimentação da injetora; também o pó resultante desta operação deve ser peneirado, pois podem degradar-se facilmente no cilindro, comprometendo a peça moldada, sendo o ideal, que o material moído tenha o mesmo tamanho dos grânulos virgens.

Qualquer peça injetada poderá ser submetida a qualquer tipo de controle, o que define isto é o tipo de peça, sua aplicação e o desempenho esperado.

Problemas de moldagem mais comuns: estrias marrons, pontos pretos, carbonização, estrias prateadas, delaminação, linha de solda, esguichamento, marcas ao redor do ponto de injeção, peças incompletas, chupagem e vazios, trincas ao redor do inserto, bolhas, variações na contração, peças quebradas, escorrimento pelo bico de injeção, má disperção de cor, marcas de fluxo,

rebarbas, peças translúcidas e leitosas, áreas foscas, peças presas no molde, fissuras, contração e empenamento por estresses residuais (KAMAL, et al 2002).

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para compreensão do processo de injeção de termoplásticos, influência de variáveis e recursos tecnológicos disponíveis e dessa forma, conhecer as causas dos principais defeitos de injeção e buscar soluções para eliminá-los ou minimizá-los.

A utilização do software "moldflow" para simulação prévia do processo de moldagem por injeção, e os recursos da "inteligência artificial" são destacados no intuito de prevenir o aparecimento de defeitos tanto em peças produzidas durante a iniciação de máquina, quanto em peças produzidas em escala de produção.

Como consequência desse estudo, pretende-se auxiliar os profissionais dos departamentos de projetos, processos, produção e outros envolvidos, a otimizarem os tempos de preparação, regulagem e set-up dos equipamentos bem como dar suporte à elaboração de documentos da qualidade.

Capítulo 2

Reologia de Polímeros

A reologia estuda a relação do fluxo e deformação da matéria. Do grego, reologia significa: rheo-fluir e logos-estudo.

Esta ciência foi se consolidando nos campos da pesquisa e desenvolvimento. Todas as substâncias escoam ou deformam se forças forem aplicadas para produzirem tal escoamento ou deformação, sendo que as características destas, variam de acordo com os diversos materiais. Em certos materiais, forças enormes produzem apenas modificações infinitesimais, mesmo aplicadas por períodos prolongados de tempo. Em outros materiais, ocorrem grandes e evidentes transposições se submetidos a esforços menores (BILLMEYER Jr.F.W.,1984).

Em todos os estados, sólido, líquido e gasoso, ocorre o escoamento da matéria. Então, reologia é o estudo para relacionar a constituição da matéria com as análises físicas.

A finalidade da reologia é a de analisar a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo.

No caso de fluido, a aplicação de um dado sistema de forças anisotrópico (forças em diferentes intensidades e direções) e heterogêneo (forças em diferentes intensidades e posições), mas pequeno, resultará em escoamento. Assim sendo, a relaxação do sistema de forças não resultará num retorno do corpo a seu estado não deformado.

No caso de sólido, a aplicação de um dado sistema de forças não homogêneo, isotrópico ou anisotrópico, resultará em uma deformação e não em escoamento. Assim sendo, a relaxação do sistema de forças, fará com que retorne a seu estado original, não deformado.

No caso de um plástico, este escoará como um fluido, se a força aplicada for superior a algum valor crítico. Caso contrário, o corpo deformará como um sólido elástico.

Seria muito complexo se fosse necessário um estudo separado das forças em cada átomo. Porém podemos considerar a média da intensidade das forças que atuam em um elemento contendo muitos átomos. Para que o elemento represente a média estrutural do material, é importante que o mesmo contenha deslocamentos, grãos policristalinos e regiões orientadas e se comparado com a amostra como um todo, o elemento deve ser pequeno.

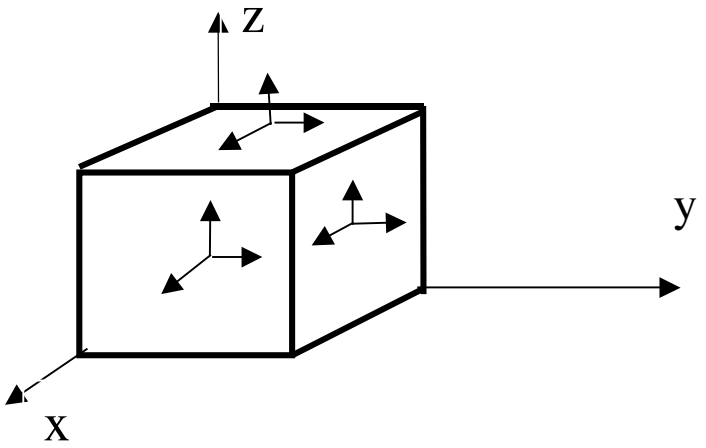


Figura 2.1 - Forças em um elemento

O quociente de um componente de força pela área de atuação da mesma é chamada de tensão. Para caracterizar a tensão são utilizados dois subíndices, o primeiro é a "normal à superfície em questão" e o segundo é a "componente de força naquela superfície".

$$\tau_{xx} = Fx / Ax \quad \text{(equação 2.1.a)} ,$$

$$\tau_{xy} = Fy / Ax \quad \text{(equação 2.1.b)}$$

A deformação de um corpo é causada pela aplicação de um tensor deformação, que provoca alterações relativas nas dimensões e nos ângulos de um corpo. Temos também que o estado de tensão de um corpo é causado pelo tensor tensão que são forças atuando em diferentes pontos.

As medidas experimentais desses dois parâmetros (tensor deformação e tensor tensão) podem ser feitas através de observação externa do comportamento deformacional e tensional desse corpo, ficando o desafio de como relacioná-los às forças internas do material, alterações de dimensões internas (surgimento de vazios, elementos comprimidos, etc). Corpos de prova são utilizados para tais medidas, com formas variadas, por exemplo: discos, cubos, fibras. Nos casos simples, onde os pares tensão-deformação são homogêneos ao longo de todo o corpo, esses materiais servem como modelo. Os modelos devem ser isotrópicos, sofrerem deformações pequenas comparadas com a unidade, e a lei de Hooke deve ser válida para todo o tipo de deformação (modelos elásticos perfeitos).

Deformação por compressão ou dilatação: ocorrem apenas alterações volumétricas não ocorrendo alterações de forma.

Deformação por cisalhamento simples: apenas a forma se altera não ocorrendo alterações volumétricas.

Para ocorrer cisalhamento simples ou compressão/dilatação, são necessários rearranjos e interações moleculares.

Tensão e taxa de cisalhamento:

Tensão de cisalhamento pode ser definida como $\tau = F / A$, sendo que a força F atua na direção tangencial à área A, como mostra a figura a 2.2.

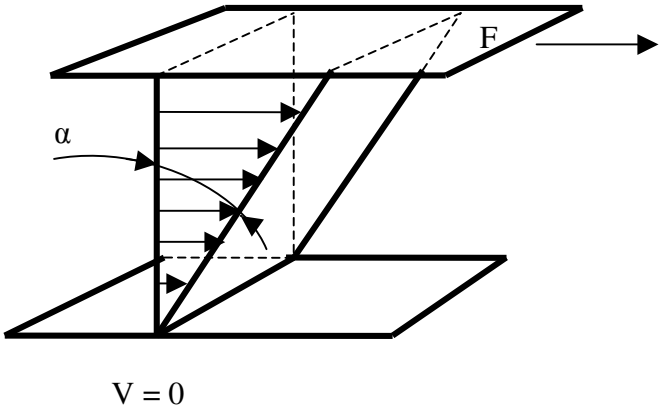


Figura 2.2- Força de cisalhamento atuando num elemento

A deformação do elemento pode ser medida através do ângulo α formado entre as placas . Caso a tensão cisalhante for mantida por um tempo t atuando sobre o elemento, surgirá deformação contínua desse material com uma velocidade constante de deformação ocorrendo movimento diferenciado entre as camadas do material. A figura 2.2. mostra as diferentes camadas com diferentes velocidades, formando um gradiente de velocidade, denominado de taxa de cisalhamento, pois evidencia a diferença de velocidades entre uma camada e outra. Por isso, quanto maior a diferença de velocidade entre as camadas infinitesimais, maior será a taxa de cisalhamento, a qual é definida pelo símbolo ($\dot{\gamma}$) , como sendo a relação entre a variação da velocidade e a distância onde ocorre essa variação de velocidade, conforme segue:

$$\dot{\gamma} = d\,Vx / dy \qquad \text{(equação 2.2)}$$

Observa-se que a força de cisalhamento está atuando na direção x (horizontal) , enquanto que o efeito cisalhante é na direção y (vertical).

Outra forma de definir a taxa de cisalhamento é a relação entre a deformação e o tempo, conforme segue:

$$\dot{\gamma} = d\gamma / dt \qquad \text{(equação 2.3)}$$

Sendo que a equação 2.3 expressa o grau de deformação por intervalo de tempo, ou seja, quanto maior a deformação para um mesmo intervalo de tempo fixo, maior será a taxa de cisalhamento, logo a tensão de cisalhamento relacionada com a taxa de cisalhamento é expressa pela seguinte equação:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \qquad \text{(equação 2.4)}$$

Onde η é a viscosidade do material. A seguir pode-se mostrar outras formas da equação 2.4:

$$\tau = \eta \; d\,Vx / dy \qquad \text{(equação 2.5)}$$

$$\tau = \eta \; d\gamma / dt \qquad \text{(equação 2.6)}$$

A viscosidade (η) de um material, é a resistência à deformação que este material apresenta. Uma viscosidade alta, quer dizer maior dificuldade de escoamento ou deformação, ou, maior resistência do material à força de cisalhamento atuante. Quando um fluido está sendo deformado por cisalhamento, onde suas moléculas deslizam umas sobre as outras devido à tensão

de cisalhamento, consome energia (tensão mecânica aplicada) para se locomover,porém, parte desta energia é transformada em calor, que será estudado posteriormente .

A reologia é um tema complexo, considerando-se as numerosas classes de materiais, seus comportamentos e estudo de casos.

Ao aplicar um sistema de forças em um corpo, ocorrerá uma deformação que poderá ser espontaneamente reversível (deformação elástica – sólido elástico) ou irreversível, deformação dependente do tempo e classificada como viscosa, ocorrendo escoamento. Uma abordagem referente a este assunto é feita a seguir:

a) Elásticos (que obedecem a Lei de Hooke)

Estabelece que a deformação (γ) é diretamente proporcional à tensão aplicada (τ), ou seja, $\tau = G \gamma$, sendo G o módulo de cisalhamento, lembrando que E é o módulo de Young e K o módulo de compressibilidade. Como não existem na verdade materiais elásticos ideais, parte dos materiais apresentam sob pequenas deformações ou baixas tensões, características Hookeanos. Quando não retorna à sua forma original quando a tensão é retirada, o mesmo ultrapassou seu limite elástico, inutilizando o material.

b) Elásticos (que não obedecem a lei de Hooke)

As borrachas e alguns plásticos se desviam do comportamento elástico ideal, em baixas tensões de solicitação e alguns polímeros fogem do comportamento ideal, quando as taxas de solicitação são elevadas. Existem materiais que não recuperam totalmente a deformação após retirada das tensões de solicitação, sendo que parte da energia mecânica é transformada em calor durante o tensionamento, formando um circuito de histerese, curva sob a qual sua área interna mede a energia absorvida durante o processo.

c) Fluidos Newtonianos ou Viscosos Ideais

Têm comportamento diferentes dos sólidos. O escoamento desses materiais escrito por Newton, segue a relação a seguir:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \qquad \text{(equação 2.7)}$$

$$\dot{\gamma} = d V / d t \qquad \text{(equação 2.8)}$$

Considerando a figura 2.2, ou seja, duas placas paralelas, uma sem movimento e outra com velocidade V constante, e entre elas, um fluido, observa-se que existe uma relação diretamente proporcional entre taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e a tensão de cisalhamento (τ) para manter a placa com tal velocidade. O fator desta proporcionalidade é a viscosidade (η) e mede a resistência oferecida pelo fluido ao movimento ou deformação. A tensão de cisalhamento é a relação entre a força para mover a placa e a área da placa. O gradiente de velocidade é linear, sendo que o fluido assume a velocidade da placa em que está em contato. O recíproco da viscosidade é o que se denomina fluidez, $\Phi = 1 / \eta$. A viscosidade depende da temperatura e aumentando-se T, a viscosidade diminui para a maioria dos materiais e aumenta para os gases. A viscosidade depende da pressão e aumenta com o aumento desta. Exemplos de fluidos newtonianos: água, glicerina, óleos e também alguns gases.

Os fluidos, semelhante aos sólidos tem além da viscosidade, outros dois fatores de proporcionalidade (compressão e tração), porém raramente são medidos devido à complexidade nos ensaios.

2.1. Materiais Não Ideais

Situam-se entre os Hookeanos, não Hookeanos e Newtonianos. Os materiais não ideais, não são lineares, isto é, a viscosidade não é proporcional entre $\dot{\gamma}$ e τ como o é para os newtonianos,

ou o módulo também não é um fator de proporcionalidade entre σ e Є, mas sim, η é variável e é função de $\dot{\gamma}$ e τ (MANRICH, 1990).

Os fluidos não newtonianos se dividem em três tipos:

a) Fluidos independentes do tempo: onde $\dot{\gamma}$ é função de τ, sendo uma função pontual. Conhecidos também como fluidos Viscoinelásticos, não possuem elasticidade, no entanto a deformação total é em função do tempo por serem materiais viscosos. Porém, com o tempo, τ é constante se $\dot{\gamma}$ o for e vice-versa.

a1) Pseudoplásticos: a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento ou com o aumento da tensão de cisalhamento como pode ser observado na figura 2.3. Este comportamento pode estar restrito a uma faixa de $\dot{\gamma}$ e τ, podendo ser inicialmente (baixas $\dot{\gamma}$ e τ) Newtonianos passando a pseudoplásticos e em faixas de $\dot{\gamma}$ e τ altos passarem a se comportar como Newtonianos. Materiais com este comportamento são os polímeros em solução, sistemas dispersos, entre outros.

De maneira geral, o comportamento da deformação das substâncias, dependem de suas propriedades físicas e químicas. São influenciadas pela forma e configuração das moléculas, sua concentração em um solvente, sua solvatação, temperatura e sua tendência de formar miscelas.

A figura 2.5. mostra a situação em que os cones repousam inicialmente em uma posição aleatória e que a diferentes velocidades atuando nesses cones, eles iniciam uma orientação preferencial no sentido do fluxo. O movimento Browniano no entanto se opõe a essa orientação e leva à desorientação do sistema. Para uma dada taxa de cisalhamento, um equilíbrio é encontrado

e quanto mais alto $\dot{\gamma}$, maior a orientação e menor a oposição que os cones irão impor ao fluxo, diminuindo a viscosidade do sistema.

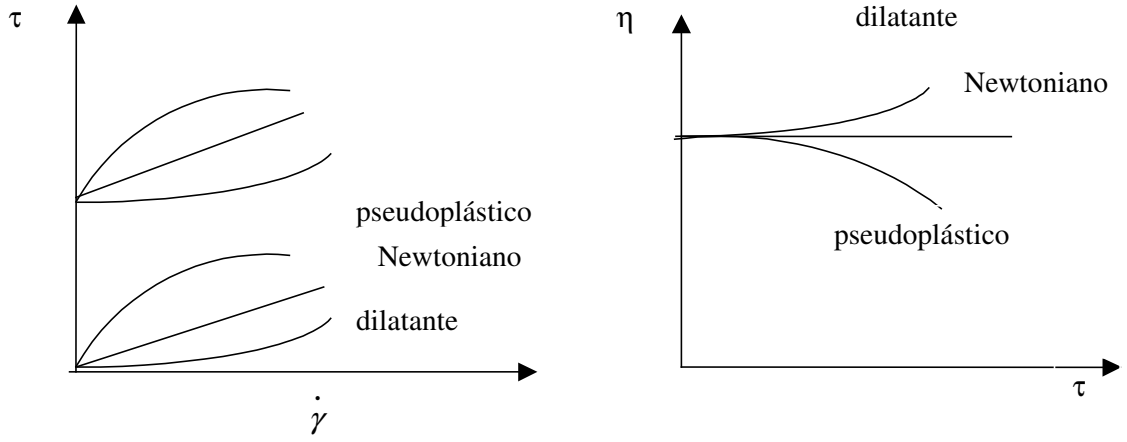


Figura 2.3- Classe de Fluido Independentes do Tempo, Não Newtonianos (Viscoinelásticos) (MANRICH, S. Injeção de Termoplásticos, Apostila do Instituto Latino Americano de Tecnologia, 1990 Campinas).

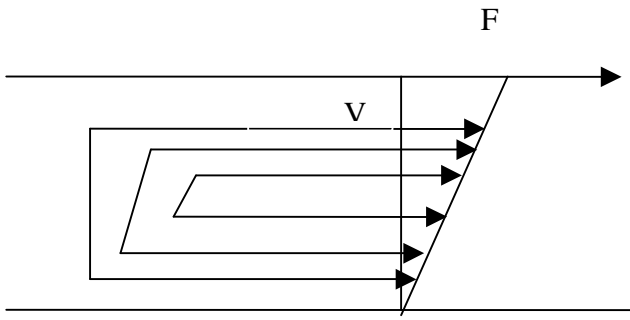


Figura 2.4- Orientação e Equilíbrio de Cones em um Líquido Newtoniano (MANRICH, S. Injeção de Termoplásticos, Apostila do Instituto Latino Americano de Tecnologia, 1990 Campinas).

Fluxo de cadeias lineares longas em um líquido Newtoniano: neste caso também existe Browniano e as moléculas tendem a ficar ao acaso e enroladas em forma de um novelo quando estacionárias.

Figura 2.5- Orientação de Macromoléculas em um Líquido Newtoniano sob Cisalhamento

Haverá um equilíbrio entre a orientação do fluxo e o enovelamento dessas moléculas, sendo que, quanto maior $\dot{\gamma}$, maior a orientação e menor a viscosidade do sistema. A forma como o fluido se comporta depende de parâmetros como: concentração, temperatura e faixa de cisalhamento com várias equações.

a 2) Dilatantes: a viscosidade aumenta com o aumento de $\dot{\gamma}$ ou τ e são independentes do tempo, tal como os pseudoplásticos, conforme figura 2.3. Materiais com este comportamento, são normalmente suspensões, emulsões e outros sistemas dispersos (exemplo argila-água). Em certos casos a viscosidade se torna infinita para altas tensões de cisalhamento, levando à fratura do material. Arquimedes desenvolveu a rosca sem fim, para transportar o esgoto de sua cidade pois a aplicação de uma alta tensão de cisalhamento em certos tipos de lamas, não ajudam a deformar tais fluidos. De um modo geral, dilatância é produzida por sistemas dispersos que quando submetidos a um sistema tensional o empacotamento das partículas é perturbado e vazios entre as partículas dispersas aumenta. A fase contínua deve penetrar facilmente através das estreitas passagens entre as estruturas das partículas (vazios) a baixas taxas de cisalhamento e é dificultada para altas $\dot{\gamma}$, pois ocorrem turbulências nessas passagens finas levando a um aumento desproporcional da tensão de cisalhamento, isto é, aumenta a viscosidade.

a3) Fluidos da Lei das Potências: os vários tipos de respostas para $\dot{\gamma}$ e τ é explicado pela lei das potências.

A lei das potências tem como princípio a relação funcional entre $\dot{\gamma}$ e τ que não é linear e é expressa a seguir:

$$\tau = \eta_a (\dot{\gamma})^n \qquad \text{(equação 2.9)}$$

Onde η_a é a viscosidade não newtoniana e aparente e n é o "fator de potências" indicando o quanto o fluido se afasta do comportamento newtoniano.

Para $n = 1$ o fluido é newtoniano, para $n > 1$ o fluido é dilatante, para $n < 1$ o diluído é pseudoplástico. Logo, n pode ser calculado pela tangente de uma curva $\log \tau$ x $\log \dot{\gamma}$.

b)fluidos dependentes do tempo: é função de τ e $\dot{\gamma}$ e também do tempo que será submetido ao cisalhamento. Os fluidos viscoelásticos também são dependentes do tempo.

b1) tixotrópicos: quando submetido ao cisalhamento (taxa ou tensão) constante, sua viscosidade decresce e se o cisalhamento for interrompido por um intervalo de tempo, sua viscosidade aumentará novamente, conforme figura 2.6 a.

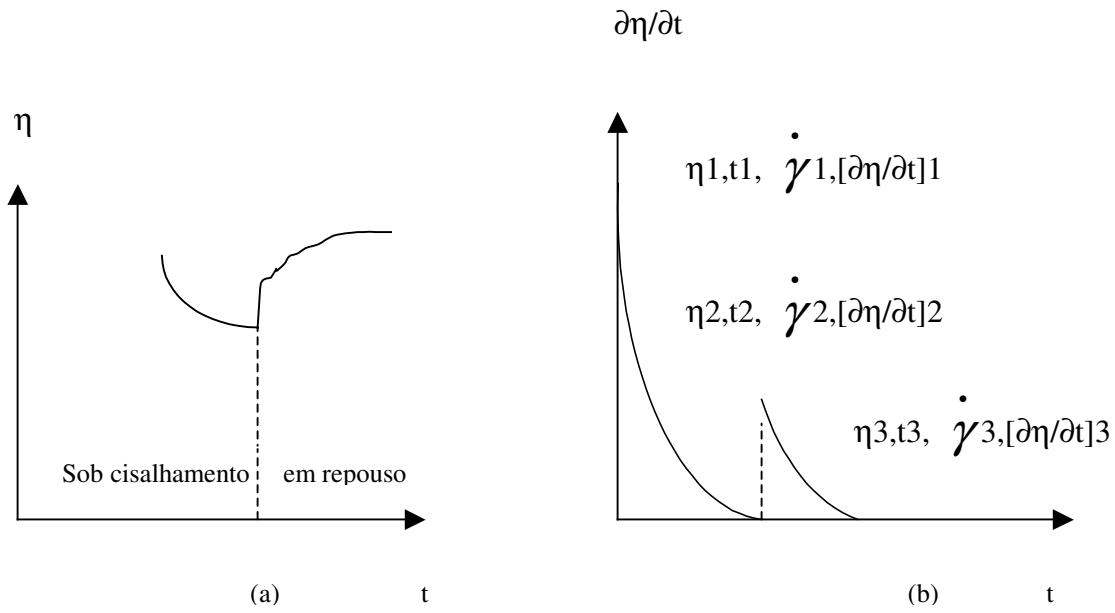


Figura 2.6 – Fluido tixotrópico (η x t) e ∂η / ∂t x t

A figura 2.6 b representa uma substância ideal, sujeita sucessivamente a taxas de cisalhamento constantes onde $\dot{\gamma}1 < \dot{\gamma}2$. Sob a ação de uma taxa de cisalhamento constante $\dot{\gamma}1$, a viscosidade η1 (t) diminui continuamente até que [∂η / ∂t]1 cai a zero no tempo t 2, alcançando uma viscosidade limitante η2 . Neste mesmo instante t2 , aumenta-se subitamente a taxa de cisalhamento para $\dot{\gamma}2$ e a viscosidade começa a cair segundo a taxa [∂η / ∂t]2 até alcançar uma viscosidade limitante η3 no tempo t3 .

As razões para este comportamento são diversas. Se em um sistema disperso, partículas têm diferentes potenciais elétricos, elas tendem a arranjar-se em uma estrutura bidimensional, como um castelo de cartas, no caso das partículas serem em forma de placas. Se a fase dispersa consiste de pequenos cones de esferas, resultarão em estruturas variadas (MANRICH, 1990).

Pode-se entender que quanto menos o líquido molha as superfícies dos sólidos, mais forte é a tendência para formar estruturas. As forças que agregam os elementos da estrutura, são devido ao fenômeno eletrostático e tem sua origem na troca de íons entre os elementos.

O fator tempo de desarranjo e reconstituição dessas estruturas, pode variar largamente de sistema para sistema e para descrever esse comportamento tixotrópico, os parâmetros τ , $\dot{\gamma}$ e t são indispensáveis. Curvas de histerese descrevem bem esse comportamento. Um material tixotrópico ideal sujeito a ciclos de aumento e diminuição da taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ é mostrado na figura 2.7. O material é tirado do repouso onde $\eta = \eta 1$, no tempo $t = to$, no estado estrutural arbitrário (A) , e é cisalhado a uma taxa continuamente crescente até alcançar o estado (B) , no tempo $t = t1$ com viscosidade $\eta = \eta 2$.

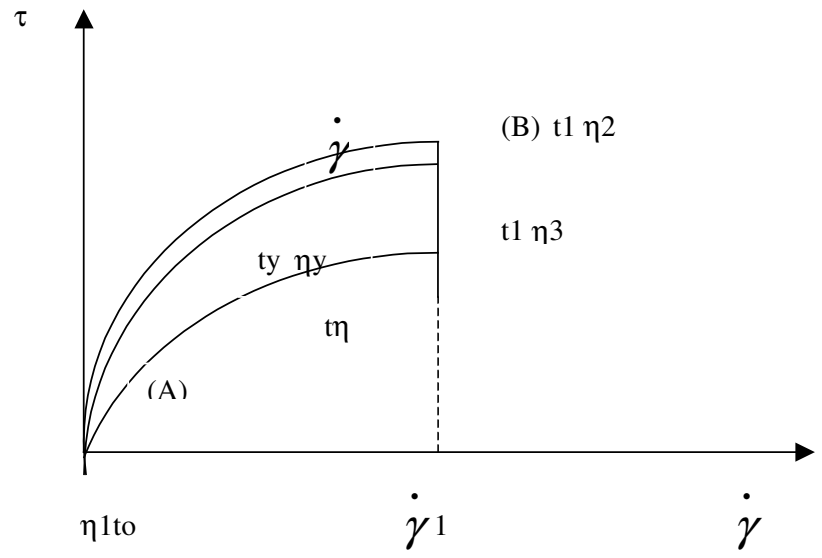


Figura 2.7 – Comportamento de um fluido tixotrópico idealizado, para condições de $\dot{\gamma}$ continuamente crescente e decrescente: τ x $\dot{\gamma}$.

No ciclo (A) (B) (A) o material é cisalhado numa taxa constantemente decrescente até que $\dot{\gamma} = 0$ no tempo $t = ty$ e $\eta = \eta y$. Deixa-se em equilíbrio por um certo tempo até que o estado original (A), com viscosidade $\eta 1$ seja alcançado outra vez.

b2) Fluidos reopéxicos: inverso do comportamento com relação ao tixotrópico. Substâncias que têm sua viscosidade aumentada com o tempo sob cisalhamento constante são classificados como reopéxicos. A curva de histerese tem sentido oposto àquele das substâncias tixotrópicas, conforme figura 2.8 a seguir:

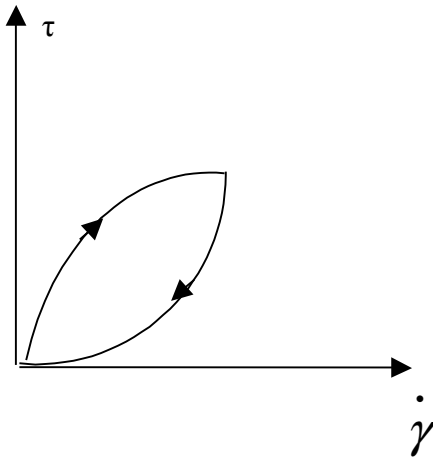


Figura 2.8 Substância tixotrópica

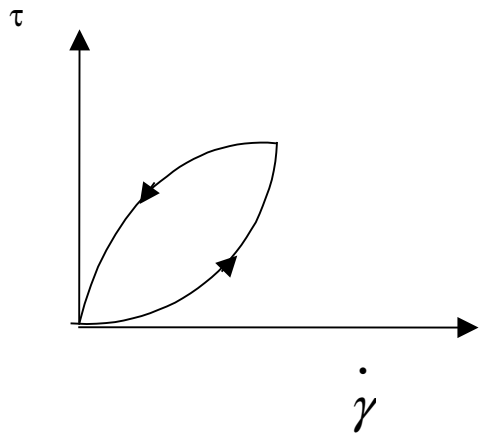


Figura 2.9 Substância Reopéxica

Todo fluido tixotrópico é um pseudoplástico, todo fluido reopéxico é um fluido dilatante. Porém nem todo pseudoplástico ou dilatente é um tixotrópico ou reopéxico, respectivamente (MANRICH, S. Injeção de Termoplásticos, Apostila do Instituto Latino Americano de Tecnologia, 1990 Campinas).

Pode-se ocorrer substâncias alterando seu comportamento como uma função do tempo de tixotrópico para reopéxico, conforme figura 2.10 a seguir:

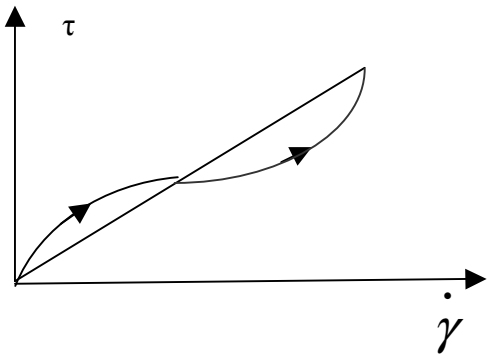


Figura 2.10 Comportamento tixotrópico-reopéxico

c) Fluidos viscoelásticos (elasto viscosos): são fluidos não newtonianos, tendo propriedades deformacionais tanto elásticas quanto viscosas. Quando se tensiona uma substância viscoelástica, a reação da mesma é uma combinação de escoamento de um fluido normal viscoso e uma deformação elástica ou sólido-elástica. A velocidade total de deslocamento para fluidos viscoelásticos é a soma das velocidades de escoamento e de deformação elástica. O resultado final depende da velocidade de aplicação da tensão de cisalhamento.

Polímeros ou polímeros em soluções concentradas apresentam este comportamento. Enquanto elásticos têm total recuperação da deformação, instantaneamente (elásticos ideais) ou não (elásticos não ideais) os materiais viscosos não recuperam nada da deformação (escoamento). Os materiais viscoelásticos por sua vez, apresentam uma recuperação parcial, normalmente dependente do tempo, correspondente à parte elástica que deformou. Às vezes a recuperação total dessa parte elástica necessita um tempo infinitamente longo. Duas classes de materiais que apresentam comportamento misto (elástico e viscoso) que são: os viscoelásticos propriamente ditos e os plasto-elásticos. Muitos polímeros tem esse comportamento por necessitarem de uma tensão inicial τ e para iniciarem a deformação. Para estudar essa classe de materiais, pode-se utilizar modelos análogos mecânicos (pistão e mola).

Os fluidos viscoelásticos apresentam o efeito conhecido como efeito de Weisemberg que se caracteriza pelo fato do polímero em soluções concentradas ou no estado fundido, subir as paredes de um cilindro interno quando este gira em um recipiente contendo essas substâncias. Com fluidos Newtonianos esse efeito não ocorre.

2.2. Reologia Durante o Processo de Transformação de Polímeros

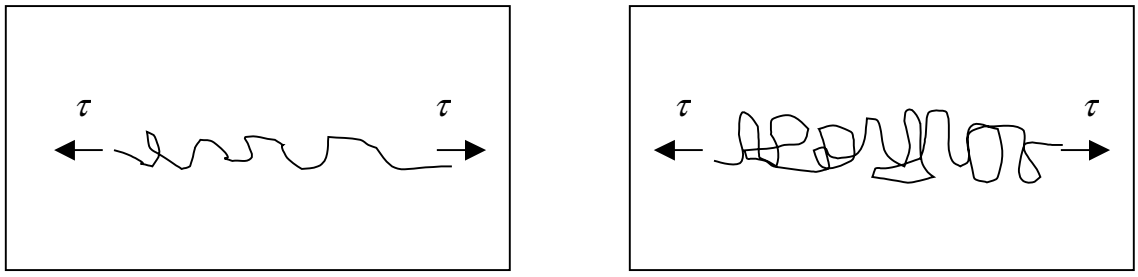
Nas operações convencionais de processamento de polímeros, os materiais ficam sujeitos a vários tipos de deformações, em virtude da complexidade da geometria dos equipamentos.Na moldagem por injeção, por exemplo, são observadas deformações de cisalhamento e alongamento. Essas deformações podem ocasionar o aparecimento e armazenamento de tensões internas no moldado, ou defeitos dimensionais na peça.As propriedades mecânicas e morfologia dos

materiais e de suas misturas são determinadas por estas deformações e tensões. Assim, para se compreender e prever a estrutura final dos materiais é necessário compreender o comportamento do material quando o mesmo está em situações de fluxo.

2.2.1. Forma de Macromoléculas e Relaxação

O fenômeno de relaxação de tensões decorre dos efeitos que os movimentos, por alterações térmicas, promovem na orientação das moléculas poliméricas. Quando o polímero sofre uma tensão mecânica e deforma a sua cadeia, a entropia do sistema decresce, pois menos conformações são adquiridas pelas moléculas; portanto, a energia livre do sistema aumenta. Quando a molécula é mantida no estado deformado, a relaxação de tensões ocorre para que as moléculas voltem para as suas conformações de equilíbrio, e o excesso de energia livre é dissipado como calor. A exemplo do Poliestireno (PS), a temperatura do processamento é o principal parâmetro, porque está relacionado com a difusão macromolecular cuja densidade deste emaranhado de macromoléculas influencia no tempo de relaxação (DEBONDUE, et al, 2004).

A relaxação de tensão depende da multiplicidade de formas pelas quais as moléculas podem recuperar suas conformações mais prováveis (mais estáveis), através de movimentos térmicos, sendo que estes movimentos complexos da molécula podem ser expressos como uma série de formas ou modos característicos, que necessitam de vários graus de cooperação de longo alcance entre os segmentos das cadeias.

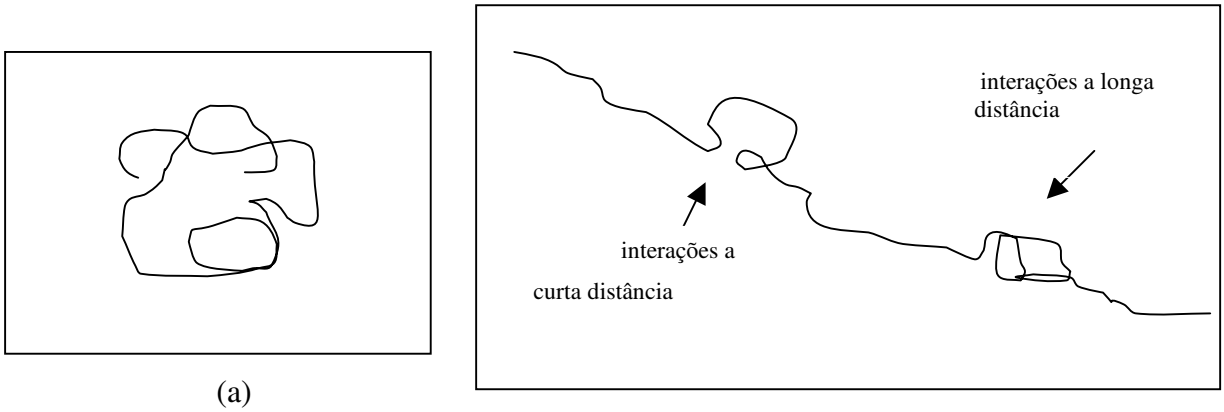


(a) (b)

Figura 2.11. – Representação esquemática de uma cadeia polimérica: a) tensionada; b) relaxando .

Existe um tempo de relaxação característico associado a cada uma dessas formas, e como existem várias formas possíveis de relaxação durante um intervalo de tempo, o espectro discreto de tempos de relaxação pode ser aproximado por uma distribuição contínua.

Sob um gradiente de velocidade, uma macromolécula se alonga parcialmente para desemaranhar segmentos que interagem a longa distância, sendo que esses segmentos deformam-se com o fluxo, e contribuem principalmente para a elasticidade do fluido. São responsáveis pelos efeitos de recuperação elástica durante o cisalhamento e pelas grandes diferenças de tensões normais em um fluxo. Com relação aos espectros de relaxação, os segmentos que interagem a longa distância estão relacionados com os longos tempos de relaxação, $\lambda > \frac{1}{\dot{\gamma}}$, sendo que a sua contribuição aos efeitos viscosos é pequena.



(a) (b)

Figura 2.12. - Macromolécula (a) na ausência de gradientes de velocidade; (b) na presença de gradientes de velocidade (BRETAS, D'AVILA,2000).

A estrutura original do polímero dificilmente será destruída pelo gradiente de velocidade, sendo que as estruturas compactas emaranhadas retêm alguns segmentos da macromolécula. Esses segmentos que interagem a curta distância não serão deformados pelo fluxo, e a sua

contribuição ao nível de tensões é percebida na viscosidade. Os tempos curtos de relaxação estão associados aos segmentos que interagem a curta distância, $\lambda < \frac{1}{\dot{\gamma}}$.

Os segmentos que interagem a longa distância, contribuem para a resposta elástica do fluído polimérico, e os de curto alcance contribuem para a resposta viscosa do polímero. Assim, a relaxação da molécula polimérica durante o fluxo determinará a sua resposta a uma dada deformação ou tensão (VIEIRA, R.C.C.,1971).

2.2.2. Viscosidade em Processo de Cisalhamento

A viscosidade é a propriedade reológica mais importante no processamento de polímeros fundidos, representa a resistência ao fluxo que o polímero apresenta quando é submetido a um campo de deformações em cisalhamento simples. A grandeza que indica está resistência é denominada viscosidade em regime permanente de cisalhamento ou simplesmente viscosidade $\eta(\dot{\gamma})$.

As vazões, quedas de pressão e aumentos de temperatura, dependem diretamente da viscosidade, que é influenciada pela estrutura molecular do polímero, portanto é possível obter as correlações entre essa propriedade e a estrutura do polímero.

2.2.3. Viscosidade em Processo de Alongamento

A viscosidade em regime permanente de alongamento permite conhecer a resistência ao fluxo dos polímeros em campos deformacionais de alongamento ou campos deformacionais livres de cisalhamento, é representada por $\bar{\eta}$ ($\dot{\varepsilon}$).Esse tipo de fluxo é encontrado principalmente, no processo de fiação de fibras poliméricas.O comportamento é importante para evitar a quebra do fundido durante a fiação, é necessário que as respostas elásticas e viscosas do material sejam suficientemente rápidas, com a finalidade de evitar que tensões de tração excessiva desenvolvam-se no fio.

2.2.4. Evolução das Tensões até o Cisalhamento Permanente

O "stress overshoot" ou crescimento de tensões, ocorre quando o material está sujeito a uma taxa de cisalhamento constante, sendo que as tensões ocorrem em função do tempo até que o fluxo atinja o regime permanente. Na maioria dos polímeros essas tensões atingem um máximo e depois decrescem até atingir um valor constante (VAN HOLDE, K.E.,1975).

Existe uma propriedade reológica que indica como e em quanto tempo as tensões atingem seu valor estacionário. Essa propriedade é análoga à viscosidade em regime estacionário, e é definido pela equação a seguir, em que τ é a tensão de cisalhamento e , $\dot{\gamma o}$, a taxa de cisalhamento inicial:

$$\eta^{+}(t, \dot{\gamma}_0) = \frac{\tau(t)}{\dot{\gamma o}} \qquad \text{(equação 2.10)}$$

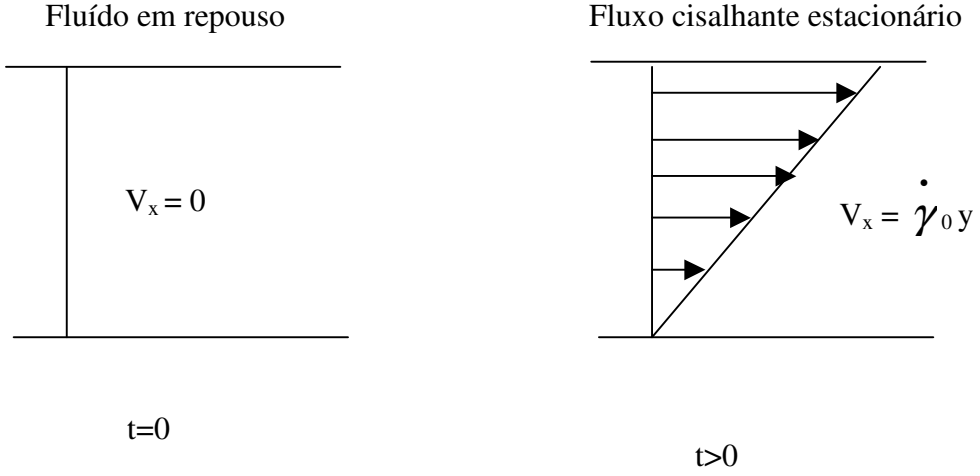


Figura 2.13. - Esquema do fluxo da evolução das tensões.

Na figura acima pode-se observar que existe um crescimento de $\eta^{+}(t, \dot{\gamma}_0)$ até atingir um máximo. O stress overshoot (máximo nas tensões) está relacionado com as macromoléculas, que mesmo estando deformadas não conseguem relaxar e responder a deformação a qual está

submetida, pois seu tempo de relaxação é maior que a duração do experimento. Ocorre um acúmulo temporário de tensões, pois as mudanças conformacionais das moléculas requerem tempo e elas ocorrem em tempos maiores do que a resposta viscoelástica. Essa propriedade permite calcular o tempo a uma dada taxa de cisalhamento em que ocorre o acúmulo de tensões.

2.2.5. Relaxação de Tensões Após Interrupção Imediata de Cisalhamento

Para medir a relaxação de tensões, após um súbito cisalhamento, aplica-se uma taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}_0$ elevada e constante por um curto intervalo de tempo, de forma que

$\dot{\gamma}_0 \ \Delta t \cong \gamma_0$ interrompendo-se este cisalhamento e medindo-se imediatamente as tensões τ (t).

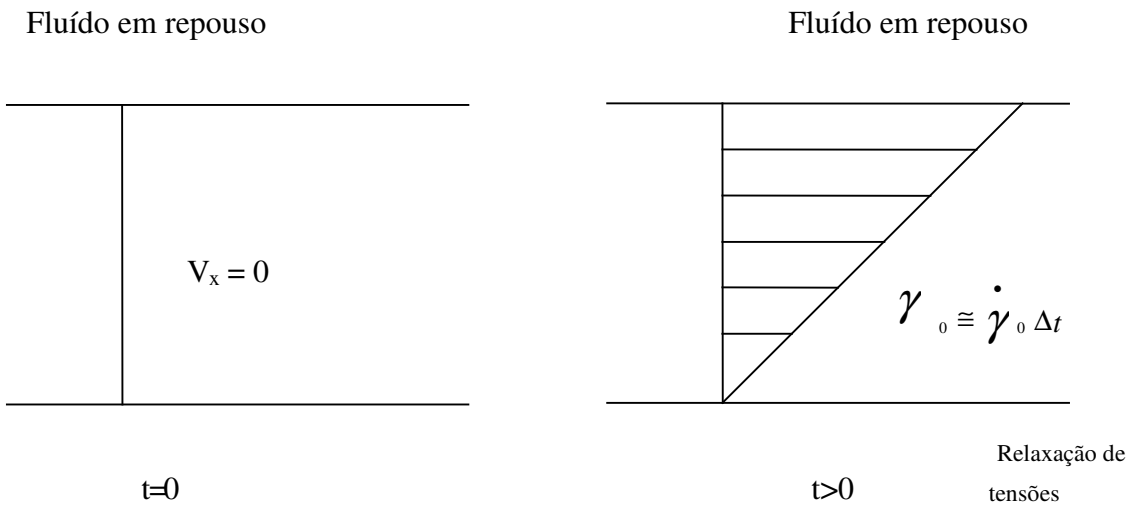


Figura 2.14. Relaxação de tensão após um súbito cisalhamento (BRETAS, D'AVILA,2000).

Nos homopolímeros geralmente a relaxação de tensões é monotônica e mais rápida a medida que a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}_0$ aumenta.A figura a seguir mostra o exemplo dessa propriedade para um polímero fundido (BRETAS, D'AVILA, 2000).

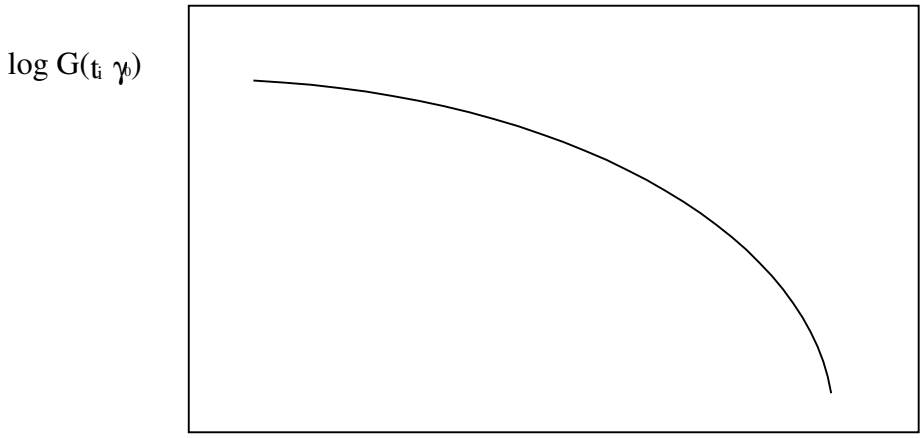


Figura 2.15. - Módulo de relaxação X tempo (polímero fundido) G (Pa) e t(s) .

2.2.6. Decaimento das Tensões

Após o polímero sofrer uma taxa de cisalhamento constante e ter o seu movimento subitamente interrompido, ocorre à propriedade de relaxação de tensões, como mostra a figura a seguir onde o decaimento ou relaxação de tensões é observado.

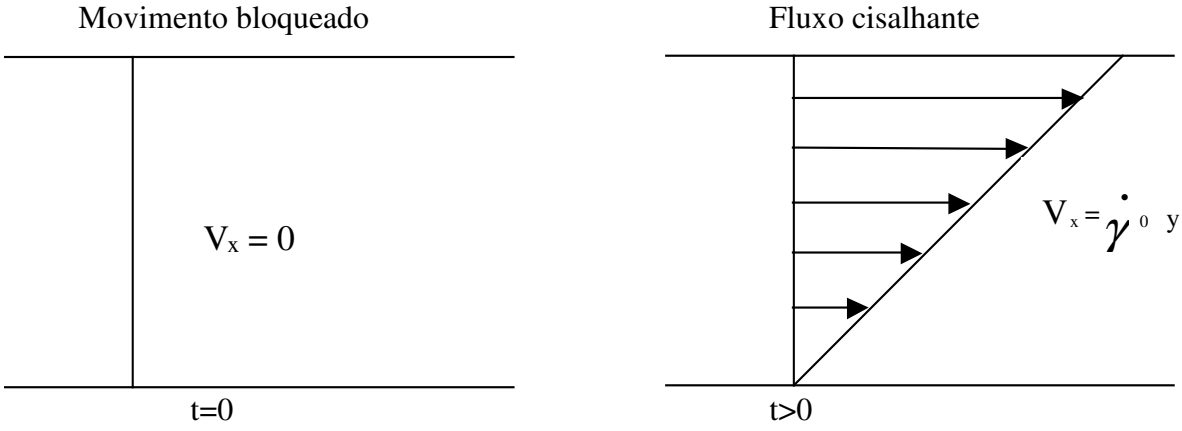


Figura 2.16. – Fluxo de relaxação de tensão (BRETAS, D'AVILA,2000).

2.2.7. Fluxo Após Atuação de Tensões

Quando o polímero sofre uma tensão de cisalhamento constante τ_a, é possível observar a propriedade de fluência do mesmo, sendo que a tensão de cisalhamento é mantida durante todo o tempo do experimento, como é ilustrado na figura 2.17, na qual observa-se um aumento na deformação com o tempo. A deformação aumenta assintoticamente. O limite é γ_∞ ; a sua interseção no ponto t=0 é chamada de γ_0.

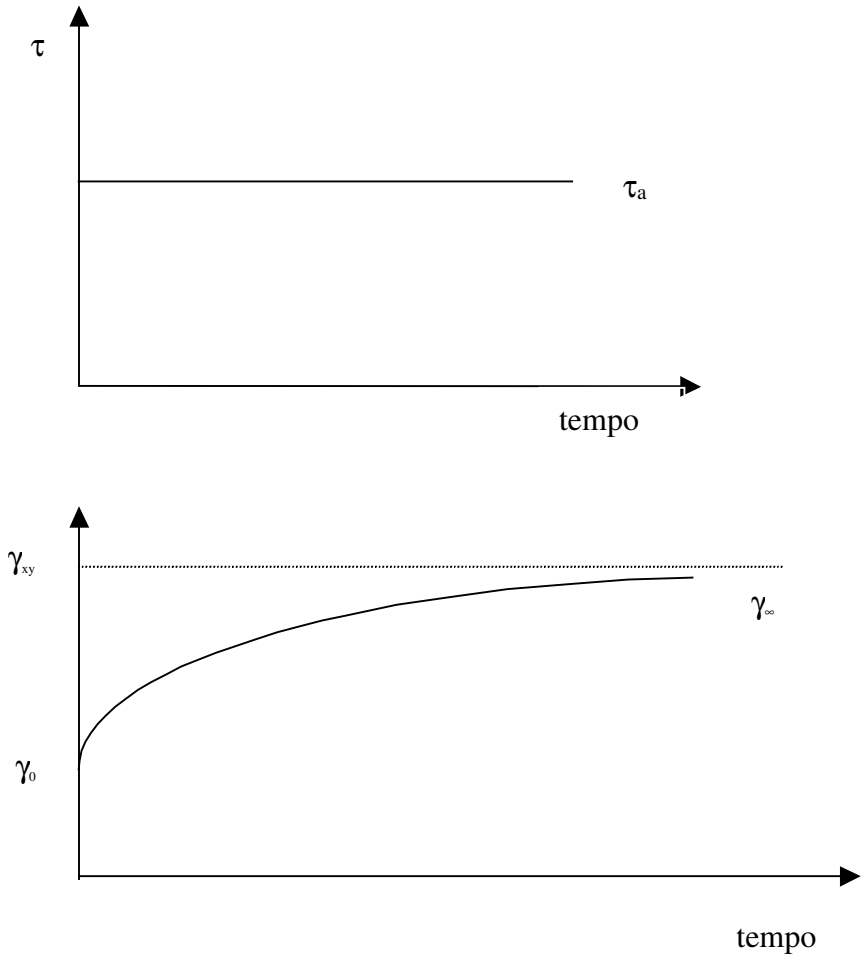


Figura 2.17.-Tensão x tempo e deformação x tempo (BRETAS, D'AVILA, 2000).

2.3. Preenchimento Orientado do Polímero Fundido

O grau de orientação em um produto acabado, fabricado pelo processo de injeção, está relacionado com o peso molecular do polímero e as características de relaxação do mesmo, através das condições de processo utilizadas durante a produção. Em resumo pode-se afirmar que a orientação residual, é igual ao nível de orientação devido à fluência menos a relaxação. (MALLOY, 1994).

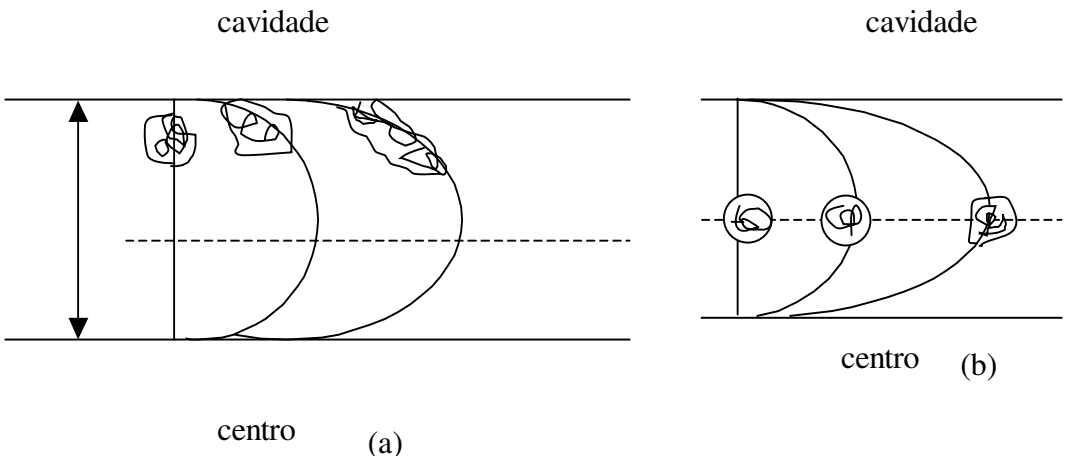


Figura 2.18. -Perfil de velocidade laminar no pseudoplástico (MALLOY, 1994).

Na figura 2.18, nota-se que próximo às paredes das cavidades (a), as moléculas do polímero se resfriam e caminham em direção ao centro. Em (b) notamos a ocorrência de uma marca em linha, caracterizando um defeito na peça acabada.

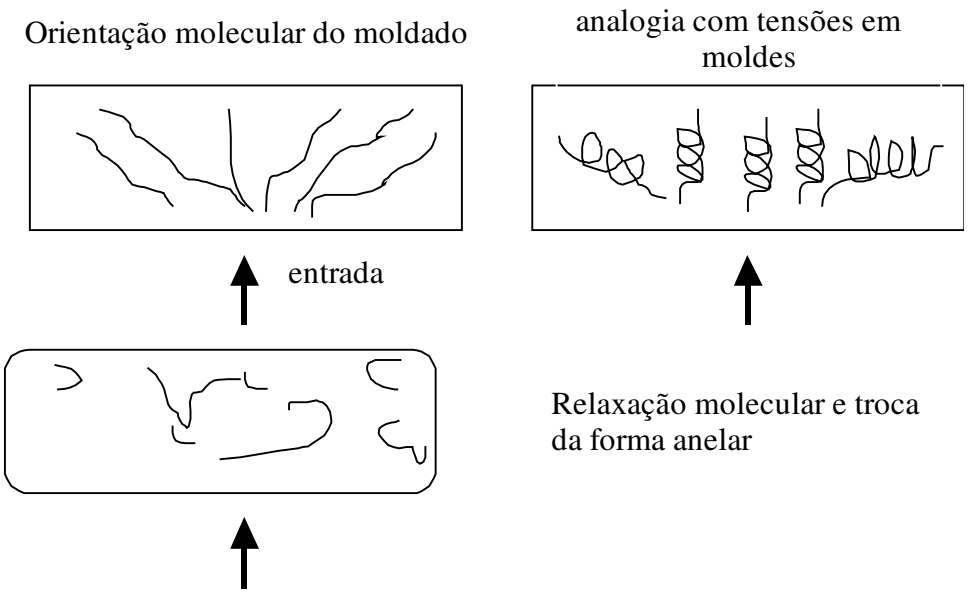


Figura 2.19.- Orientação molecular em direção ao final do preenchimento (MALLOY, 1994).

Na figura 2.19, observa-se que moléculas orientadas radialmente escoando da entrada em direção ao final da fluência, resultando num "stress" elevado na região da entrada do polímero, com tentativa de restabelecerem–se, o que pode causar distorções dimensionais nos produtos acabados quando submetidos à temperatura elevada de trabalho.

A Tabela 2.1 mostra que as propriedades podem também variar para alguns níveis diferentes com a distância variando a partir da entrada (MALLOY 1994).

Posição da cavidade	**Direção da amostra**	**Resistência ao impacto Izod**	
		(ft-lbs/in)	**(J/m)**
Próximo à entrada	Fluxo	2.53	137
Próximo à entrada	X- fluxo	0.95	51
Final do fluxo	Fluxo	2.21	119
Final do fluxo	X-fluxo	0.66	36

Tabela 2.1- Variação da resistência ao impacto do Poliestireno de Alto Impacto, moldado por injeção (MALLOY, 1994).

Outra característica importante na fluência do polímero fundido durante o preenchimento, é o caso em que o mesmo encontra uma trajetória com cantos vivos e dobras, que com o arredondamento, minimizam os efeitos dos graus de orientação, associados ao preenchimento do molde.

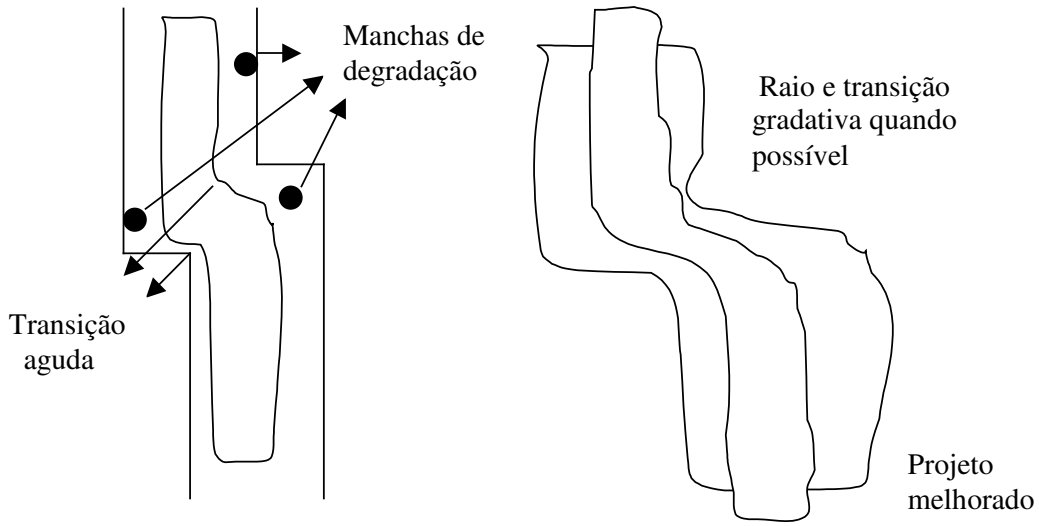


Figura 2.20. Caminhos de fluência (MALLOY, 1994).

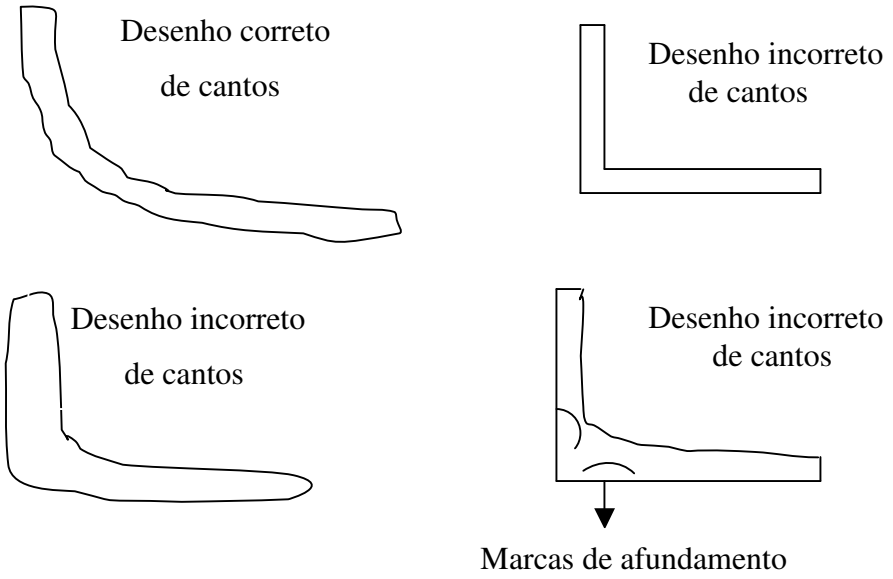


Figura 2.21 Desenho de cantos (MALLOY, 1994)

Conforme mostrado na figura 2.21, considerando o caso ideal, os cantos devem ter ambos os raios, interno e externo construidos de tal maneira que a espessura da parede do produto que está sendo injetado, se mantenha uniforme, caso contrário, poderão surgir marcas, chupagem e degradações na peça.

Capítulo 3

Injeção de Termoplásticos

Na moldagem por injeção, um polímero em forma de grânulos é aquecido, fundido (a forma mais correta seria estado fluido ou pastoso) e forçado sob pressão para dentro de um molde, por meio de um pistão; ainda dentro do molde, a peça moldada é resfriada abaixo da temperatura de amolecimento do termoplástico; o molde é então aberto e a peça moldada é extraída (BLASS, A., 1988).

O processo de moldagem é intermitente, ou seja, após cada peça ser extraída do molde, um novo ciclo já teve início. O processo é então caracterizado pelas etapas: alimentação, plastificação (homogeneização), enchimento do molde, resfriamento, abertura do molde e extração da peça; etapas que serão detalhadas mais adiante.

A moldagem por injeção é, sem dúvidas, o método mais usado para transformar termoplásticos em artigos para uso final. Estima-se que 35% dos artigos plásticos para o uso, sejam produzidos por este processo. É um processo simples, rápido, preciso e, hoje em dia, razoavelmente econômico.

São inúmeros os fabricantes e tipos de máquinas para a injeção de plásticos, as injetoras, desde as mais simples até as controladas por computadores, desde pequenas para produzir um

minúsculo conector elétrico, até as maiores para produzir um para-choque de automóvel.

O enorme crescimento do processo de injeção reflete-se nos diversos tipos e tamanhos de máquinas existentes no mercado. Injetoras são: em regra geral, máquinas universais. Sua função abrange a produção descontinuada de peças, preferencialmente a partir de fundidos macromoleculares, apesar de a moldagem ocorrer sob pressão. A minimização de peças produzidas com defeitos, já utiliza a lógica "fuzzy" para determinar os parâmetros de processo de injeção (TAN, YUEN, 2004).

A máquina de injeção, de maneira geral, é constituída pelos seguintes partes:

a) Unidade de Injeção

Nesta unidade o plástico é fundido, homogeneizado transportado, dosado e injetado no molde. A unidade de injeção possui as funções de injeção e plastificação do material plástico.

Atualmente é comum o uso de máquinas com rosca que também serve de êmbolo de injeção. Elas são mais eficientes na plastificação das resinas termoplásticas do que as injetoras de pistão.

A rosca gira em um cilindro aquecido, ao qual o material é alimentado por cima através do funil. A unidade de injeção move-se geralmente sobre a mesa da máquina.

O conjunto cilindro rosca e o bico de injeção devem ser compatíveis ao material a ser processado ou também ao volume de injeção.

O cilindro de injeção é constituído de um tubo de aço robusto, capaz de suportar a pressão necessária para a injeção. é geralmente envolvido e aquecido por resistências elétricas, o calor gerado pelo sistema de aquecimento é conduzido através das paredes do cilindro para fundir os pellets de material, a fim de que estes possam ser injetados de forma homogênea no molde.

Geralmente o aquecimento do cilindro é dividido em zonas de temperaturas controladas individualmente para obter fusão gradativa do material e maior homogeneidade do fundido.

Pelo menos três zonas de aquecimento devem ser controladas individualmente, com preferência ao tipo proporcional, ou controles de temperatura convencionais. A temperatura na extremidade do cilindro (bico), deverá ser controlada separada, por pirômetro ou reostato.

3.1. Máquinas Injetoras

Normalmente as injetoras possuem diversos recursos para regulagem dos parâmetros do processo. Deve possuir um bom controle do torque da rosca, controle automático do preenchimento e pressurização do molde, através do contínuo monitoramento da viscosidade da massa fundida.

As principais regulagens dos parâmetros de processo estão relacionadas às temperaturas da máquina isto é, resfriamneto do molde, zonas do cilindro, bico de injeção e canais quentes do molde, às pressões de preenchimento, de recalque, de fechamento e de retorno da rosca, às velocidades de injeção e da rotação da rosca, entre outras.

Algumas injetoras possuem sistema automático e computadorizado para controle do volume específico, monitorado através da variação da pressão causada pela variação de temperatura. Isto permite controlar durante todo o ciclo de injeção o volume específico da peça, além de controlar com precisão durante vários ciclos, garantindo assim a repetitibilidade do processo e conseqüentemente a qualidade. A injetora permite armazenar os melhores parâmetros de trabalho na sua memória do programa, e realizá-los durante o trabalho.

A dosagem também pode ser corrigida automaticamente em algumas injetoras. A regulagem da dosagem é importante, pois a viscosidade da massa varia com a dosagem, variando conseqüentemente a qualidade do produto injetado. A massa fundida após o preenchimento é denominada almofada, o seu volume deve ser sempre o mesmo, cerca de 10% do máximo de massa que pode ser dosada pela máquina por ciclo.

Esta pequena quantidade de material que permanece no cilindro em cada ciclo (almofada), regula a transmissão da pressão sobre o material, e garante que as características de injeção sejam constantes (peso e geometria da peça), evitando também colisão entre a ponta da rosca e o molde. O valor da almofada, pode variar de um ciclo para outro, devido à alteração da contrapressão na rosca na fase de plastificação, alterando a viscosidade, a densidade da massa fundida e a dependência do ciclo anterior, pois a sobra ou a falta de massa na almofada anterior pode afetar o volume da almofada do ciclo atual.

3.2. Ciclo de Injeção

A figura 3.1. apresenta uma representação esquemática do ciclo de injeção. No primeiro estágio do ciclo de injeção ocorre o fechamento do molde (1), seguido do avanço da unidade de injeção (2), fazendo com que o bico de injeção encoste na bucha de injeção do molde. Em seguida temos, a injeção do plástico (3) que está no estado fundido (plastificado), o material fundido não retorna pelos filetes da rosca de plastificação, graças a um dispositivo mecânico que está acoplado à rosca de plastificação que impede o contra-fluxo. A seguir é realizado a pressão de recalque (4)**,** que mantém o plástico compactado no interior do molde. Este ponto de transição entre pressão de injeção para pressão de recalque é chamado de ponto de comutação, e é muito importante para manter a qualidade da peça a ser produzida. Seguindo a atuação do ciclo há o: recuo da unidade de injeção (5), e posteriormente a dosagem (6)**,** onde a rosca de plastificação (ou parafuso) irá girar, fazendo com que o material plástico, no estado sólido, seja introduzido no cilindro de injeção através de um funil, ao mesmo tempo também a rosca de plastificação se direcionará para o sentido oposto ao da injeção, ou seja, ela recuará. Com o recuo, a rosca de plastificação desloca entre seus filetes o material em direção a área compreendida entre a ponta da rosca e o bico de injeção, e pela ação do atrito, pressão e temperatura o material plástico que estava no estado sólido (pó ou grânulos) funde-se (plastifica), preparando a máquina para o próximo ciclo.

Nota-se que: tempo de resfriamento no ciclo de injeção ocorre desde o final da injeção do plástico até a extração da peça (7). O tempo de resfriamento está atrelado a temperatura de solidificação da peça.

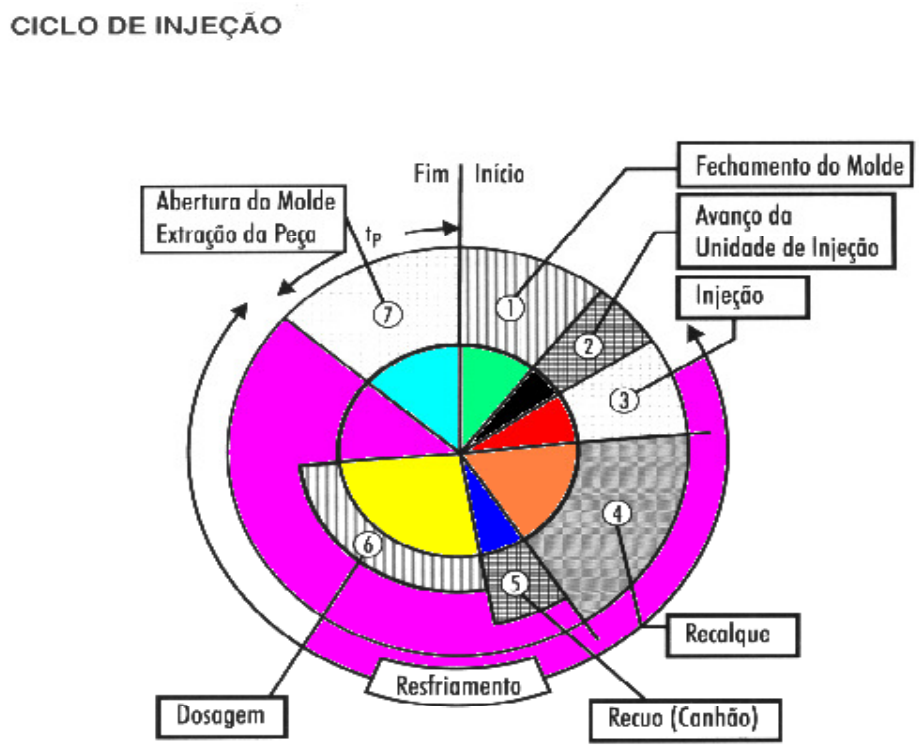


Figura 3.1.- Esquema do ciclo de injeção

3.3. Moldes de Injeção

A tecnologia empregada nos moldes, é cada vez mais avançada evitando a freqüente intervenção do operador. Um dos exemplos é o controle do peso da peça injetada através da instalação de um transdutor linear montado no lado externo do molde para monitorar o momento da separação de gavetas e as placas das cavidades, que está relacionado com o tempo de compactação do material dentro da cavidade (CHEN, TURNG,2005).

O molde é uma das partes mais complicadas de se projetar neste processo, devido a sua complexidade, pois ele é o responsável por dar a forma final ao polímero fundido. Existem dois tipos básicos: o molde de duas ou três placas, sendo que a utilização de um ou de outro, irá depender da peça que será injetada e do projeto do molde como um todo.

Os moldes de duas placas possuem uma placa fixa e a outra móvel, sendo que a placa móvel irá promover a extração da peça injetada. Nos moldes de três placas, além da placa fixa e móvel, existe uma intermediária, cuja função é a extração e separação dos canais de injeção do moldado.

As placas cavidades do molde são responsáveis por dar a forma ao produto e aos canais. Os canais são necessários para o polímero fundido fluir até a cavidade do molde. Os canais de injeção são os situados logo na entrada do molde. Os canais de alimentação e de distribuição. Basicamente são rasgos feitos nas placas onde o polímero fundido é levado até as cavidades; pontos de injeção, onde o polímero sofre um estrangulamento antes de entrar na cavidade, sendo que a cavidade do molde é onde o polímero é comprimido para formar o produto final. O molde é composto ainda de: canais de refrigeração, onde circulam líquidos para trocar calor com o polímero injetado, pinos extratores, que extraem as peças moldadas, entre outros componentes..

3.3.1. Moldes com Canais Quentes

O polímero que passa pelos canais de injeção e distribuição, não é resfriado a cada ciclo, permanecendo fundido e pronto para ser injetado, sendo que as peças obtidas por este sistema, possuem qualidade superior. Existem duas formas de se eliminar a necessidade de resfriamento do polímero dentro dos canais: injeção direta, no qual o polímero entra diretamente do bico da injetora para dentro da cavidade; injeção com câmara quente, no qual o polímero passa através de canais quentes, não é resfriado e entra na cavidade final, sendo que as suas propriedades reológicas e térmicas são controladas.

Para o caso de injetar mais de uma peça por vez (múltiplas cavidades), são necessários canais para transportar o polímero fundido até cada uma das cavidades.

Os moldes com canais quentes possuem vantagens em relação aqueles com canais frios, entre elas a redução do custo de mão-de-obra necessária para corte ou separação de galhos; melhor controle da operação; economia de matéria-prima pois não existem os canais congelados

(galhos); economia em energia pois não é necessário reciclar os canais; ciclos mais rápidos, porque a cada ciclo o material preenche somente a cavidade, os canais podem representar até 80% da massa utilizada em um ciclo de injeção; otimização do ciclo de injeção pois é necessário resfriar somente a peça e não os canais; qualidade do injetado é superior pois pode-se controlar as propriedades reológicas e térmicas da massa polimérica. Os moldes com canais quentes permitem maior flexibilidade; podem utilizar máquinas injetoras menores ou aumentar o número de cavidades para a mesma máquina, devido a maior eficiência da injetora; o polímero permanece sempre fundido nos canais mesmo durante o ciclo de resfriamento,ocasionando maior eficiência na transferência das pressões e recalque de injeção ; Baixo grau de contração da peça devido o baixo nível de tensões internas.

3.3.2. Funcionamento do Molde

Antes de iniciar o processo de injeção o molde deve estar fechado e vazio para que ocorra o seu preenchimento com o polímero fundido, sendo que o resfriamento é iniciado logo após o polímero entrar nos canais do molde. Após o molde estar totalmente preenchido e pressurizado, ocorre a pressão de recalque ou compensação. Após a pressão de recalque , o molde permanece fechado para terminar o resfriamento, que é a etapa de maior tempo. O molde se abre extraindo a peça . O molde se fecha e inicia o ciclo novamente.

3.3.3 Preenchimento do Molde de Injeção

Os moldes têm como função conformar a peça e resfriar a massa. O sucesso da injeção de termoplásticos está relacionado com o conhecimento do fluxo do fundido nos canais do molde, portanto o projeto do molde deve estar adequado. Os parâmetros do processo de injeção também estão ligados com o sucesso do produto final, pois duas peças do mesmo material injetadas na mesma máquina, e utilizando o mesmo molde, podem ter acabamentos finais diferenciados, tensões internas e contrações diferentes, devido aos parâmetros do processo de injeção. Portanto, o conhecimento da maneira que o polímero flui dentro do molde, é importante para a determinação da qualidade da peça acabada.

Para preencher o molde, o polímero deve ter a fluidez suficiente para escoar pelos canais e paredes, sendo que a pressão deve ser entre 200 a 1100 bar para os materiais com boa fluidez. A localização do(s) ponto(s) de entrada deve ser analisada conforme o tipo de polímero, estrutura do molde (duas ou três placas), geometria da peça a ser produzida, minimizando as formações de defeitos na região próxima ao ponto de entrada (KIM, et al, 2003).

Quando o polímero está no estado fundido o seu volume aumenta cerca de 20% , ocorrendo uma dilatação, e quando o molde é aberto a temperatura ambiente, ocorre uma contração. Devido a esta expansão e contração que ocorre durante o ciclo de injeção, faz-se necessário injetar mais massa do que cabe no momento do preenchimento, portanto a pressão deve estar elevada, assim o encolhimento natural que deveria aparecer é compensado com essa massa excedente sob pressão. Existem moldes que possuem a cavidade fria e os canais quentes, e nessas regiões quentes o polímero nunca é esfriado; outros moldes possuem tanto a cavidade como os canais frios,e neste caso a peça é resfriada até o congelamento da massa .O polímero ao encontrar nas paredes frias da cavidade e dos canais, inicia o processo de resfriamento, sendo que o processo ocorre gradativamente e altera a temperatura da massa de fora para dentro, dificultando o fluxo dentro do canal até a total parada do fluxo de preenchimento.

A "Temperatura de não-fluxo" (T_{NF}) é aquela onde o polímero mesmo sob pressão não flui mais. Nos polímeros amorfos a (T_{NF}) é aproximadamente 40ºC acima da (T_g), já nos semicristalinos a (T_{NF}) está entre 5 a 80ºC acima da temperatura de fusão , dependendo do polímero e dos aditivos (MANRICH, 2002).

3.3.4. Estágios do preenchimento do molde

O preenchimento do molde ocorre em três fases sendo a primeira fase o preenchimento do molde sem pressurização, onde a massa é empurrada dentro do molde vazio, preenchendo-o completamente, a segunda, a pressurização controlada da massa, atingida nesta fase sendo a máxima do ciclo como um todo, as pressões de recalque são decrescentes, não ultrapassando a pressão máxima e a terceira, que é o ponto de comutação onde a pressão de pressurização muda

para a pressão de recalque. A pressão de recalque é a pressão utilizada para garantir que o material injetado não retorne do interior da (s) cavidade (s) do molde para o interior do cilindro de plastificação.

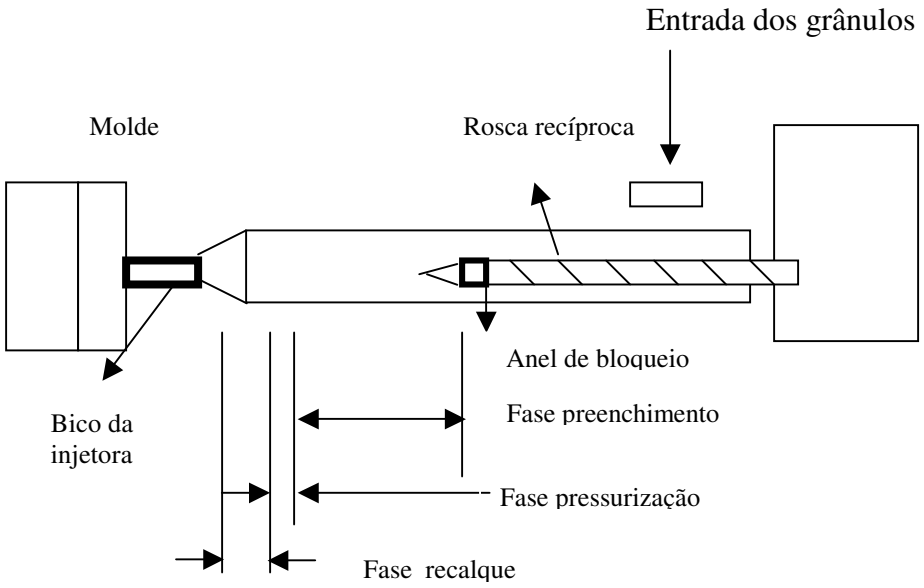


Figura 3.2. Desenho esquemático apresentando os estágios do preenchimento do molde.

3.3.5.Pressão Exercida pelo Pistão

A máxima pressão no ciclo de injeção depende da estrutura química do polímero (afeta a degradação), da viscosidade de processamento para o polímero (influi na porcentagem de transmissão da pressão na entrada do molde, até o fim do percurso que o fluido percorre), e do tamanho da cavidade do molde (espessura da parede da cavidade, e distância entre os canais do molde).

Os polímeros possuem viscosidade elevada quando comparado a outros materiais, esse fato prejudica a transmissão das pressões das fases de pressurização e recalque aplicadas pelo pistão, em pontos distantes a perda pode chegar a 60% . Então para garantir a pressão mínima suficiente

sobre o material que fica no final do percurso dentro da cavidade, é necessário utilizar pressões elevadas nos materiais que ficam próximos ao pistão injetor (bico da injetora).

3.3.6. Pressão de Injeção

A pressão de injeção é a pressão utilizada para transferir o material (no estado fundido) do interior do cilindro de plastificação para o interior da (s) cavidade (s) no molde.

A pressão de injeção do polímero depende da viscosidade (η), que por sua vez, depende da temperatura, do tipo de polímero, dos aditivos, da taxa de cisalhamento e a geometria por onde flui a massa fundida. Pode-se constatar, que a pressão necessária para o preenchimento aumenta conforme ocorre o aumento da superfície que o material sofre atrito. Sendo que esta superfície de atrito engloba as paredes dos canais e as paredes da cavidade do molde.

Ao diminuir as espessuras da cavidade do molde ou aumentar o comprimento do percurso do fundido, as pressões de injeção devem ser aumentadas para serem mantidas as mesmas velocidades nos canais.

3.3.7. Perda da Pressão ao Longo da Cavidade do Molde

Perde-se pressão devido à mudança que ocorre entre a pressão transmitida na ponta da rosca/pistão injetor, e a pressão que é exercida no final da cavidade do molde. Essa alteração pode ser maior ou menor de acordo com a temperatura (viscosidade), velocidade (alteração da viscosidade devido a pseudoplasticidade), geometria da cavidade, e do tipo de material injetado.

3.4. Rosca

A rosca gira como um parafuso sem fim, e carrega o polímero do funil de alimentação para a parte frontal, semelhante a uma extrusora. Ela se move para trás, para criar espaço à sua frente, necessário para a deposição do polímero que ela fundiu e homogeneizou enquanto girava.Ou seja,

ela deposita polímero fundido na sua parte dianteira, sendo que essa massa não entra no molde ainda, porque o bico de injeção está fechado por uma válvula durante esse tempo.

Quando a válvula do bico de injeção se abre a rosca se movimenta para frente, semelhante a um pistão, e injeta a massa fundida para dentro do molde, e para que o polímero não retorne pelos canais da rosca, é fechada a outra válvula existente na ponta.

O nome rosca recíproca se dá devido ao fato de a rosca atuar tanto como parafuso sem fim e como pistão.

Após terminar a injeção para dentro do molde a rosca tem um tempo chamado de empacotamento ou pressurização de recalque, onde ela continua a exercer pressão sobre o injetado. Passado este tempo, a rosca gira e volta para a direção do funil, iniciando novamente o ciclo.

3.4.1. Zonas da Rosca Injetora

Para o melhor entendimento de como ocorre a homogeneização ou plastificação do polímero na rosca da injetora, faz-se uma divisão da rosca em zonas.

Na zona de alimentação o polímero se encontra na forma de grânulos ou pó , e gradativamente deixa de ter viscosidade coulombiana e adquire viscosidade newtoniana. A eficiência na alimentação está relacionada com o atrito existente entre o material e o barril, e entre o material e a rosca. O polímero é arrastado para frente caso o atrito entre o material e o canhão seja maior que o atrito entre o polímero e a rosca. Justificando as ranhuras existentes no cilindro da extrusora que melhoram a eficiência na alimentação (MANRICH, 2002). .

Na zona de compressão (transição) o polímero acelera a passagem do estado sólido para o estado fundido, a função principal desta zona é homogeneizar e misturar bem o polímero, além de comprimir e fundir o material continuando o bombeamento. Na zona de transição o comprimento

é muito importante, porque se for curto, pode causar a degradação do polímero e gerar pulsação no processo, e se for longo ocorre a diminuição da taxa de fusão. O comprimento pode ser calculado através de equações que descrevem o mecanismo de fusão.

O que determina o grau de plastificação do polímero é taxa de fusão na rosca. A plastificação depende de diversos fatores: a troca de calor por condução, por atrito (cisalhamento), e a razão de compressão da rosca na segunda zona, sendo que uma razão de compressão alta significa rápida passagem do material do estado sólido para o fundido.

Em injeção a plastificação está relacionada com o controle da pressão que a rosca volta para trás.

Na zona de controle de vazão ou de bombeamento a principal função é estabilizar o fluxo e gerar pressões para trás, ao longo do comprimento da rosca, para garantir a plastificação. Ocorre também a efetivação da mistura dos elementos do sistema polimérico (polímero mais aditivos), a homogeneização da temperatura, e alto grau de cisalhamento sobre o material.

O polímero é dosado de forma intermitente, acumulando essa dose na dianteira da rosca, onde ele fica depositado até o momento da injeção, é possível fazer equações que descrevem o fluxo nesta zona, sendo que os parâmetros que afetam o fluxo são os seguintes: altura e largura do filete, comprimento da zona, rotação da rosca, angulo da hélice da rosca, viscosidade do polímero e os gradientes de pressão na região.

3.4.2. Variação de Temperatura na Rosca de Injeção

A massa do polímero depositado na rosca pode sofrer variação de temperatura de região para região no volume da massa. As mudanças de temperatura podem ocasionar a formação de camadas dentro do molde com diferentes temperaturas, variação na taxa de resfriamento e enchimento do molde, diferentes propriedades ao longo da peça, como por exemplo, tensões internas diferenciadas.

Nas injetoras modernas é possível variar a rotação da rosca e a pressão de retorno, pois elas possuem um excelente controle de rotação da rosca em diferentes tempos e etapas da plastificação do polímero. Esses efeitos combinados são responsáveis por alterações no cisalhamento que o material sofre dentro da rosca, gerando massa com temperaturas homogêneas. Mas a temperatura também pode variar devido ao tempo variável de permanência do fundido em diversas zonas da rosca.

O número de vezes que a massa estaciona ao longo da rosca, aumenta quanto maior for a capacidade de injeção e menor o volume a ser injetado por ciclo, com isso, o polímero é aquecido através de maneiras e tempos diferentes, ou seja, no momento do transporte por cisalhamento, e pelas mantas elétricas quando está parado.

3.4.3. Roscas com Degasagem

Essas roscas possuem sistemas capazes de retirar gases ou ar que estão presentes no início da fase de fusão do polímero no processamento. São utilizadas com polímeros que possuem voláteis ou higroscópicos.

O tempo de residência do material na rosca, temperatura, rotação da rosca, as pressões antes e depois da zona de degasagem (na degasagem deve ser zero, para evitar a saída do polímero pelo degaseificador), são diferentes quando comparados com roscas comuns. Devido a isso, as injetoras dificilmente utilizam este recurso, pois preferem preparar o sistema polimérico (com umidade e voláteis), em outro equipamento, portanto utilizando a injetora somente para a injeção.

3.4.4. Projetos de roscas por computador

O projeto de rosca via computador tem por finalidade gerar alta qualidade dos injetados, pois devem possuir alto desempenho.Quando se deve obter maior qualidade de plastificação para uma dada temperatura, e para obter ciclos rápidos de injeção no processamento (a injeção rápida),

é recomendado fazer um projeto de rosca via computador. Mas projetos como estes, não são utilizados quando se pretende pouca precisão, pois os custos são elevados e não se viabiliza.

3.5. Detalhes do Processo de Injeção

3.5.1. Fusão do Polímero para Injeção no Molde

Em injetoras com acumuladores, a rosca plastifica o material de forma contínua, deposita em um acumulador e a injeção é realizada por um pistão independente, sendo que a rosca fica estacionária em relação ao funil.

A injetora com rosca recíproca possui duas etapas importantes no ciclo de injeção, ela exerce duas funções, ora atua como rosca (durante o transporte, aquecimento e homogeneização do polímero), ou como pistão no momento em que injeta o polímero fundido para dentro do molde, ou simplesmente pressiona o polímero para dentro da cavidade do molde com velocidade e pressão preestabelecidos.

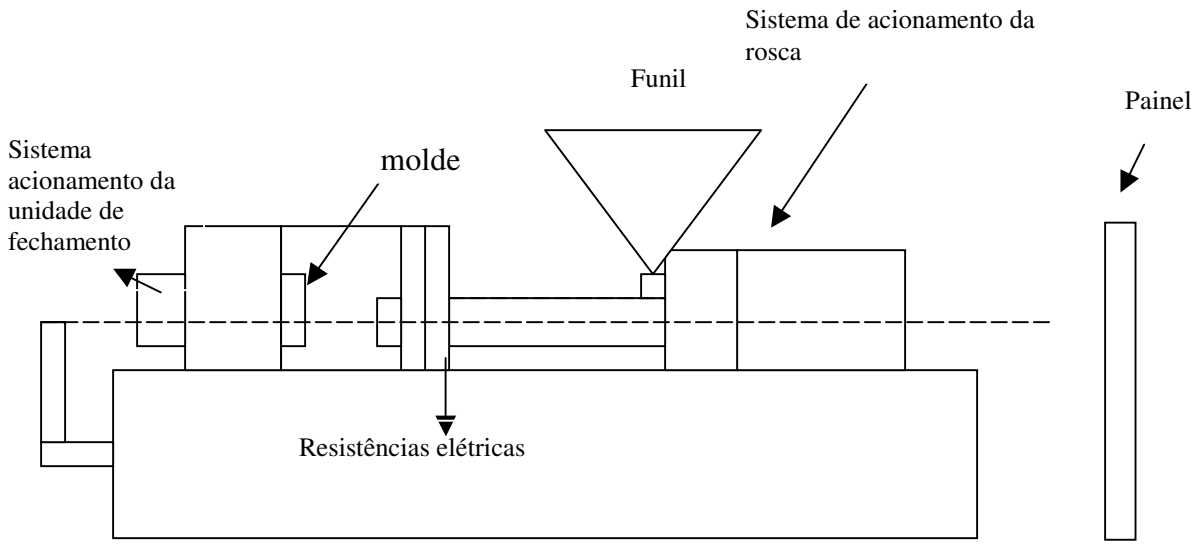


Figura 3.3. - Modelo de injetora

3.5.2. Controle do Processo de Injeção

Os parâmetros relacionados com o processo de injeção são determinados em função do tipo de material, molde, características da máquina e todas as suas variáveis, pois cada máquina possui características próprias como limites de pressões, torque para o giro da rosca entre outras, e os materiais poliméricos também possuem características próprias, podendo variar de acordo com o lote, fornecedor, aditivos e contaminações existentes.

O molde pode ser projetado para um tipo de material ou tipo de máquina injetora, e dependendo do projeto do molde (com canais quentes, com injeção a gás, com mais de uma cavidade, com duas ou três placas) possibilita a produção de peças com propriedades diferenciadas. O desenho do produto influencia nos parâmetros do processo e no comportamento mecânico, pois a peça pode apresentar parede fina, grossa, variável, possuir nervuras, e os parâmetros podem ser controlados através da utilização de um determinado molde, injetora e material específico (MANRICH, 2002).

Os parâmetros de injeção interferem na qualidade do produto final. Entre os principais parâmetros que alteram as propriedades do material injetado estão a contrapressão da rosca durante a plastificação do polímero, a dosagem de material, a temperatura, a homogeneidade do polímero fundido, a velocidade ou gradiente de velocidades de injeção, a pressão de injeção (comutação), a pressão e tempo de recalque, a temperatura do molde, a homogeneidade da temperatura do fluido refrigerante do molde, o tempo de resfriamento e o tratamento do produto após extração.

3.5.3. Propriedades da Injetora

No mercado existem diferentes tipos de injetora. Para se dimensionar uma injetora é necessário conhecer algumas definições:

- Capacidade de injeção (C_I) é a quantidade em gramas do material "B" que pode ser injetado por ciclo, a capacidade de injeção do material de referência "A" que é o Poliestireno (PS), densidade a 23ºC é próxima de 1g/cm^3, é fornecido pelo produtor da máquina.

$$C_{IB} = C_{IA} \frac{\rho_B}{\rho_A} \text{ [g]} \qquad \text{(equação 3.1)}$$

Sendo ρ = densidade no estado fundido respectivamente de A (PS) e B(teste).

- Capacidade de plastificação (C_P) é a quantidade máxima de material "B" que a injetora consegue homogeneizar em um período de tempo.Também a C_P fornecido pelo fabricante refere-se ao Poliestireno, mas existe uma equação que possibilita determinar o C_P para o material desejado, através dela é possível determinar o quanto de material é plastificado por hora durante o processamento, como segue:

$$C_{pB} = C_{pA} \frac{\rho_B}{\rho_A} \qquad \text{(equação 3.2)}$$

- Pressão de injeção (P_{inj}) [bar] ou [Mpa] é a pressão exercida pelo pistão sobre o polímero durante o preenchimento do molde, ou seja, é a pressão necessária para preencher o molde sem pressurização, não sendo necessária a pressão de comutação, que é aquela pressão de mudança de pressão de pressurização para a pressão de recalque.

- Pressão de recalque (P_{rec}) [bar] ou [MPa] é aquela que ocorre após a pressurização, normalmente ocorre a comutação da pressão de pressurização para a de recalque, e assume valores inferiores para evitar a geração de tensões internas na peça injetada, garantindo que o material injetado não retorne para dentro do molde.

- A força de fechamento de uma injetora deve ser sempre superior a máxima força de abertura do molde originada pela pressão máxima de injeção, pois ela deve manter o

molde suficientemente travado enquanto as pressões de injeção, pressurização e recalque são exercidas, devido ao fato de essas pressões forçarem a abertura das placas do molde, provocando vazamento de material fundindo e gerando rebarbas. Para calcular a força de fechamento, é necessário conhecer a área da cavidade do molde onde o polímero fundido exerce pressão, que pode ser a área projetada da cavidade no plano perpendicular á direção da pressão. As forças de fechamento podem ultrapassar 3000 toneladas, quando a pressão na cavidade possui valores entre 200 a 1300 kgf/cm^2. Sendo que a força de fechamento (F_f) é fornecida pela equação a seguir , onde P_{cav} é a pressão na cavidade.

$$F_f = A \bullet P_{CAV} = \left(\frac{1}{2} \text{ a } \frac{1}{3} \right) A \bullet P_{inj} \qquad \text{(equação 3.3)}$$

$$P_{inj} = P_{hidraulica} \bullet \frac{Apistão}{Arosca} \qquad \text{(equação 3.4)}$$

A massa de polímero injetado em cada ciclo, para preservar a injetora recomenda-se não ultrapassar 80% da capacidade de injeção da máquina. Para calcular o peso injetado, deve-se conhecer o volume total da cavidade (v), e a densidade do material (ρ).

- Velocidade de injeção (v_{inj}) [cm^3 / s] é a velocidade com que o polímero fundido é enviado para dentro do molde durante a fase de preenchimento, a regulagem da velocidade de injeção é com o movimento do pistão da injetora, na maioria dos casos com a própria rosca, sendo que o diâmetro do pistão não varia, pois conhecendo a velocidade do pistão , sabe-se a vazão do material. Algumas máquinas fornecem como especificação da velocidade máxima apenas o valor da vazão máxima em (cm^3/s).

3.5.4. Controle das Temperaturas das Zonas de Aquecimento na Injetora

As temperaturas em cada zona da rosca e do canhão devem ser bem controladas, pois a plastificação do polímero dentro da rosca depende de diversos fatores, como velocidade,

geometria da rosca e tipo de polímero usado. Cada material deve ser testado para se determinar a temperatura ótima de processo em cada zona do cilindro.

Temperaturas mais altas são utilizadas quando a dosagem é alta, pois o polímero passa mais depressa pela rosca ou fica menos tempo estacionado. Ao variar a dosagem, o tempo de permanência dentro da rosca também varia durante o processamento. E para ocorrer a plastificação do polímero na viscosidade ideal para a injeção no molde, o controle da temperatura em cada zona, deve levar em consideração a dosagem correta do polímero.

A temperatura do cilindro afeta as propriedades do polímero fundido, pois a condutividade térmica dos polímeros é baixa, e a temperatura gerada pelo atrito dentro da rosca faz com que a temperatura do polímero fundido aumente muito, não sendo possível retirar o excesso de calor rapidamente, esse superaquecimento pode degradar as cadeias e reduzir a viscosidade do polímero fundido.

Considera-se que o polímero está plastificado quando atinge a viscosidade ideal para ser injetado, está homogêneo e não apresenta degradação. A capacidade de plastificação da injetora está relacionada com a quantidade de calor que deve ser introduzido no polímero, por unidade de tempo.

A qualidade de uma peça injetada depende do fluxo de resfriamento dentro do molde, e do histórico de plastificação do polímero. O calor específico e a entalpia fornecem a quantidade de aquecimento e energia por grama de material, necessário para atingir o estado plastificado.

3.5.5. Contrapressão para Plastificação na Rosca Injetora

É a pressão contrária à pressão de dosagem. Ocorre a diminuição da vazão do óleo hidráulico no momento do retorno para o tanque.

O cisalhamento do polímero ocorre dentro da rosca, devido à diferença de pressão ao longo do seu comprimento, sendo que no cisalhamento, ocorre a geração de calor por atrito, o que causa homogeneização da massa. A pressão ao longo da rosca pode ser controlada através do monitoramento da resistência imposta à rosca, durante o seu retorno em direção ao funil, uma vez que, é o material depositado pela rosca à sua frente, que a empurra para trás quando supera o nível de pressão pré-estabelecida. Esse gradiente de pressão contribui para a variação da qualidade de plastificação dentro dos canais da rosca da injetora, e evita a passagem do ar do funil para frente.

Na contrapressão, os valores são em torno de 15 kgf/cm^2 , sendo que esse valor depende da tendência do material em degradar quando submetido a energia cisalhante oriunda do gradiente de pressão, que é somada ao cisalhamento resultante do arraste . A energia da tensão cisalhante é a que se transforma em calor (gerado por atrito).

Com a variação da pressão , a qualidade de plastificação do polímero se altera. O atrito gerado pela contrapressão, não pode causar aquecimento em demasia ao polímero, para não ocorrer degradação.

3.5.6. Rotações da Rosca

A rosca de plastificação (ou parafuso) irá girar, fazendo com que o material plástico, no estado sólido, seja introduzido no cilindro de injeção através de um funil, ao mesmo tempo também a rosca de plastificação recuará. Com o recuo, a rosca de plastificação desloca entre seus filetes o material em direção a área compreendida entre a ponta da rosca e o bico de injeção, e através do atrito, pressão e temperatura o material plástico que estava no estado sólido (granulado ou pó) funde-se (plastifica-se), preparando a máquina para o próximo ciclo.

A plastificação do polímero além de estar relacionada com a temperatura das resistências elétricas e do cisalhamento, também sofre a influência dos efeitos da rotação da rosca. A

aceleração da rotação da rosca aumenta a vazão, ou bombeamento que além de elevar a temperatura ocasiona a degradação e a queima de alguns polímeros reduzindo a viscosidade.

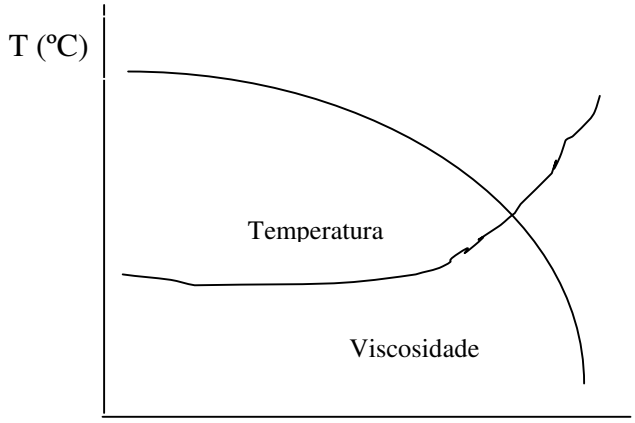


Figura 3.4. - Rotação da rosca, viscosidade e temperatura do polímero fundido (BRETAS, D'AVILA , 2000).

As propriedades do polímero fundido dosado dentro do cilindro, alteram as propriedades da peça acabada, sendo as características mais afetadas, o grau de homogeneidade (os elementos que compõe a massa devem ser homogêneos (aditivos, polímero, carga, entre outros), além do que, é necessário que a temperatura também seja uniforme, pois pequenas variações na temperatura provocam desigualdades dentro do molde). A viscosidade deve ser correta (para preencher o molde a uma dada velocidade de injeção, pois se a viscosidade estiver muito baixa, exige maior pressão de injeção, além de perder pressão ao longo do comprimento do fluxo. E se estiver muito alta ocorre grande expansão volumétrica, e necessita maior tempo para resfriamento dentro do molde. Deve-se evitar a degradação do polímero (quando está acima do limite, altera irreversivelmente as propriedades do produto final).

3.5.7. Preenchimento da Cavidade do Molde

Durante o preenchimento da cavidade do molde, a taxa de cisalhamento pode chegar a valores como $10^3 s^{-1}$, pois trata-se da maior velocidade do fluxo e no ponto de injeção pode ter

$10^5 s^{-1}$ em média. A velocidade de injeção deve ser alta para que o polímero fundido não resfrie, e para contribuir com a orientação das moléculas no sentido do fluxo. Embora as moléculas no polímero fundido apresentem movimentos brownianos elevado, a orientação molecular ocorre, e permanece por um período de tempo. Se a massa congelar antes da recuperação dessas orientações, pode ocasionar moléculas instáveis, tensionadas, e estiradas, caso exista a assimetria da distribuição dessas orientações. O congelamento também pode ocasionar uma camada congelada que varia em espessura (até cerca de 12% da espessura total por onde está passando o fluido).

As altas velocidades exigem que as pressões também sejam elevadas, pois parte da energia é transformada em calor devido ao alto atrito entre as moléculas.

Pode-se determinar a velocidade e a taxa de cisalhamento em função da geometria por onde o polímero flui com vazão constante, sendo que, a pressão para manter a vazão aumenta em decorrência do resfriamento provocado pelas paredes frias do molde alterarem a viscosidade do polímero fundido.

A velocidade de injeção pode sofrer variação durante o preenchimento do molde e pode ser variada enquanto o pistão avança. As velocidades elevadas melhoram as linhas de solda do moldado e o brilho da peça, além de diminuírem as tensões localizadas, eliminar defeitos como casca de laranja e reduzir o empenamento. Entretanto, o aumento elevado da velocidade de injeção, pode gerar rebarbas, criar manchas prateadas, amarronzadas, dispersar menos os pigmentos e delaminação.

Para não impedir o fluxo do polímero nas cavidades do molde, deve-se evitar o congelamento, a espessura congelada pode ser controlada com a variação de parâmetros que afetam a velocidade e a temperatura, como: vazão ou velocidade do pistão injetor, temperatura do molde, temperatura do fundido ao entrar no molde, e até mesmo a espessura do molde afeta a camada congelada, pois a taxa de cisalhamento, que gera calor, varia com esse parâmetro. Na camada congelada, a velocidade da massa que compõe a camada está em zero, e como a taxa de

cisalhamento deriva-se da velocidade em cada ponto, a taxa de cisalhamento na parede também é zero.

O atrito próximo à camada congelada, quando intenso pode destruir a camada, e o polímero volta ao estado fundido, ou pode não evoluir durante o preenchimento, ocorrendo estagnação, devido ao equilíbrio que se estabelece entre geração e troca de calor.

As moléculas do polímero fundido são alinhadas no sentido do fluxo e a orientação é maior onde ocorre maior taxa de cisalhamento e resfriamento, a orientação é desejável, pois gera alguns benefícios como: resistência à fluência e a tração na direção de orientação e resistência ao impacto transversalmente à orientação. Quanto maior o tempo de aplicação de uma tensão, maior é o alinhamento das moléculas no sentido do estiramento. Como ocorre mudança de viscosidade devido a alterações da temperatura e da taxa de cisalhamento ao longo do processo, é de se esperar que o produto tenha diferentes viscosidades do fundido ao longo da sua espessura.

Lubrificantes externos são utilizados para auxiliar no escorregamento das moléculas, e evitar o excesso de calor gerado pelo atrito, a função do lubrificante é diminuir a energia necessária para uma camada escorregar sobre a outra. O calor gerado no atrito decorre em parte, da energia cisalhante utilizada para iniciar o movimento da massa, e quanto mais alta a resistência oferecida pela massa, maior a energia ou tensão de cisalhamento necessário, e mais energia é transformada em calor.

A taxa de cisalhamento, é a taxa em que o material escorrega sobre si mesmo, em camadas com espessuras infinitesimais. Já a tensão de cisalhamento é função de uma força ou energia que atua tangencialmente em uma área.

Em injeção de plásticos, quando o polímero não escorrega na parede durante o fluxo de preenchimento, a taxa de cisalhamento na parede do molde é normalmente zero, pois o material ao encostar-se à parede fria, se congela e dificilmente se movimenta, a velocidade portanto é normalmente zero.

A tensão de cisalhamento provoca uma orientação, que é recuperada antes do resfriamento total do polímero, quando é cessado o fluxo. Durante o fluxo ocorre competição entre movimento browniano e deformação, pois quando o polímero não está sob tensão e taxa de cisalhamento prevalece o movimento browniano. A taxa de troca de calor entre o plástico e o molde, e a energia cisalhante, é o que determina o equilíbrio ou o desequilíbrio da competição.

A orientação não depende apenas da velocidade de preenchimento do molde ou da temperatura do fundido, ela depende também da pressão de empacotamento, do resfriamento e da contração, sendo afetada pelos parâmetros do processo podendo variar de região para região ao longo da espessura. Quando os moldes apresentam paredes quentes e polímeros mais quentes, por exemplo, ocorrem menores orientações, pois o polímero recupera a deformação imposta pelo fluxo, por permanecer mais tempo quente dentro do molde.

O polímero ao passar por canais estreitos sofre alto nível de cisalhamento ocasionando a cristalização induzida, onde as moléculas se orientam, se aproximam, gerando núcleos ordenados e estáveis, que iniciam os cristais, que crescem rapidamente assim que o polímero preenche o molde. A cristalização ocorre a temperaturas maiores que o normal, e o polímero congela prematuramente dentro do molde, geralmente atinge o não fluxo a temperaturas mais altas.

A cristalização induzida por tensão cisalhante e a pressão hidrostática podem ocorrer na região do ponto de injeção, pois é o ponto de maior estrangulamento e as moléculas se orientam bastante, essa cristalização faz com que os núcleos dos cristais se estabeleçam e favoreçam a cristalização uniforme dentro da cavidade. Agentes nucleantes podem ser adicionados para acelerar a cristalização e fazer com que a massa atinja o congelamento de forma mais uniforme e rápida. Ao se adicionar agentes nucleantes deve-se garantir que toda a massa necessária entre no molde, antes da cristalização, controlando os parâmetros do processo, como velocidade de injeção, temperatura do molde e do fundido, pressão, entre outros.

As condições de cristalização de polímeros semicristalinos são alcançadas na fase de preenchimento, pois já ocorre o início do resfriamento do polímero fundido. A cristalização inicia

na parede e se estende até o centro da espessura, o tamanho e porcentagem dos cristais variam de camada para camada na espessura da cavidade, sendo que essa variação na cristalinidade gera propriedades especificas na peça. Ao longo da espessura gera multicamadas com cristalinidade e graus de orientações das moléculas, variáveis, ocasionando comportamento parecido com o comportamento de um material conjugado, composto de muitas camadas de materiais com diferentes propriedades, podendo ser desejada na maioria dos casos, tendo em vista que é possível obter um espectro de propriedades ao longo da espessura da peça acabada.

3.5.8. Pressurização do Polímero Dentro da Cavidade

Com a pressurização, maiores quantidades de massa entram no molde, com velocidade mais baixa do que na primeira fase, ocorrendo assim que a cavidade do molde acaba de ser preenchida. O fundido é comprimido dentro do molde que já está cheio de massa, quanto maior a pressão, mais massa é enviada. Como o volume da cavidade é constante e mais massa é enviada sob pressão, a densidade no interior do molde aumenta.

A pressurização deve ser aplicada durante um período de tempo, antes de comutar para a pressão de recalque, pois também faz variar a quantidade de massa introduzida nesta fase. Ela pode ser classificada de duas formas: como se fosse a continuação da primeira fase, e pode ser incorporada na próxima fase, pois é uma fase de baixa velocidade, dependente de tempo x pressão.

As pressões de recalque elevadas podem causar o deslocamento da camada congelada, e gerar defeitos como desfolhamento na peça acabada ou marcas de fluxo, e podem gerar empenamentos. Dependendo do encolhimento, mais massa pode ser enviada durante a fase de recalque, mesmo que o molde já tenha sido preenchido durante a fase de preenchimento, e de pressurização, pois quanto mais pesada ficar a peça menos tem a encolher em relação ao molde. O controle do encolhimento da peça é realizado com relação ao peso da mesma.

A pressão de recalque corrige alguma deficiência no valor correto da comutação, o ponto de comutação é definido como o ponto onde, abaixo dele falta material para completar a massa dentro do molde, ocasionando chupagens ou encolhimentos fora do especificado. Acima do ponto de comutação, pode sobrar massa podendo causar expansão ou gerar encolhimento abaixo do mínimo na peça ocasionando dificuldades de extração ou rebarbas na peça. O ponto de comutação pode ser regulado de quatro formas: por tempo, por curso, por pressão hidraulica e por pressão na cavidade, sendo que quando ele está bem controlado, as peças são produzidas com baixo nível de tensões, com encolhimentos adequados e uniformes.

3.5.9 Contração em Peças Injetadas

Durante a injeção o polímero está fundido a uma temperatura em torno de 170 a 300 º C acima da temperatura ambiente, ocorrendo uma expansão térmica em torno de 25%. Mas após este processo, quando o polímero está em temperatura ambiente, o mesmo sofre contração. Para que a peça não apresente contração dentro do molde, é necessário enviar mais massa do que o molde comporta, essa massa em excesso, é enviada sob alta pressão. Se for enviada sob alta pressão mais 25% de massa, a peça sofre contração ou encolhimento zero, mas isso não é benéfico para o processo, pois sem o encolhimento a peça fica aderida a parede do molde não sendo permitido a sua extração. Portanto um pequeno encolhimento é desejado, no caso de polímeros amorfos o ideal é em torno de 0,3 a 0,8%, já os semicristalinos o ideal é entre 0,6 a 2,2%, podendo variar de acordo com o tipo de polímero, e do nível de tensões internas permissíveis (MANRICH, 2002). .

Os polímeros cristalinos possuem uma faixa de contração pequena, pois temperaturas mais altas e pressões exageradas de comutação ocasionam a degradação e danificam o produto. Já os polímeros amorfos podem ser pressurizados até próximo a temperatura de extração, e a transmissão de pressão é boa quando a temperatura está alta. Para os polímeros cristalinos é recomendado projetar um encolhimento maior, devido a maior contração. Esse fenômeno ocorre nos polímeros cristalinos, porque após a injeção da massa dentro do molde, os polímeros

continuam o processo de estruturação molecular, que é a cristalização, o que contribui para um maior encolhimento.

A variação do encolhimento está relacionada com a temperatura, tanto do molde como do fundido. Quanto maior a temperatura do molde, maior é o grau de encolhimento, pois o molde, trocando menos calor, resulta em um encolhimento final da peça maior. Na massa fundida, quanto maior a temperatura do fundido, para a mesma temperatura do molde, dependendo da atuação da pressão de recalque, irá ocorrer o maior ou menor encolhimento da peça. Se a pressão de recalque deixar de atuar mais cedo, a massa quente dentro do molde vai encolher mais, mas se a pressão de recalque atuar por um longo período de tempo, e os canais não congelarem o encolhimento é menor.

O encolhimento da peça está relacionado com o perfil de empacotamento da massa, a temperatura do fundido e do molde, sistema de resfriamento, as variações de espessura que ocasionam diferenças na transmissão de pressão, e a localização dos pontos de injeção.

Para controlar o encolhimento da peça corretamente, deve-se levar em conta o projeto do molde e os parâmetros de moldagem. Entre os fatores a serem considerados estão a escolha do polímero que deve ser feita considerando fatores que minimizam o encolhimento e as propriedades do produto acabado. Cálculos precisos do encolhimento da peça considera ponto a ponto na fase do projeto, após a determinação do polímero a ser utilizado. Correta localização dos pontos de injeção, para que o fluxo e o preenchimento do molde ocorram simetricamente, evitando o encolhimento não uniforme.

O controle de parâmetros de processo leva em consideração a minimização da temperatura do molde e da massa polimérica, otimização de velocidades e pressões de moldagem, utilização de pressão na massa, para obter um preenchimento da cavidade rápido, com o máximo de massa possível, para que não seja necessário compensar muito o encolhimento durante o resfriamento. Assim, com a utilização de valores ótimos de pressão e temperatura obtem-se

peças com peso constante e preestabelecido. A determinação do correto ponto de comutação, para minimizar o encolhimento também deve ser considerada.

3.5.10. Controle do Ciclo de Injeção

O correto controle do ciclo de injeção ocasiona a obtenção de maior custo benefício no processamento dos polímeros. O fabricante de peças injetadas está sempre buscando aumentar esse custo benefício, através do controle do custo da matéria-prima, otimização dos ciclos de injeção, tentando reduzir o tempo de resfriamento do moldado, no projeto dos moldes. No projeto do molde, por exemplo, é possível aumentar o número de cavidades em função da produção ao longo do tempo, tamanho da peça, tipo de injetora disponível e tipo de material utilizado. É possível ainda mesmo após a instalação do molde, otimizar os tempos de processamento eliminando tempos mortos (velocidade de fechamento e abertura do molde) de travamento e proteção de molde, de extração da peça e os outros tempos que não são classificados como mortos, como tempo de preenchimento do molde, de recalque e resfriamento total.

A variação dos tempos no processamento do polímero altera também outros parâmetros do processo, com isso as propriedades do moldado ficam diferentes. A otimização do ciclo de injeção e a qualidade do produto podem ser obtidas através da temperatura do molde, sendo alta, permite diminuir a velocidade de injeção, garantindo que o polímero não se torne frio, uma vez que perderia a capacidade de escoar. A temperatura alta do molde permite controlar a cristalização, no caso de polímeros semicristalinos. O encolhimento do material também pode ser alterado com a temperatura do molde.

O peso final da peça e o grau de tensões internas da peça são alterados de acordo com a temperatura da massa fundida. Alguns graus alterados na temperatura do fundido, já é suficiente para mudar as características do produto final. Ao aumentar gradativamente a temperatura do fundido, ocorre a redução rápida da pressão necessária para injetar o polímero, sendo que o nível de tensões fica reduzido dentro do molde. Mas se a temperatura estiver muito alta, observa-se uma redução menos acentuada da pressão de injeção; o polímero pode sofrer degradação; e o

peso do moldado também varia com altas temperaturas. Em temperaturas baixas ocorre uma queda mais rápida do gradiente de temperatura ao longo dos canais do molde, ocasionando o empacotamento com baixas pressões, resultando em peças com baixo peso. A viscosidade do fundido cai bastante com um pequeno aumento da temperatura do fundido, e a transmissão da pressão ao longo dos canais do molde sofre um aumento, o que permite o melhor empacotamento da massa polimérica na cavidade reduzindo a tendência de chupagem. Mas ao se aumentar à temperatura ainda mais, ocorre novamente a diminuição do peso da peça, porque ocorre o maior encolhimento ou contração do polímero em temperaturas muito altas.

Com a variação da velocidade, observa-se o efeito sobre a pressão necessária para o preenchimento do molde, ou seja, esses dois fatores competem e atuam conjuntamente. Em velocidades de injeções muito altas, ocorrem altas taxas de cisalhamento ocasionando o aumento da pressão necessária para o preenchimento do molde. Mas se abaixar muito a velocidade de injeção, ocorre uma menor taxa de cisalhamento, e a temperatura do fundido irá diminuir devido a troca mais rápida de calor por condução, necessitando então de altas pressões de injeção. Para tempos intermediários de preenchimento existe um equilíbrio da temperatura por troca e geração de calor, sendo necessário menores pressões de injeção. As altas velocidades de injeção também ocasionam altas pressões, porque o material flui muito rapidamente. As baixas velocidades de injeção, ocasionam tempo elevado para preenchimento do molde, geram altas pressões, devido a temperatura do fundido no final do fluxo atingir valor muito baixo. O molde é preenchido mais rapidamente quando a temperatura do fundido é mais alta.

A tensão sofrida pelo polímero varia longitudinalmente ao fluxo do mesmo, na cavidade do molde. A variação depende do início ou fim do fluxo. No início do fluxo, que fica próximo ao ponto de injeção, não existe grandes trocas de calor, e as tensões dependem somente da taxa de cisalhamento, portanto, se forem diminuídas as velocidades de injeção, as tensões também diminuem. Já no final do fluxo, existe o conflito entre altas tensões para altas velocidades de injeções e baixas temperaturas para baixas taxas de cisalhamento devido a troca de calor. As velocidades de injeção e temperaturas intermediárias do fundido geram baixos valores de tensões no final do fluxo.

Se a pressão de recalque for muito alta, mais massa fundida entra dentro da cavidade do molde, causando maior peso na peça injetada. A duração de tempo em que é aplicada a pressão de recalque, só tem efeito quando o polímero está dentro da sua faixa de trabalhabilidade, quando existe a possibilidade de fluxo, o envio da massa fundida irá depender somente do valor da pressão.

3.5.11 Propriedades do polímero acabado em função da estrutura molecular

O tipo de polímero e estrutura molecular definem as propriedades de uma peça acabada. A estrutura depende do arranjo molecular microscópico e macroscópico, sendo que depende dos parâmetros do processo (T_{inj} , T_{molde} , P_{inj} ,P_{rec} , t_{rec}, t_{resfr}, e geometrias). Esses parâmetros influem sobre a estrutura microscópica cristalina, alteram a estrutura macroscópica da orientação molecular, tensões internas, e o encolhimento volumétrico. Quando o polímero está carregado com fibra de vidro, a orientação, distribuição ao longo da espessura, e a interação entre a fibra e o polímero também são afetadas pelos parâmetros do processo.

A qualidade da peça acabada é medida conforme a ausência de chupagem, tensões internas residuais pequenas e ausência de marcas de fluxo. As propriedades mecânicas variam em função do grau de orientação da peça, nível de tensões internas, cinéticas de cristalização.

Quando ocorre a variação da estrutura do polímero em função da alteração do processo, também são alteradas as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade, resistência ao impacto, dureza, estabilidade dimensional, etc.

Capítulo 4

Discussão das Variáveis

4.1. Defeitos de Moldagem na Injeção dos Plásticos

Os problemas encontrados na moldagem por injeção estão diretamente relacionados a quatro fatores: as condições de processamento, a máquina injetora, o molde e a matéria-prima.

Um caminho para a minimização de defeitos na moldagem por injeção, é a lógica Fuzzy que faz a determinação dos pontos de regulagem dos parâmetros do processo, e analisa entre outros fatores a diferença de temperaturas até o final do preenchimento, o critério de recalque e o gradiente de atrito da linha de frente, usando um programa de simulação de preenchimento (TAN, YUEN, 2004).

Nas condições de processamento, os parâmetros de controle do processo devem estar adequados com o material que irá ser injetado.

É essencial que a máquina injetora, esteja adequada ao uso, a capacidade para o processamento deve ser considerada.

O molde deve apresentar superfície lisa e brilhante, para facilitar o fluxo do material, e diminuir as chances de geração de calor devido à fricção.

A matéria-prima deve apresentar as características requisitadas no projeto do produto.

Para evitar o aparecimento de defeitos, é recomendado que todos os passos do processamento sejam registrados, mas após o surgimento do defeito na peça injetada, deve-se traçar um plano usando uma abordagem lógica, sistemática e organizada, sendo que o plano deve ser executado passo a passo.

Existem maneiras de se prevenir os defeitos em peças injetadas, para isso devem-se controlar as variáveis que influenciam no processamento, sendo que as variáveis que estão sob o controle do operador também devem ser levadas em consideração.

Como variáveis que influenciam o processamento tem-se as temperaturas, pressões, tempos, máquina injetora, polímero utilizado, experiência do operador, projeto do produto e do molde e as variáveis que estão sob o controle do operador tem-se as temperaturas, pressões, tempos e velocidades, manutenção da injetora e dos moldes, e as habilidades e o conhecimento do próprio operador.

4.1.1. Temperaturas

A temperatura do material fundido é influenciada pela fricção e cisalhamento ocasionado pela rotação da rosca.

Existem fatores que influenciam na temperatura do material, e são controlados pelo operador como: a rotação da rosca, a contrapressão, o funcionamento inadequado da válvula de não retorno e dos termopares, a obstrução no caminho que o material percorre, a velocidade de injeção, e o tempo de residência do material no cilindro.

Existem ainda outros fatores que influenciam a temperatura do material, e que estão fora do controle do operador como a geometria da rosca e do bico de injeção, canal da bucha e canais de

distribuição e pontos de injeção, cantos afiados, acabamento superficial do molde e a remoção do ar do molde.

Quando a peça já está injetada, a sua qualidade e produtividade está relacionada com a temperatura que o material foi fundido, sendo que as altas temperaturas podem ocasionar deposição de voláteis nos canais de remoção de ar, escorrimento do material pelo bico da injetora ou formação de fiapos, esguichamentos e defeitos ao redor do ponto de injeção,rebarbas,degradação térmica, compactação excessiva, ciclos longos, rechupes.

As temperaturas baixas também influenciam na qualidade e produtividade da peça injetada, e podem ocasionar problemas de aparência leitosa (em peças transparentes), linhas de solda fracas, cristalinidade incompleta, afetando na contração da peça, contração pós-moldagem, empenamento, formação de linhas de fluxo, acabamento superficial ruim, peças incompletas, peça não compactada, alto nível de tensões residuais, desgaste excessivo na máquina e moldes, perda de propriedades mecânicas.

Assim como, as temperaturas muito altas do molde também influenciam na qualidade e produtividade da peça injetada, elas podem ocasionar problemas de extração deficiente, ciclos mais longos, rebarbas, rechupes, compactação excessiva e aprisionamento de ar.

As temperaturas muito baixas do molde também exercem influencia na qualidade e produtividade da peça injetada, devido a fatores como tensões residuais, acabamento superficial pobre, peças incompletas, linhas de fluxo, linhas de solda frágeis e baixa cristalinidade.

4.1.2. Pressões

A pressão de injeção é a força necessária para expelir o material para fora do canhão, e injetar através do bico de injeção, canal da bucha, canais de distribuição e para os pontos de injeção do interior das cavidades do molde. É um fator que influencia na qualidade da peça, sendo que a pressão de injeção, o recalque e a contrapressão são controlados pelo operador.

As baixas pressões podem ocasionar problemas relacionados à falta de preenchimento, acabamento superficial pobre, linhas de solda fracas e rechupes.

Pressões elevadas ocasionam problemas como compactação excessiva, formação de rebarbas e alto nível de tensões residuais.

As pressões de recalque são menores que as pressões de injeção. Ocorre a fusão e compressão do material, que provoca uma queda na pressão. No resfriamento, a pressão de recalque é aplicada até que o ponto de injeção se solidifique, para evitar que o material retorne para fora da cavidade. Ela auxilia na compensação e contração da peça, durante o resfriamento, devido ao fato de introduzir quantidade extra de material.

Também influenciam diretamente na qualidade e produtividade da peça injetada, quando estão baixas ocasionando acabamento superficial pobre, linhas de solda fracas, rechupes.

Quando as pressões de recalque estão elevadas, a peça pode apresentar compactação excessiva, formação de rebarbas, e alto nível de tensões residuais.

A rosca ao retornar exerce uma pressão denominada contrapressão sendo obrigada a exercer uma força maior durante a sua retração. A contrapressão permite que, a porção de ar existente entre os grânulos do plástico na zona de alimentação da rosca seja expelido, e melhora a mistura do material e a sua plastificação, produz um material fundido de consistência mais homogênea.

A contrapressão pode influenciar na qualidade e produtividade da peça. Quando a contrapressão está baixa, poderá ocorrer má homogeneização do polímero fundido, bem como a má dispersão de pigmentos e aditivos e rechupes. Quando a contrapressão está elevada, ocorrerá cisalhamento anormal e a peça apresentará aquecimento excessivo com marcas de degradação do polímero e/ou aditivos.

4.1.3. Tempos e Velocidades

A duração do ciclo e a velocidade de injeção são fatores que influenciam a qualidade e produtividade dos produtos injetados. Os ciclos longos ocasionam baixa produtividade, aumento do tempo de residência, variações na temperatura do molde, que provocam inconsistência da qualidade da peça.

Quando os ciclos são curtos, podem provocar extração deficiente, marcas causadas pelos extratores, deformações e empenamentos da peça,

As velocidades de injeção quando estão elevadas ocasionam enchimento mais rápido aumentando a possibilidade de degradação, originando defeitos como os esguichamentos e carbonizações a frente de fluxo.

Baixas velocidades de injeção acarretam preenchimento incompleto da peça, formação de rechupes e vazios, linhas de solda mais fracas, recalque deficiente e marcas de fluxo.

4.2. Exemplos de Defeitos em Peças Injetadas

4.2.1. Estrias Marrons

São estrias de coloração marrom, amarelada ou preta que surgem na peça injetada, decorrente da degradação do polímero como pode ser observado na figura 4.1. Ocorrem devido a quatro fatores: matéria-prima, máquina injetora, processamento, e o projeto do molde.

A matéria-prima pode estar contaminada, ter presença de umidade no polímero, ou o material ser sensível termicamente, ou ainda devido a instabilidade térmica de aditivos. Essas características da matéria-prima propiciam o surgimento de estrias marrons.

Na máquina injetora fatores como cisalhamento excessivo na rosca, obstrução no fluxo do material, cisalhamento excessivo na válvula de não retorno ou no bico da injetora, pontos mortos no trajeto do material, podem causar estrias marrons.

No processamento, as características que propiciam o surgimento de estrias marrons estão relacionadas a temperatura do canhão e rotação da rosca muito elevadas, tempo de residência muito longo, contrapressão elevada, colchão muito grande e velocidade de injeção muito alta.

Já no projeto de molde, os fatores que podem acarretar o surgimento de estrias marrons são restrições no ponto de injeção ou canais de alimentação e os cantos afiados.

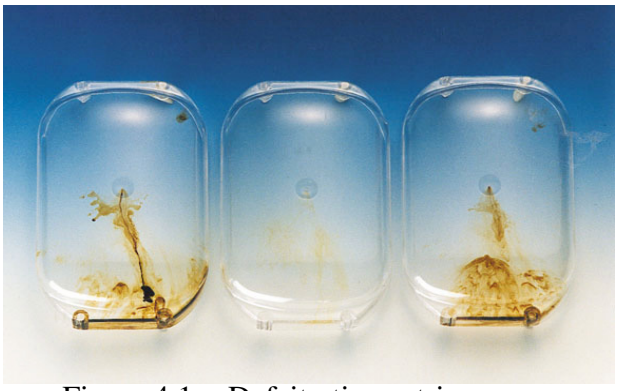


Figura 4.1. - Defeito tipo estrias marrons

4.2.2. Pontos Pretos

Os pontos pretos são ocasionados pela carbonização do polímero, ocorre o surgimento de pequenas partículas encravadas na peça, sendo causados por formação de um filme de material degradado, recobrindo a rosca ou o cilindro que se desprende a cada ciclo, apresentando marcas finas no material, principalmente em reciclados. Exemplos de defeitos tipo pontos pretos podem ser observados na figura 4.2.

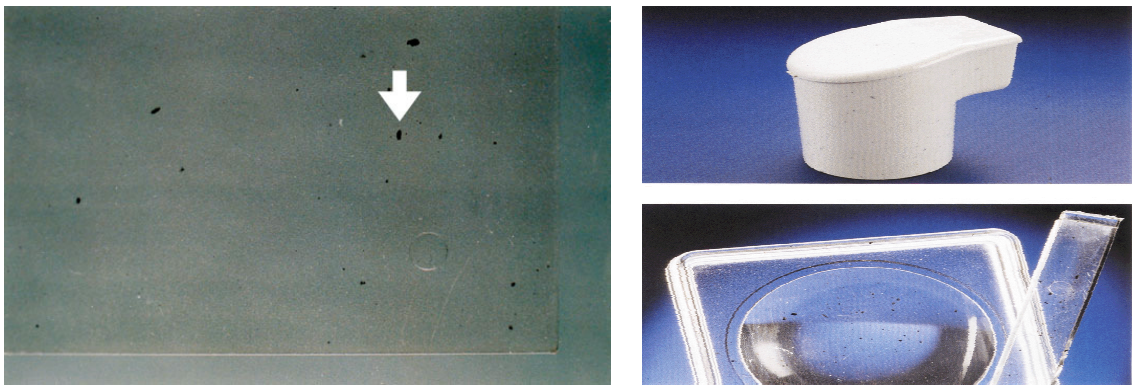


Figura 4.2.-Defeito tipo pontos pretos (Geplastics, 2007)

4.2.3. Efeito Diesel ou Carbonização da Frente de Fluxo

O efeito Diesel ocorre devido à carbonização do material, geralmente nas regiões finais de fluxo, e em alguns casos na região de encontro das linhas de solda. As principais causas são os canais de saída de ar do molde em número ou dimensões insuficientes e velocidades de injeção elevadas. A figura 4.3. apresenta um exemplo de defeito tipo Diesel.

Figura 4.3.-Defeito tipo efeito Diesel

4.2.4. Delaminação

Ocorre quando duas camadas de material não estão coladas homogeneamente e começam a descascar mediante a aplicação de uma força, causada pela presença de contaminantes que podem

ser tanto outro polímero ou mesmo aditivos que sejam incompatíveis com o polímero A figura 4.4. apresenta exemplos de defeitos tipo delaminação (MARTINS,2006).

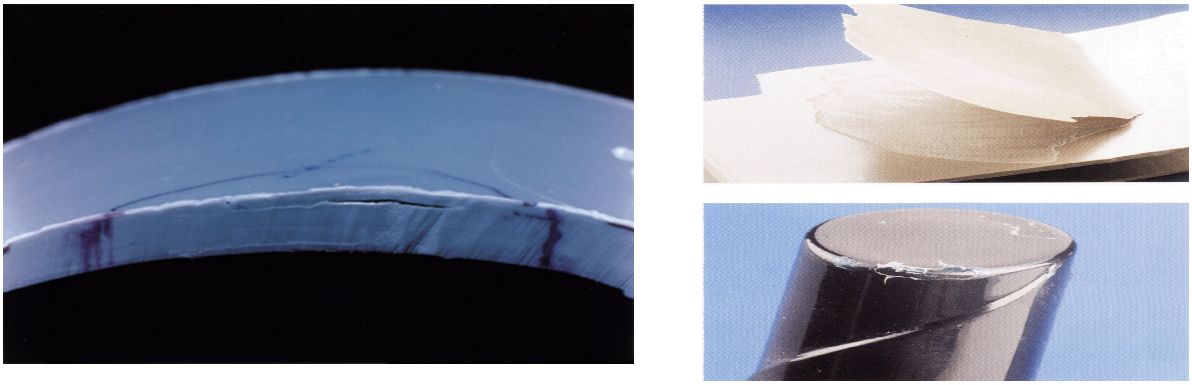


Figura 4.4.-Defeito tipo delaminação (Geplastics, 2007)

4.2.5. Vazios e Rechupes

Os vazios e rechupes são depressões originadas na superfície da peça injetada, sendo que os rechupes são caracterizados pelas depressões que ocorrem na superfície, e os vazios são as bolhas internas. Esses defeitos, que normalmente são visíveis em peças transparentes, são ocasionados devido à contração do polímero.

Quando a matéria-prima sofre contração do polímero ou a máquina injetora apresenta a válvula de não retorno com problema, ou o processamento está com a dosagem insuficiente, a pressão de recalque baixa, velocidade e tempo de injeção baixa, e o tempo de recalque muito curto, o projeto do molde apresenta restrições no ponto de injeção ou nos canais de alimentação, e pontos de injeção muito restritos. Esses fatores podem desencadear os vazios e rechupes. A figura 4.5. apresenta exemplos de defeitos do tipo vazios e rechupes.

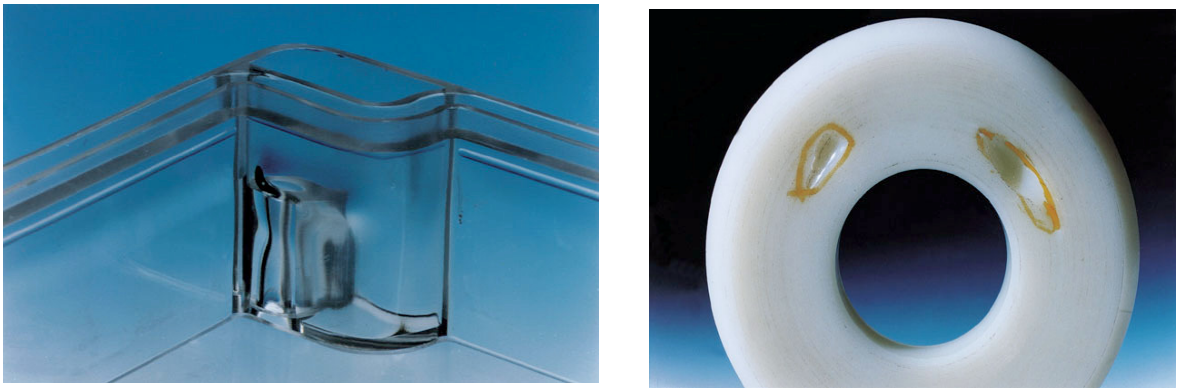


Figura 4.5. – Defeitos dos tipos vazios e rechupes

4.2.6 Linhas de Solda

As linhas de solda são formadas quando duas ou mais frentes de fluxo se encontram e se soldam como pode ser observado na figura 4.6.

Os fatores que influenciam esse defeito e estão relacionados à matéria-prima são os de viscosidade elevada do material, presença de cargas e aditivos instáveis que geram gases.

Os fatores relacionados com a máquina injetora são os de geometria do parafuso inadequada e obstruções no bico da injetora.

Com o processamento estão relacionados a temperatura do molde alta, temperatura do material baixa, velocidade de injeção baixa, pressão de injeção baixa, pressão de recalque baixa. Em relação a temperatura pode-se dizer que a velocidade da difusão macromolecular influencia a qualidade da linha de emenda. (DEBONDUE, et. al , 2004).

Com o projeto do molde estão relacionados as restrições no ponto de injeção ou canais de alimentação, saídas de gases ineficientes, posição e/ou número de ponto de injeção inadequados.

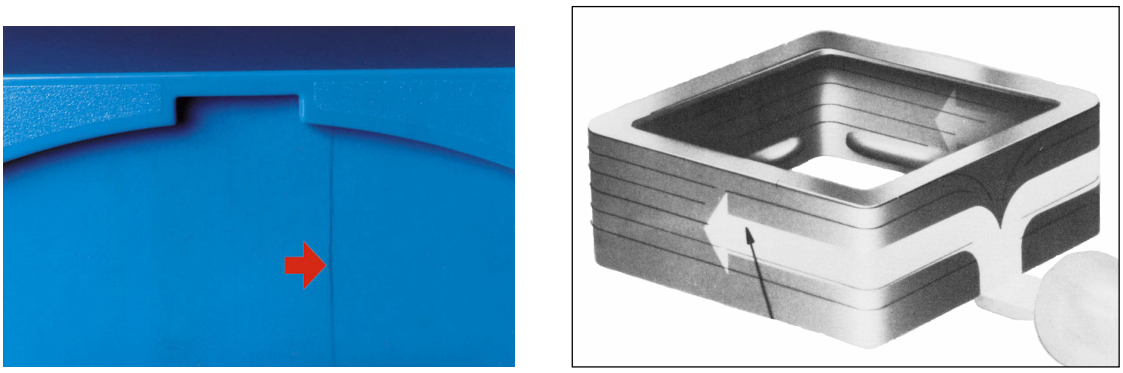


Figura 4.6. - Defeito tipo linha de solda

4.2.7. Rebarbas

Se originam próximas às linhas de fechamento, canais de saída de gás e extratores, quando o material fundido é forçado para fora das cavidades pela linha de abertura do molde. As rebarbas surgem com o desenvolvimento de um filme de material adjacente às peças. A figura 4.7, apresenta exemplos desse defeito. As principais causas estão relacionadas com a força de fechamento insuficiente, alta temperatura do polímero, pressão de recalque elevada e velocidade de injeção muito alta (MARTINS, 2006).

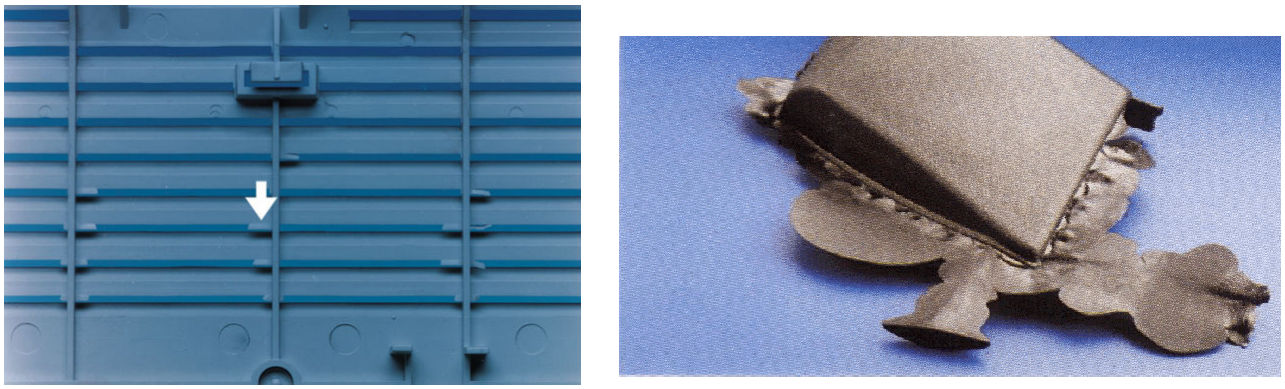


Figura 4.7. – Defeito do tipo rebarba (Geplastics, 2007)

4.2.8. Esguichamento

Quando o material entra na cavidade de forma turbulenta com um aspecto semelhante a uma “cobra”, ocorre o defeito de injeção denominado de esguichamento. As principais causas

relacionadas são a velocidade de injeção muito alta o ponto de injeção restrito ou localizado em uma região espessa e a temperatura do material baixa. A figura 4.8 apresenta um exemplo deste defeito.

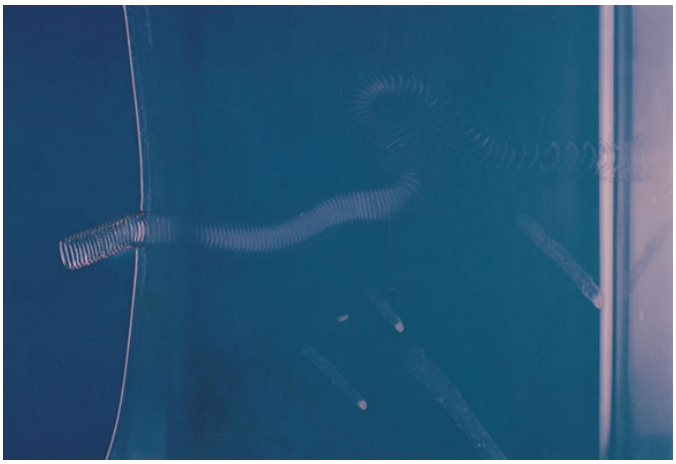


Figura 4.8. – Defeito do tipo esguichamento

4.2.9. Estrias prateadas

Quando gases são aprisionados abaixo de uma fina camada superficial da peça injetada, ocorrem as estrias prateadas. Esse defeito está relacionado a quatro fatores: matéria-prima, máquina injetora, processamento e projeto do molde.

A matéria-prima não deve conter material com umidade, presença de voláteis, presença de contaminantes no polímero, e aditivos termicamente instáveis.

A máquina injetora não deve conter rosca inadequada que acarrete cisalhamento excessivo no parafuso, obstruções no trajeto do material, ar no interior do canhão, descompressão excessiva.

No processamento a temperatura e velocidade de injeção muito alta, secagem inadequada, contrapressão insuficiente, rotação do parafuso muito alta ocasionam estrias prateadas.

Já no projeto do molde, os fatores que propiciam o surgimento de estrias prateadas são os pontos de injeção restritos, e as saídas de ar em número e/ou dimensões inadequadas. Na figura 4.9, pode-se observar um defeito desse tipo.

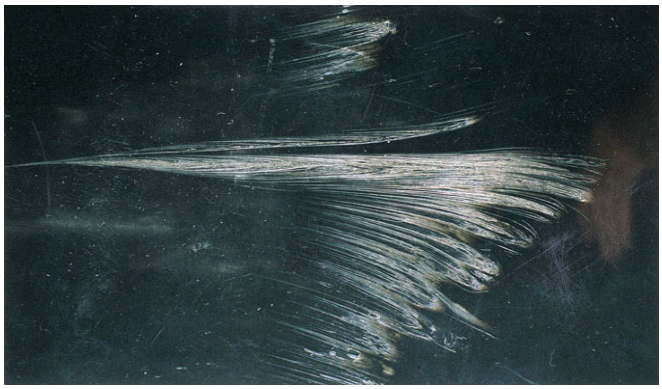


Figura 4.9.- Defeito do tipo estrias prateadas

4.2.10. Manchas de Queimado

Manchas de queimado (marrons ou prateadas) são causadas pela degradação térmica do fundido.

O resultado pode ser a redução no peso molecular do material (manchas prateadas) ou mudanças nas moléculas do material (manchas marrons).

As possíveis causas para a degradação térmica são: temperatura de secagem muito alta ou demasiado tempo de secagem, temperatura do fundido muito alta, alto cisalhamento na unidade de plastificação (contrapressão ou rotação da rosca muito alta), tempo de residência na unidade de plastificação muito alto, cisalhamento muito severo dentro do molde (velocidade de injeção muita alta).

A temperatura da massa deve ser medida com um termômetro de contato durante a purga do material.

A degradação térmica tem impacto negativo nas propriedades mecânicas do material mesmo que nenhum problema de superfície possa ser visto. Um exemplo desse defeito pode ser observado na figura 4.10.

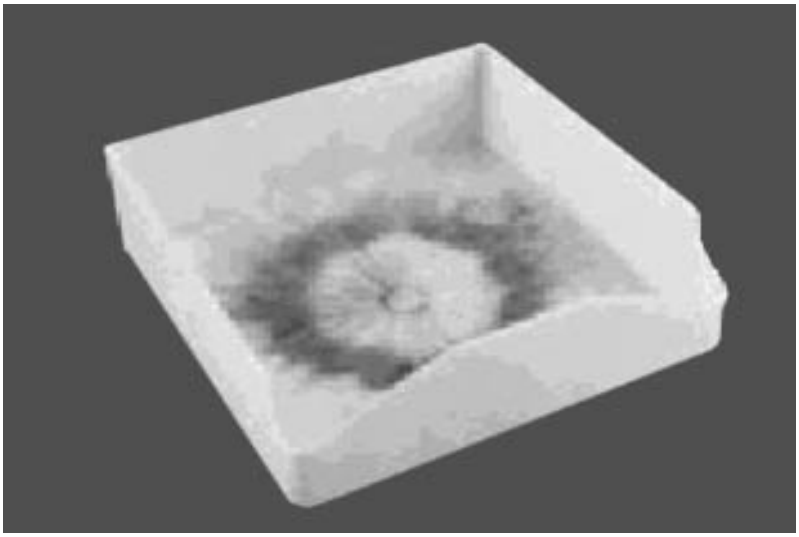


Figura 4.10. Defeito Tipo Manchas de Queimado (Geplastics, 2007)

4.2.11. Manchas de Umidade

As manchas de umidade, geralmente prateadas, aparecem na superfície da peça como traços na direção do fluxo do material. A superfície próxima destas manchas é geralmente rugosa e porosa. A figura 4.11, apresenta um exemplo desse defeito.

Manchas de umidade formadas pela presença de umidade na parede do molde, não aparecem na forma de riscos na direção do fluxo, mas sim como manchas extensas e enuveadas.

Os sintomas de manchas devido à umidade são: o material usado tende a absorver umidade ou é sensível à umidade (exemplo: Nylon, ABS, acetato de celulose, PET, PBT , Policarbonato, acrílico, SAN, e suas blendas), quando se purga o material com reduzida velocidade de injeção, o fundido contém bolhas ou borbulhas, a frente de fluxo solidificada de peças falhadas mostra estruturas parecidas com crateras, o teor de umidade do material antes da injeção é muito alto. O material não foi seco ou não seguiu-se a recomendação de tempo e

temperatura do fornecedor, o teor de umidade do ambiente é muito alto, especialmente em combinação com molde muito frio e pellets sem estufagem.

Durante a composição, estocagem e transporte, a resina absorve umidade. Esta umidade se transforma em vapor d'água no fundido. Devido à velocidade de injeção da frente de injeção, bolhas de gás são empurradas para a superfície do molde ocorrendo compressibilidade do gás, estas bolhas se queimam e congelam na parede do molde, formando as manchas visíveis.

As possíveis causas para manchas de umidade são: controle de temperatura do molde ineficiente, condensação de água nas paredes do molde, secagem ineficiente do material antes de ser injetado, estocagem indevida do material.

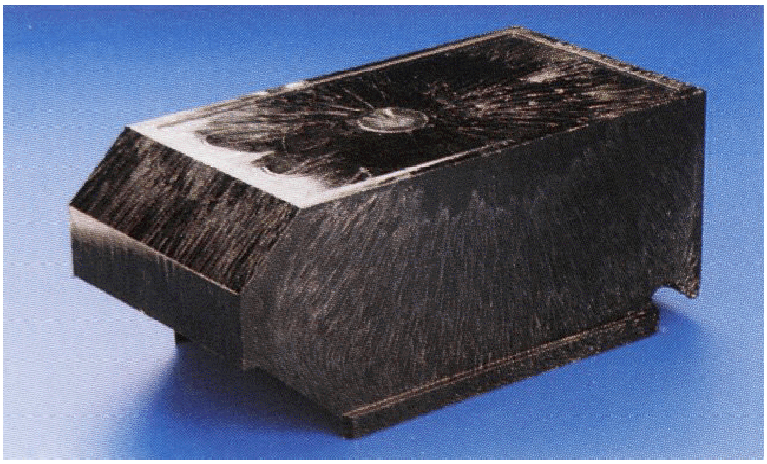


Figura 4.11- Defeito Tipo Manchas de Umidade (Geplastics, 2007)

4.2.12. Manchas de Cor

Manchas de cor são criadas pela distribuição desigual dos componentes ou pela diferente orientação dos pigmentos durante o fluxo. Degradação térmica ou fortes deformações também podem causar alterações na cor ou diferença de coloração.

Na maioria dos casos, manchas de ar aparecem como manchas brancas ou prateadas e podem aparecer próximas à nervuras, castelos de fixação, furos e transições de espessuras. As manchas também podem aparecer próximas às entradas de injeção, depressões ou rasgos.

Os sintomas de manchas de ar são: quando o defeito perde extensão quando se reduz a descompressão, o defeito perde extensão quando se reduz a velocidade de injeção, bolhas podem ser observadas na peça moldada, a frente de fluxo solidificada de peças falhadas mostra estruturas parecidas com crateras.

Figura 4.12 – Defeito Tipo Manchas de Ar

4.2.13. Manchas Brilhantes

Manchas brilhantes e superfícies rugosas podem aparecer quando se usa material reforçado com fibra de vidro. O brilho metálico das fibras de vidro causa o efeito de manchas na superfície da peça. Pode-se observar um exemplo desse defeito na figura 4.13.

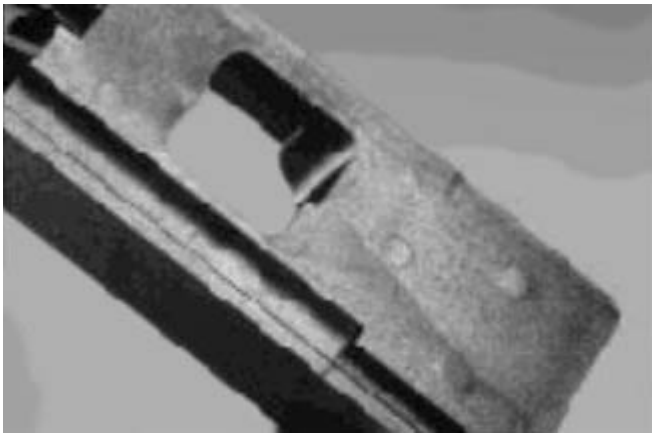


Figura 4.13- Defeito Tipo Manchas de Fibra de Vidro (Geplastics, 2007)

4.2.14. Jateamentos e Marcas de Fluxo

Jateamento e marcas de fluxo formam uma espécie de serpentina formada na superfície da peça moldada. Frequentemente, jateamentos causam diferenças na cor e no brilho. Em alguns casos, o jateamento assemelha-se ao defeito conhecido como casca de laranja (figura 4.14).

Jateamento é causado por uma frente de fluxo não desenvolvida na cavidade. A serpentina se forma quando o material entra e devido à diferença de pressão, torna-se incontrolável. A superfície do molde, localização da entrada e desenho da rosca são fatores que podem causar instabilidade na fluência durante o preenchimento do molde (GRILLET, A. M. et al, 2002).

Ao tocar na superfície do molde, o material congela-se e não é possível fundir homogeneamente este material quando a cavidade é preenchida.

Isto acontece frequentemente quando a peça possui aumentos descontínuos de sua seção transversal em combinação com altas velocidade de injeção, ou quando o ponto de injeção está colocado em uma posição direta à linha de enchimento da peça.

O jateamento também é facilitado pela posição do molde na máquina. Para evitar este defeito, recomenda-se que as cavidades não devem ser preenchidas de cima para baixo

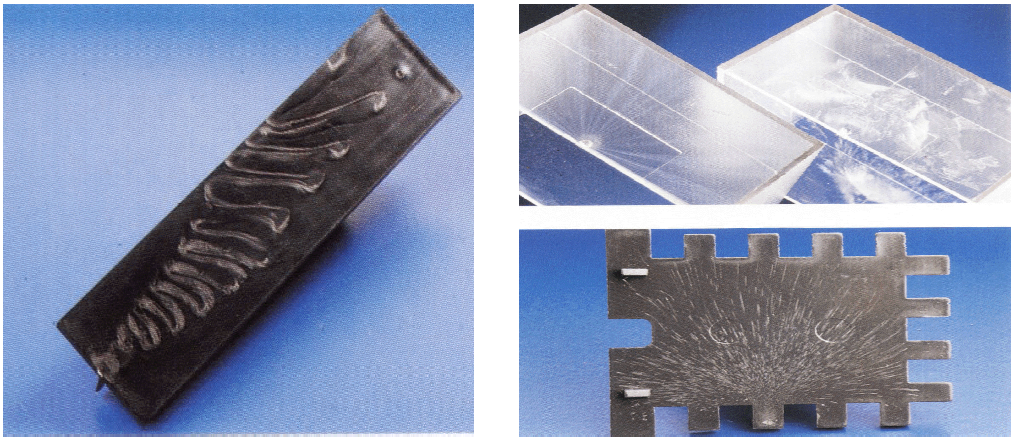


Figura 4.14- Defeito Tipo Marcas de Fluxo (Geplastics, 2007)

4.2.15. Efeito Casca de Laranja

Em geral os defeitos de superfície são tipicamente causados por instabilidade térmica e instabilidade de preenchimentos do material (WEIR, 2004).

O efeito trilha "long play" - LP (casca de laranja) quando há o aparecimento de finas ondas na superfície da peça moldada. Anéis concêntricos aparecem próximos à entradas de injeção e crescem paralelamente até o fim do enchimento da peça.

As causas físicas seriam: temperatura de massa muito baixa, velocidade de injeção muito baixa, temperatura do molde muito baixa.

Quando se injeta uma material em uma cavidade, uma camada solidificada periférica é formada atrás da frente de fluxo devido às altas taxas de resfriamento.

O resfriamento desta camada periférica, também causa o resfriamento das áreas da frente de fluxo próximas à parede do molde.

Se a taxa de resfriamento é muito alta, especialmente nos casos em que a velocidade de injeção é muito baixa, estas frentes de fluxo com viscosidade muito alta ou até mesmo congeladas, podem impedir o fluxo frontal direto do fundido contra a parede do molde.

Isto posto, tem-se a interrupção do padrão correto de preenchimento da cavidade e isto irá causar um alongamento da frente de fluxo no centro.

Com uma certa pressão, a frente de fluxo irá tocar novamente a parede do molde.

As áreas periféricas congeladas da frente de fluxo não têm contato com as paredes do molde e tem-se a formação do defeito Um exemplo desse defeito pode ser observado na figura 4.15.

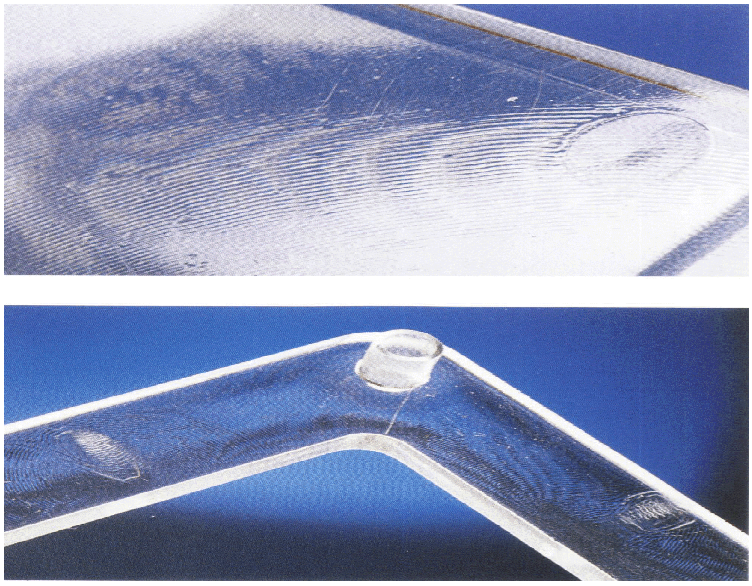


Figura 4.15- Defeito Tipo Casca de Laranja

4.2.16. Peças Incompletas ou Falhadas

Peças incompletas ou falhadas são peças nas quais não se obteve o completo preenchimento da cavidade. Este tipo de defeito geralmente aparece longe do ponto de injeção se há um longo comprimento de fluxo, próximo a partes finas e devido à falta de ventilação adequada no molde.

Há várias causas para o aparecimento de peças incompletas: baixo volume do injetado (baixa dosagem), fluxo de material impedido devido à falta de saídas de gás, falta de pressão de injeção, congelamento prematuro da seção transversal do canal (baixa velocidade de injeção ou controle de temperatura inadequado no molde). A figura 4.16, mostra dois exemplos de peças não preenchidas completamente (MARTINS, 2006).

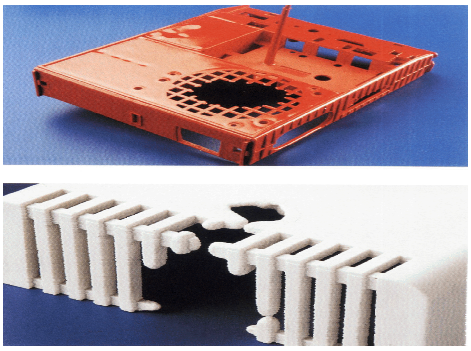


Figura 4.16. -Defeito Tipo Peça Incompleta (Geplastics, 2007)

4.2.17. Manchas Próximas ao Ponto de Injeção

Anéis concêntricos próximos ao ponto de injeção, geralmente tão pequenos que apenas uma mancha é perceptível. As manchas próximas às entradas de injeção são geralmente causadas por pontos de injeção restritos ou altas velocidades de injeção.

Devido à presença de pontos de injeção muito restritos ou altas velocidades de injeção, há a formação de fortes orientações na cadeia polimérica durante a injeção.

Não há tempo de relaxação suficiente na áreas próximas ao ponto de injeção e as camadas exteriores ou periféricas se congelam ainda fortemente orientadas.

As camadas exteriores podem sofrer um mínimo estiramento e quebram sob o impacto das altas tensões de cisalhamento.

O material quente dentro da parede flui e forma pequenos entalhes (trincas).

A mancha é formada pela reflexão dos raios nesta área.

A figura 4.17, mostra um exemplo desse defeito.

Figura 4.17- Defeito Manchas Próximas ao Ponto de Injeção (Geplastics, 2007)

Capítulo 5

Materiais e Métodos

Introdução

O desenvolvimento de sistemas para operações no processo de moldagem por injeção sugere ótimas condições de parâmetros de regulagem baseada em inteligência artificial (IA) que representa um ótimo grau de relacionamento nas condições de processo (KAMEOKA, et al, 2003).

A Inteligência Artificial em máquinas injetoras totalmente elétricas desempenha importante contribuição na produção de peças plásticas de boa qualidade, devido à atuação dos sensores que monitoram variações nas deformações mecânicas da rosca que esta submetida a freqüentes solicitações de tração e compressão durante o processo, os quais enviam sinais elétricos para os servomotores alterarem as rotações a fim de compensar as perturbações. Na figura 5.1 está representado um exemplo de inteligência artificial para compensar desgastes mecânicos do anel de bloqueio.

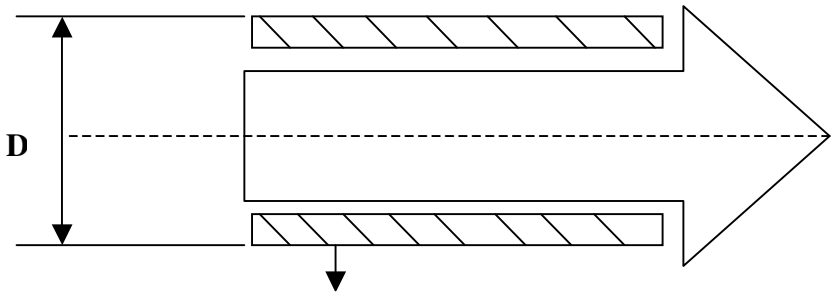


Figura 5.1.- Desgaste do anel de bloqueio monitorado por I.A

5.1. Mold Flow

O processo de moldagem por injeção, exige grande conhecimento e experiência . Uma estratégia para a otimização deste processo combina rede neural e algoritmo em um software. Através de simulações numéricas não binárias, obtem-se modelos otimizados estratégicos e efetivos, focando parâmetros de operação e processo como temperatura de molde, temperatura de injeção, tempo e pressão de injeção, localização de pontos de entrada, geometria de peças, entre outros, melhorando a capabilidade do sistema (SHI, et al, 2003).

Um exemplo de software comercial utilizado para realizar simulações sobre o processo de injeção é o "moldflow". A seguir serão discutidas algumas possibilidades de análises realizadas através do "moldflow".

5.1.1. Análise do Resfriamento da Peça em Função do Sistema de Refrigeração Utilizado.

Essa análise leva em consideração a distribuição e dimensões dos canais e o fluido refrigerante utilizado. A equaçôes 5.1 e 5.2, mostram respectivamente a vazão de água circulada pelos canais do molde e o tempo de resfriamento da peça dentro do molde. A partir desta análise, pode-se otimizar o sistema de refrigeração e com isso obter benefícios como: a redução no tempo de ciclo, pois o tempo de resfriamento da peça responde por aproximadamente 70% do tempo de ciclo total de injeção. A estabilidade dimensional da peça, depende do resfriamento uniforme da peça e da determinação de condições de processo otimizadas para o sistema de refrigeração. As equações 5.3 e 5.4, mostram respectivamente a pressão necessária na bomba para alcançar a vazão ao longo dos canais de refrigeração e o número de Reynolds.

$$m\,2 = \frac{m \times a}{k\left(T\,3 - T\,4\right)} \qquad \text{(equação 5.1.)}$$

$$t = \frac{s^2}{\pi^2 a_{eff}} \ln\left(\frac{4}{\pi}\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w}\right)$$ (equação 5.2.)

$$P = \frac{1000 \times Hmt \times m2}{75 \times h \times 3600}$$ (equação 5.3)

$$N_R = \rho D[v]/\eta$$ (equação 5.4.)

Onde:

P - Potência da bomba (CV)

Hmt - Altura manométrica total (mca)

h - Rendimento da bomba (%) – valor definido pelo fabricante.

s-espessura de parede (mm)

aeff- difusividade térmica (mm²/s)

Tm- temperatura de injeção (°C)

Tw- temperatura do molde (°C)

Te- temperatura de desmoldagem máxima (°C)

NR – Número de Reynolds

ρ - densidade do fluido,

η - coeficiente de viscosidade

[v] - módulo da velocidade média de escoamento para frente

D - diâmetro do tubo.

m2 – massa de água circulada (kg/h)

T3 – temperatura de saída da água (ºC)

T4 – temperatura de entrada da água (ºC)

m – massa de material plástico injetado por hora no molde (kg/h)

a – conteúdo total de calor do material plastificado (kcal/kg)

k – f(canais de resfriamento perfurados na placa da cavidade ou nos núcleos machos)

O software fornece uma simulação do resfriamento das superfícies de uma peça que esta sendo resfriada no interior do molde em função da pressão de injeção e do tempo de injeção. Quanto menor a pressão de injeção e ou menor o tempo de injeção, as superfícies da peça injetada em contato com o molde refrigerado, podem se solidificar antes mesmo do total preenchimento do molde, podendo causar defeitos de diversas magnitudes.

5.1.2. Análise da Simulação do Preenchimento e Recalque da Peça, Incluindo a Análise de Balanceamento de Canais.

Uma análise profunda da injeção de peças plásticas, pode proporcionar um projeto de molde que assegura uma boa qualidade das peças e definindo as condições de processo ideais. Através de uma análise de preenchimento, é possível otimizar a posição do ponto de injeção e as condições de processo. Possíveis defeitos da peça, como linhas de solda, aprisionamentos de ar, degradação de matéria prima, mal-preenchimento podem ser avaliados. De forma bastante simples, é possível criar um sistema de alimentação para moldes de uma ou várias cavidades e balancear estes canais de forma automática. Através da análise de recalque, é possível verificar o tempo e perfil ideal para compactação da peça, a contração volumétrica que a peça apresentará, acompanhar como será a solidificação da peça e avaliar se toda ela recebeu o recalque necessário. Pode-se analisar moldes com câmara quente, injeção seqüenciada, múltiplas cavidades. Na análise da simulação do preenchimento e recalque da peça, alguns resultados disponíveis são: tempo de injeção, pressão de injeção, temperatura da frente de avanço, taxa de cisalhamento,

tensão de cisalhamento, força de fechamento, porcentagem de camada congelada , contração volumétrica, linhas de solda e aprisionamentos de ar.

Conforme foi mencionado, esta análise proporciona a simulação da contração volumétrica dentro do molde durante o resfriamento. Por isso, a medida final do molde obtém-se de acordo com a seguinte fórmula:

$$D = P + S$$

(equação 5.5.)

Onde:

D = Dimensão final do molde em mm.
P = Dimensão do produto em mm.
S = Valor da contração em porcentagem (%).

Verifique o exemplo abaixo:

Material: Polipropileno
Contração: 0,4%
Para se obter uma constante e tornar os cálculos mais ágeis podemos usar:

$$X = (0,4/100) + 1$$

(equação 5.6.)

Constante = 1,004
Tolerância = +/- 0,1

Para determinarmos as medidas para o molde, devemos inicialmente considerar as tolerâncias do produto, observando sempre que no macho as tolerâncias vão para mais e na matriz as tolerâncias vão para menos.

Prosseguindo esta análise, a força de fechamento que o software fornece é baseada em equações a seguir:

$$p_f = k_f . k_s . f_w \qquad \text{(equação 5.7.)}$$

$$Fs = A_{proj} . p_A \qquad \text{(equação 5.8.)}$$

Onde:

fw- caminho de fluência (mm)
pf- pressão de enchimento (bar)
kf- fator de fluência (bar/mm)
ks- fator de espessura
Fs- força de fechamento (kgf)
Aproj- área projetada (cm²)
pA- pressão de reação no molde (bar)

5.1.3. Análise das Características Dimensionais tais como Deflexão e Contração da Peça após a Injeção, além de Identificar as Causas do Empenamento da Peça.

Através de uma análise simples, pode-se quantificar a contração da peça e verificar assim se existirá empenamento da peça. Além disso, verifica-se quais as causas destas deformações, analisando o efeito da refrigeração, da contração diferenciada da peças e da orientação das fibras. Esta análise permitirá o projeto de moldes, com as contrações adequadas do produto nas diferentes direções, ao invés da utilização de índices de contração globais. Isto evitará a necessidade de diversos tryouts e ajustes nas medidas dos moldes e com isso reduzirá o tempo de

desenvolvimento e os custos envolvidos na confecção de peças plásticas injetadas. O empenamento é um tipo de defeito que usualmente aparece em produtos com espessuras menores que 1 mm (TANG, et. al , 2006).

5.1.4. Análise dos Efeitos do fluxo de Plástico na Orientação das Fibras

Os efeitos do fluxo têm um impacto significante nas propriedades mecânicas e estruturais das peças plásticas injetadas. Visualiza a variação no alinhamento das fibras ao longo da espessura da peça. Esta análise aponta previamente os efeitos da orientação das fibras, baseado nos módulos de elasticidade da composição do material. Peças com espessuras menores que 2 mm , quantidades não suficientes de material para preencher e compactar a peça ocasiona maior orientação molecular no processo de injeção que podem contribuir para o surgimento de empenamento, conforme estudo de HUANG, TAI, 2001.

5.1.5. Análise Estrutural dos Níveis de Tensionamentos e Deflexões

Em diversas aplicações, as peças plásticas precisam atender várias solicitações estruturais. Análises estruturais para determinar quais são os níveis de tensionamentos e deflexões devem ser aplicadas como parte do desenvolvimento de um novo produto.

É de fundamental importância o conhecimento das deflexões, tensionamentos, propriedades modais e fluência de um produto, quando submetido a algum tipo de carregamento. Este tipo de verificação é muito importante na definição do design da peça. Com resultados como o nível de deflexão, podem-se criar nervuras, reduzir as espessuras da parede e testar novos compósitos poliméricos, de modo que a peça atenda aos requisitos do projeto. Já com o resultado de tensão de máxima, é possível verificar se a solicitação está abaixo do limite de escoamento do resina escolhida em função de uma carga aplicada, podendo-se obter os seguinte resultados: tensão de Von Misses, deflexão total, fluência, tensão Total, modo de vibração e freqüência natural.

5.1.6. Análise da Injeção com Gás

No processo de injeção com gás, controlar as variáveis que envolvem o processo como por exemplo o tempo ideal para injetar o gás ou verificar qual a porcentagem de polímero contida no canal, requer grande habilidade e conhecimento dos usuários envolvidos. Pode-se projetar

produtos e moldes determinando qual a posição e diâmetro ideal para os canais de gás. Além da posição e o diâmetro, o tempo para abertura e fechamento da válvula de gás é de fundamental importância no processo com utilização do gás. Este tempo é muito importante para determinar a penetração do gás sem que ocorra vazamentos durante o processo de injeção. Além deste efeito, considera-se o uso de overflows, que são reservatórios para a matéria prima excedente empurrada pelo gás. Deve-se obter um perfil de injeção do gás, controle da penetração do gás, percentual da espessura da parede de polímero no canal, tempo de injeção do gás, vazamento de gás no canal, volume do "overflow".

5.1.7. Análise das Contrações em Função da Geometria

Ao projetar moldes, as contrações do material devem ser consideradas no projeto. A abordagem mais comum é a utilização de um valor de contração linear do material, aplicada sobre o modelo matemático do produto em todas as direções. Em função das variações dimensionais do produto, esta metodologia pode trazer grandes variações dimensionais da peça final injetada. É possível quantificar e determinar quais são as contrações do produto em função da geometria e condições de injeção. Com este resultado, pode-se conceber o molde com o offset ideal para obter a dimensão desejada do produto, levando em conta todas as contrações volumétricas da matéria prima em relação a geometria da peça e as condições de moldagem. Uma forte anisotropia provavelmente causada por cristalizações e efeitos de solidificação do material durante a fluência também ocasiona contrações (POMERLEAU, SANSCHAGRIN, 2006).

5.1.8. Análise da Fusão dos Resultados

Inicialmente, para as simulações de injeção, era necessária a criação de modelos em planos médios que representassem a geometria do produto. Esta tecnologia, revolucionou as técnicas de simulações existentes até então, permitindo que fossem feitas análises diretamente nos modelos sólidos criados nos pacotes CAD. Reduziu-se drasticamente o tempo de pré-processamento, possibilitando realizar análises de preenchimento, recalque, refrigeração, empenamento e orientação de fibras em modelos convertidos diretamente do CAD, sem a necessidade da criação de uma casca ou plano médio.

5.1.9. Análise em Peças de Parede Grossa

Uma pequena parte das peças plásticas tem paredes espessas, bem diferente da maioria das aplicações. Com a evolução do hardware e o desenvolvimento de software, as técnicas de simulação puderam ser aprimoradas criando programas capazes de analisar o preenchimento de peças plásticas em malhas tridimensionais. A malha 3D ou tetraédrica é aplicada em simulações de injeção e refrigeração em peças de paredes grossas. Esta técnica única, mostra em detalhes como o fluxo do polímero se dá dentro da cavidade, nas mais diversas direções, além de verificar o balanço térmico do molde. Observar este efeito em peças espessas é muito importante para detectar possíveis inconsistências na injeção do produto. Na análise de resfriamento, pode-se verificar a temperatura da peça ao longo do resfriamento, a temperatura, vazão e pressão do fluido refrigerante importantes para determinar um bom projeto de molde e definir os recursos necessários no chão de fábrica. Permite ainda que sejam feitas análises de recalque, onde pode-se avaliar o nível de contração volumétrica e o tempo de congelamento do material. Pode-se obter os seguintes resultados: tempo e padrão de preenchimento, temperatura de frente de fluxo, contração volumétrica, tempo de congelamento do material, vazão do fluido refrigerante, número de Reynolds, temperatura do fluido refrigerante.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Introdução

Baseando-se na literatura e em experiencia profissional de cerca de 20 anos no assunto, foi montada uma tabela com os principais defeitos de injeção, suas prováveis causas e sugestões para eliminar ou minimizar esses defeitos. Foram feitos 3 estudos de casos, utilizando software o "moldflow" pra avaliar o aparecimento de defeitos de injeção.

6.2 Tabelas de defeitos

As tabelas 6.1 a 6.6, apresentam um resumo dos principais defeitos de injeção, assim como as principais causas e sugestões para solução.

Tipo de Defeito: contração da peça, chupagem e / ou bolhas internas	
CAUSA	**SOLUÇÃO**
Contração do material ao esfriar	-Aumento da pressão eficaz na cavidade e sua distribuição uniforme. -Aumento no tempo de recalque. -Aumento da pressão de injeção.Aumento do tamanho das entradas, canais e do bico de injeção. -Aumento de velocidade de injeção. -Novo desenho da peça com paredes mais finas o possível. -Redução da temperatura do molde.
Material muito frio ou quente	-Ajuste da temperatura do cilindro. -Ajuste da temperatura do molde. -Mais frio (chupagem). -Mais quente (bolha interna).
Insuficiente qualidade de material dentro da cavidade no fechamento	-Aumento da pressão na cavidade. -Aumento da dosagem. -Uso de válvulas de controle no bico.
A peça é extraída muito quente do molde	-Ajuste da temperatura do cilindro e/ ou do molde.
Espessuras de parede da peça não uniformes	-Localização da entrada na seção mais espessa. -Novo desenho da peça com uma seção uniforme.

Tabela 6.1. Contração da peça, chupagem e / ou bolhas internas

Tipo de Defeito: linhas de solda - contração oriunda da má união entre fluxos de material	
CAUSA	**SOLUÇÃO**
Pressão muito baixa na zona onde se forma a solda	-Aumento da pressão de injeção. -Aumento do tempo de recalque. -Aumento da velocidade de injeção. -Aumento do tamanho das entradas. -Canais e bico de injeção.
Material demasiado frio	-Aumento da temperatura do cilindro.
Molde demais frio	-Aumento da temperatura do molde.
Gás preso na cavidade	-Novo desenho ou localização de saídas de ar na zona final de enchimento da cavidade. -Localização da entrada em melhor posição. -Redução da pressão de fechamento.

Tabela 6.2. Linhas de solda- contração oriunda da má união entre fluxos

Tipo de Defeito - rebarbas	
CAUSA	**SOLUÇÃO**
Material muito quente	-Redução da temperatura do cilindro reduzir o ciclo total de moldagem.
Pressão de injeção muito alta	-Redução da pressão de injeção -Redução do tempo de recalque
Força de fechamento muito baixa	-Verificação da força de fechamento adequada.
As duas partes do molde não se ajustam bem.	-Retificação das superfícies de união das duas metades do molde para que se ajustem perfeitamente.
Rebarba ou material ou material estranho entre as duas metades do molde	-Limpeza das superfícies de união para que se ajustem perfeitamente.
Quantidade de material injetado excessiva na Cavidade	-Redução da pressão de injeção. -Uso da dosagem controlada. -Uso de válvulas de controle de bico e mínimo tempo de recalque.

Tabela 6.3. Rebarbas

Tipo de Defeito - Deformação e empenamento da peça moldada. Extração da peça moldada, com temperatura acima das temperatura de desmoldagem do material.	
CAUSA	**SOLUÇÃO**
Peça moldada muito quente ao ser extraída	-Redução da temperatura do molde. -Aumento do tempo de resfriamento. -Redução da temperatura do cilindro. -Imerção da peça em água imediatamente após ser extraída. -Resfriamento da peça em gabaritos.
Deformação devida a relaxações de tensão internas	-Redução da pressão de injeção. -Redução do tempo de recalque. -Aumento da temperatura do molde. -Aumento do tempo de resfriamento.
Contração não uniforme devido a seções irregulares	-Novo desenho da peça para obter seções mais uniformes.
Resfriamento não uniforme do molde	-Reestudo do sistema de refrigeração do molde.

Tabela 6.4. Deformação e empenamento da peça moldada

Tipos de Defeito - sinais de queima ou decomposição térmica	
CAUSA	**SOLUÇÃO**
Material muito quente	-Diminuir a temperatura do cilindro
Ar preso na cavidade do molde	-Alteração da posição da entrada. -Localização de saídas de ar corretamente. -Redução da força de fechamento. -Análise do desenho da seção transversal da peça para melhorar o fluxo do polímero na cavidade.
Presença de voláteis no material	-Secagem do material corretamente. -Consulta do fabricante do material.
Velocidade de injeção muito alta	-Redução da velocidade de injeção. -Redução da pressão de injeção.

Tabela 6.5. Sinais de queima ou decomposição térmica

Tipo de Defeito - marcas de fluxo	
CAUSA	**SOLUÇÃO**
Molde muito frio	-Aumento da temperatura do molde.
Material muito frio	-Aumento da temperatura do cilindro. -Aumento do ciclo total de moldagem.
Canais e entradas muito pequenos	-Aumento do tamanho dos canais e entradas.
Poço frio	-Aumento do tamanho do poço frio.
Fluxo do polímero na cavidade muito defeituoso.	-Redução da velocidade de injeção. -Aumento do tamanho das entradas. -Canais de alimentação. -Alterar a posição da entrada.

Tabela 6.6. Marcas de fluxo

6.3 Estudos de Casos

6.3.1 Estudo de caso 1

Para este estudo de caso, foi utilizado um molde e uma máquina injetora. O produto injetado é um porta retrato feito em Poliestireno Alto Impacto. Para a simulação da injeção, foi utilizado o software "Solidworks" que faz a simulação de preenchimento, através do software "moldflow xpress", que fornece o tempo de injeção ideal e que deve ser inserido na tela do comando da máquina, no ato da preparação e regulagem da mesma. Porém, existem outras possibilidades de simulações como por exemplo, a análise do resfriamento em função do sistema de refrigeração utilizado, entre outras.

O experimento foi realizado utilizando o tempo de injeção sugerido pelo software, obtendo-se peças boas.

Foram realizados simulações com o software e experimentos em máquina, com tempos de injeção maiores do que o sugerido, sendo observado tanto nas simulações quanto em máquina o

não preenchimento completo da cavidade do molde, havendo um resfriamento prematuro durante a fluência do plástico fundido dentro do molde, surgindo, neste caso o defeito "peça incompleta".

O aparecimento do defeito foi motivado pela baixa velocidade de preenchimento da cavidade do molde, ocorrendo portanto o resfriamento da peça, antes que o plástico fundido pudesse ter alcançado as extremidades da cavidade do molde para a moldagem completa.

Para a produção das peças, regulamos a máquina com duas situações: a primeira, obedecendo a sugestão fornecida pelo software e a segunda, com um tempo de injeção maior, portanto, simulando e produzindo a peça com defeito.

Existem diversos parâmetros de regulagem e preparação de processo que foram regulados para o experimento, porém os que estão abaixo relacionados são os importantes para a interpretação dos resultados:

Parâmetros do processo	**Tempo indicado pelo software**	**Tempo modificado**
Tempo de injeção	1,8 s	7,7 s
Tempo de recalque	3,0 s	3,0
Pressão de injeção	19,5 %	19,5 %
Pressão de recalque 1 e 2	10,0 %	10,0 %
Contrapressão	5,0 %	5,0 %
Velocidade de injeção 1 a 5	80,0 %	80,0 %
Tempo de resfriamento	40,0 s	40,0 s
Temperatura do bico	80,0 %	80,0 %
Temperatura zona 1	225 ºC	225 ºC
Temperatura zona 2	220 ºC	220ºC
Temperatura zona 3	210 ºC	210ºC

Tabela 6.7. - Parâmetros do processo

A seguir, é apresentada a seqüência de experimentos que foram realizadas, com o parâmetro "tempo de injeção" monitorado e sugerido pelo software.

O Software sugeriu o ponto de entrada do material para um melhor preenchimento da cavidade. A localização do ponto de entrada, é de grande importância para minimizar a excitação da fluência para evitar a formação de defeitos (KIM, et al, 2003). Conforme indicado na figura 6.1 a seguir:

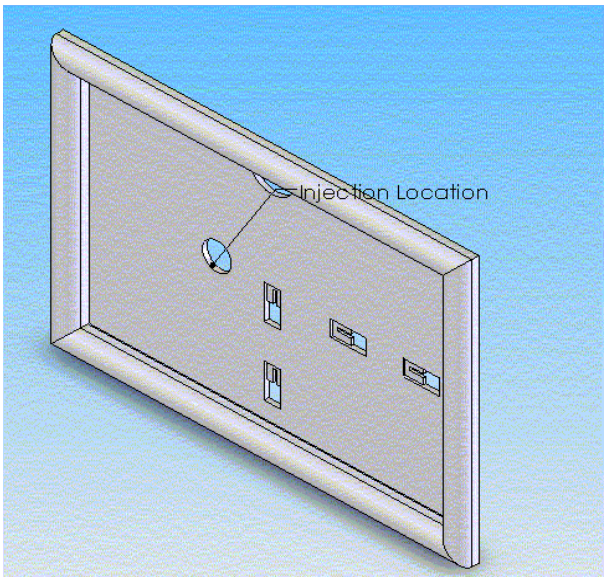


Figura 6.1. Sugestão do Ponto de Entrada do Material

Inicialmente, como pode ser observado na figura 6.2., o tipo do polímero a ser utilizado é informado ao software:

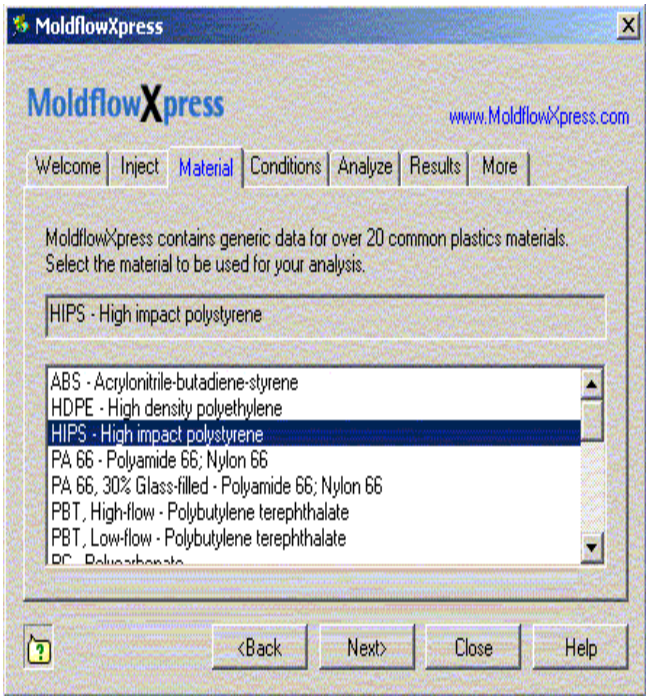


Figura 6.2. Informação ao Software do Polímero Utilizado HIPS

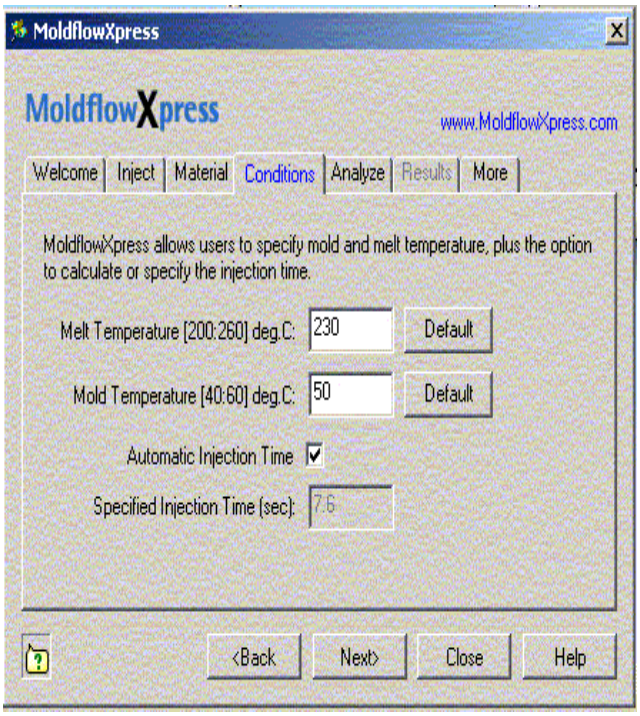


Figura 6.3. Sugestão do Software das Temperaturas do Molde e de Injeção

Figura 6.4. Sugestão do Software do Tempo de Injeção (100% de preenchimento)

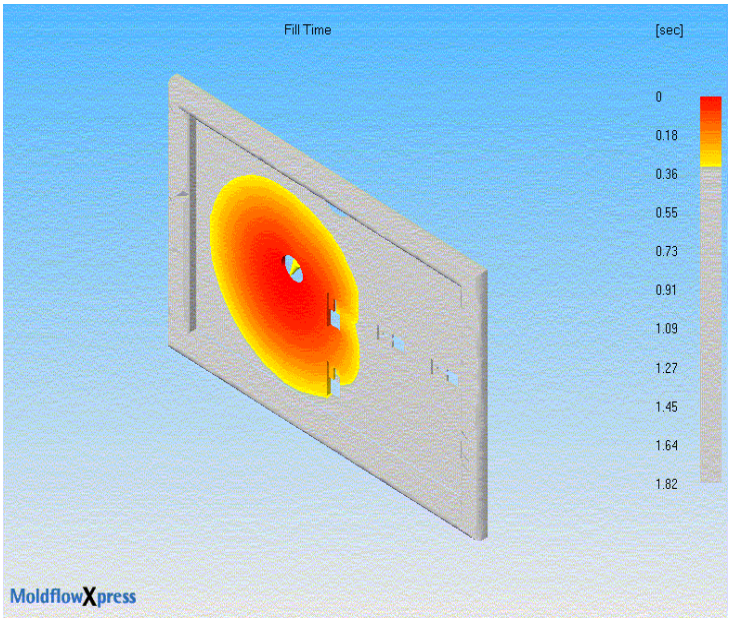


Figura 6.5.Simulação do Início do Preenchimento do Molde

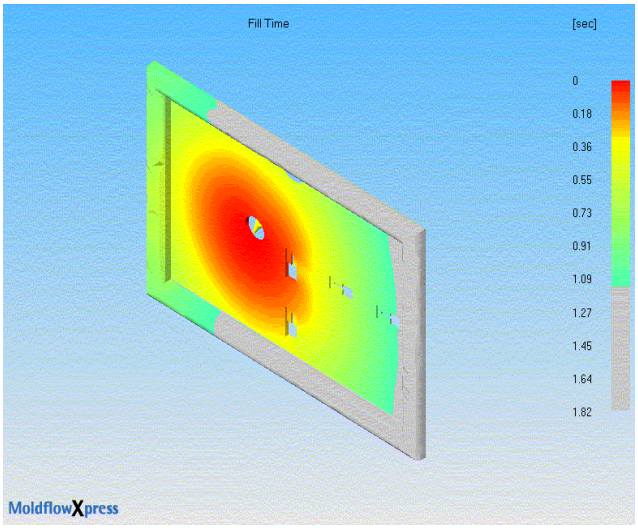


Figura 6.6.Simulação da Continuação do Preenchimento 1,09 s

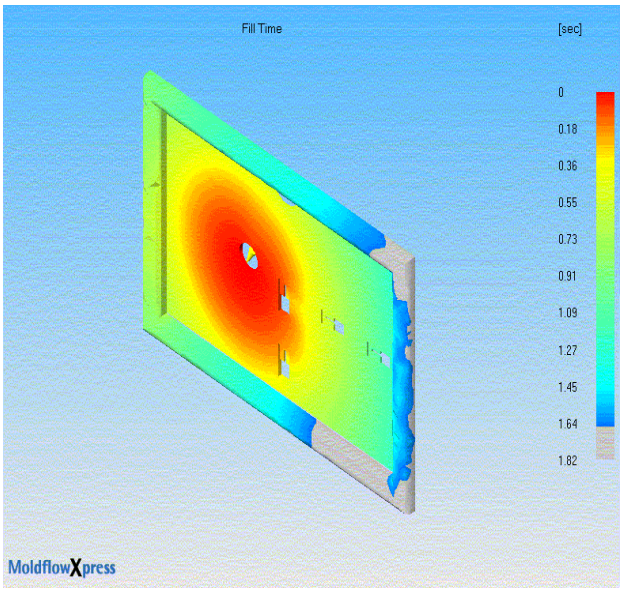


Figura 6.7. Simulação da Continuação do Preenchimento 1,64 s

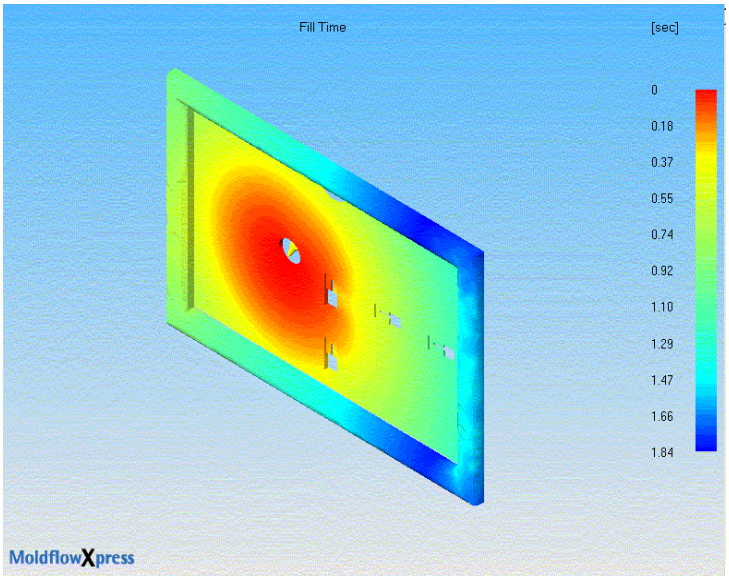


Figura 6.8.Simulação do Final do Preenchimento para 1,84 s

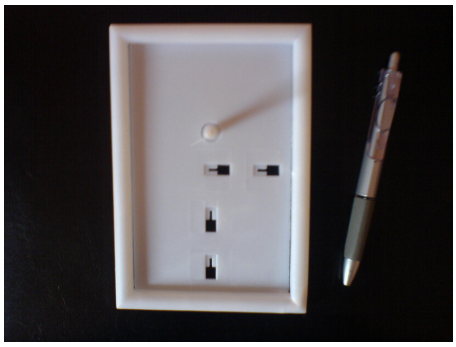


Figura 6.9. Fotografia Mostrando o Preenchimento Completo da Peça

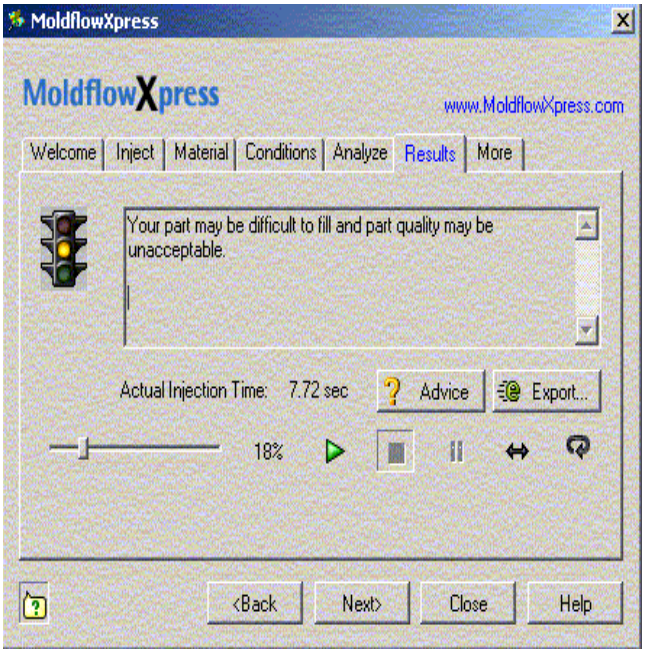


Figura 6.10. Alteração do Tempo de Injeção para 7,72s (18% de preenchimento)

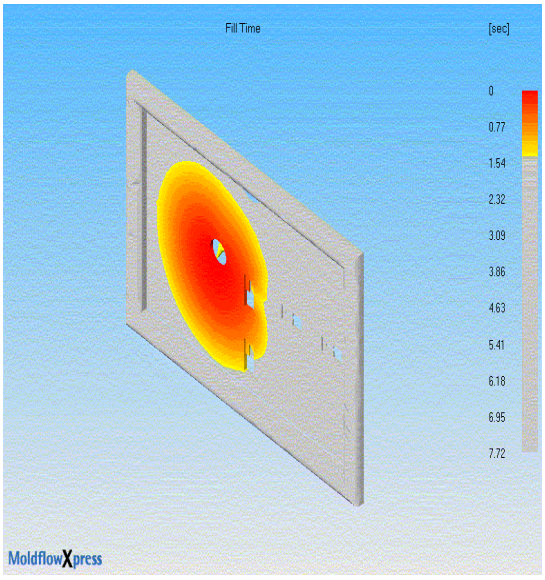


Figura 6.11. Simulação da Continuação do Preenchimento 1,54 s

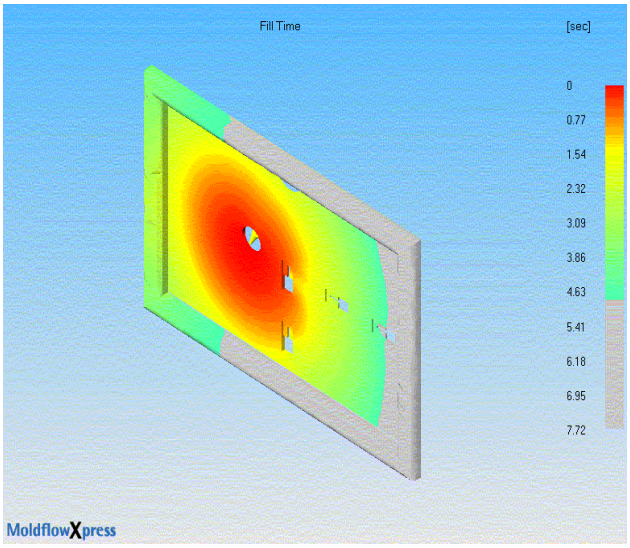


Figura 6.12. Simulação da Continuação do Preenchimento 4,83 s

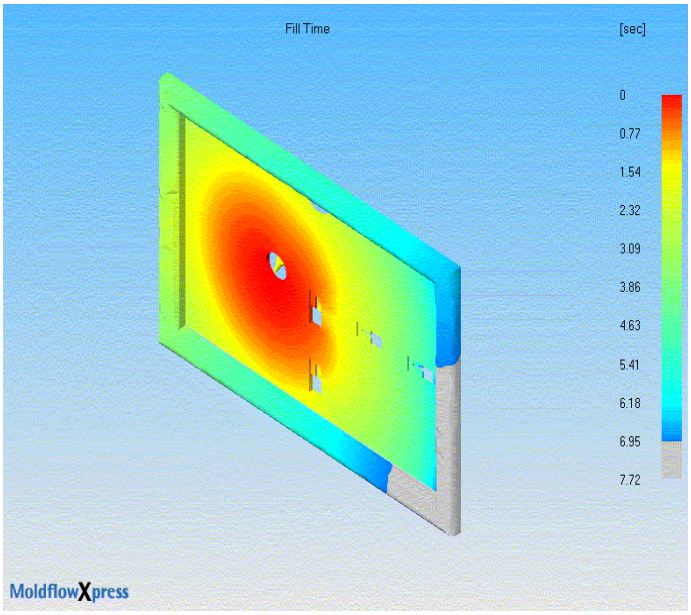


Figura 6.13. Simulação da Continuação do Preenchimento 6,95 s

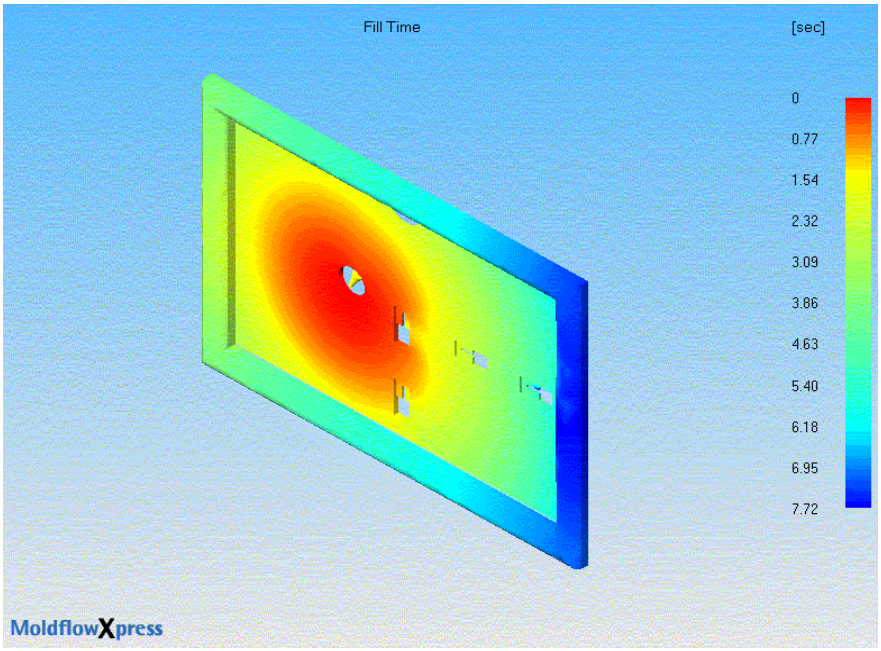


Figura 6.14.Simulação do Final do Preenchimento para 7,72 s

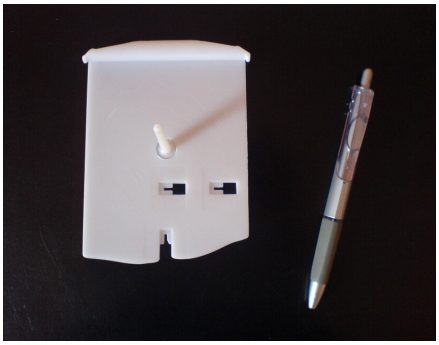


Figura 6.15. Fotografia Mostrando o Preenchimento Incompleto da Peça

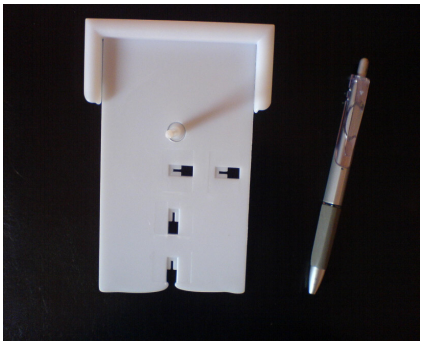


Figura 6.16. Fotografia Mostrando o Preenchimento Incompleto da Peça com Aumento da Pressão de Injeção

Comentários sobre a simulação:

Na figura 6.10., a simulação mostra a cor azulada intensa e uniforme na extremidade da peça, significando que aquela região do molde já está resfriada não sendo possível o plástico fluir até a extremidade e, portanto, completar a moldagem.

Utilizando um tempo de injeção menor, 1,82s nota-se na figura 6.8. que a extremidade da peça ainda não está totalmente resfriada, ver a coloração levemente azulada, significando que o plástico fundido já alcançou a extremidade do molde com facilidade, portanto, ocorrendo o preenchimento total do molde.

6.3.2. Estudo de caso 2

Simulação de injeção de um tapete em PVC em forma de chapa conforme figura 6.17 e figura 6.18.

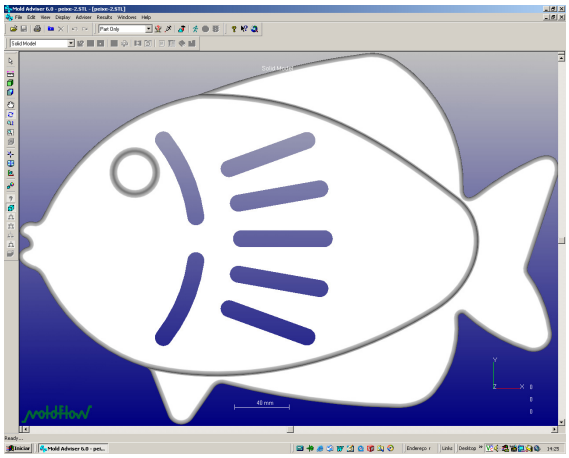


Figura 6.17 - desenho tapete vista 1

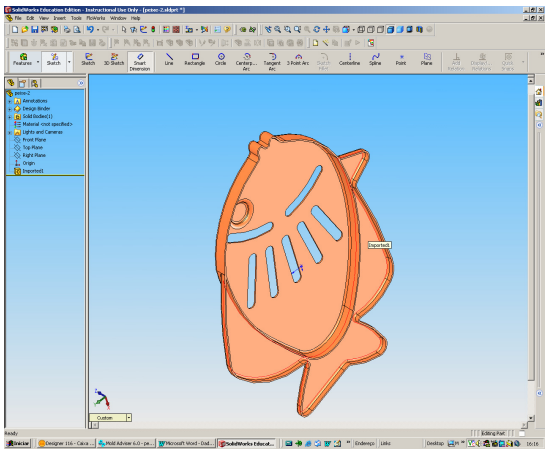


Figura 6.18 – desenho tapete vista 2

Como primeiro passo o software determina o melhor ponto de injeção levando em consideração a geometria da peça, conforme Figura 6.19.

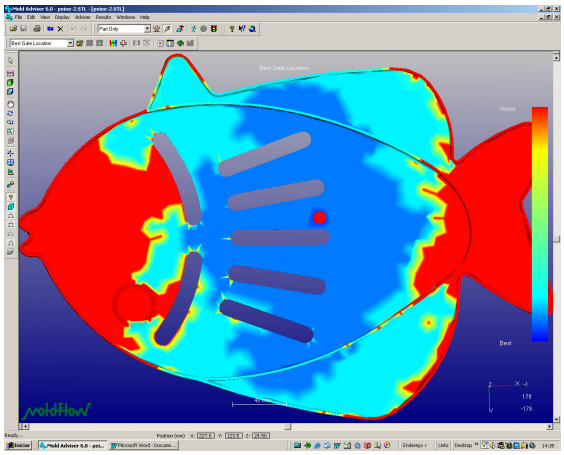


Figura 6.19 – Posicionamento do ponto de injeção

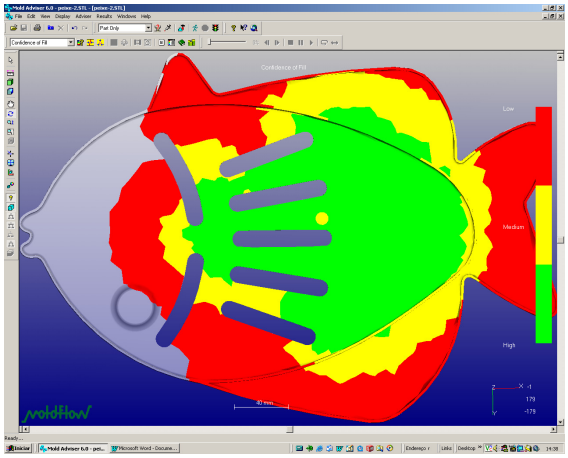


Figura 6.20 – Análise do preenchimento 1

Após o posicionamento do ponto de injeção, faz-se uma análise do preenchimento do polímero fundido na cavidade do molde conforme Figura 6.20. Nota-se a não possíbilidade do total preenchimento da peça.

Como tentativa de solucionar o problema do não preenchimento, uma sugestão seria aumentar o número de pontos de injeção para 2, 3 e 4 , mostrando uma melhoria do preenchimento porém não solucionando o problema, conforme ilustrado nas figuras a seguir:

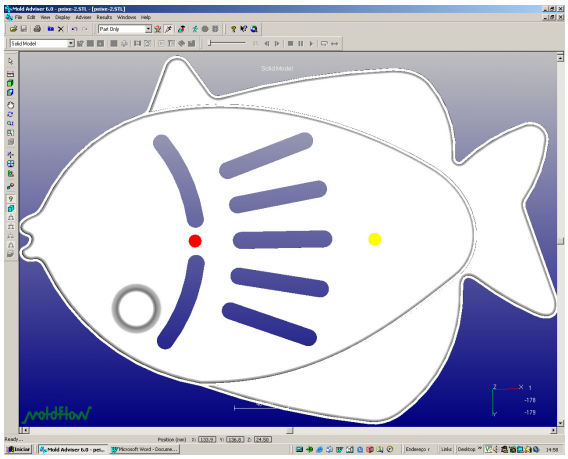


Figura 6.21 – 2 x pontos de injeção

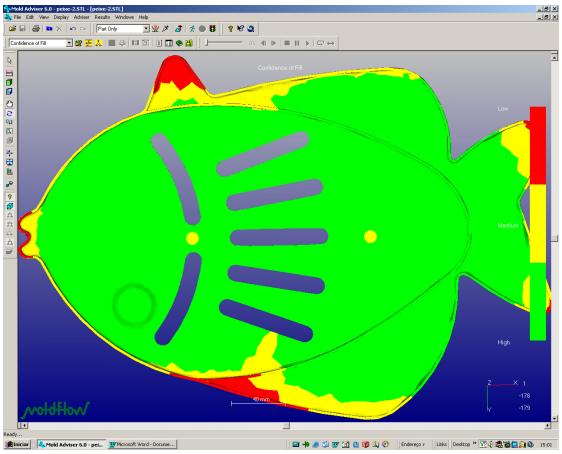


Figura 6.22– Análise de preenchimento 2

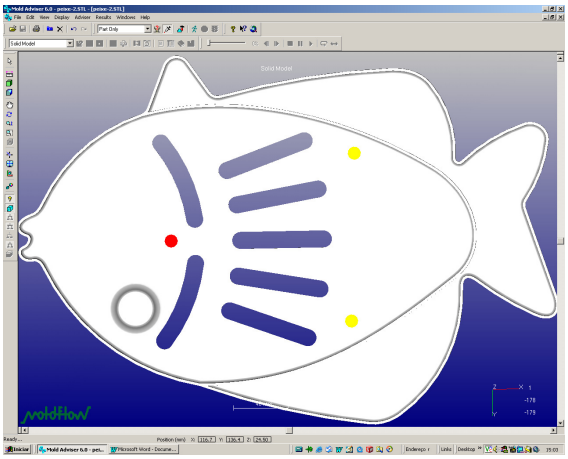


Figura 6.23 – 3 x pontos de injeção

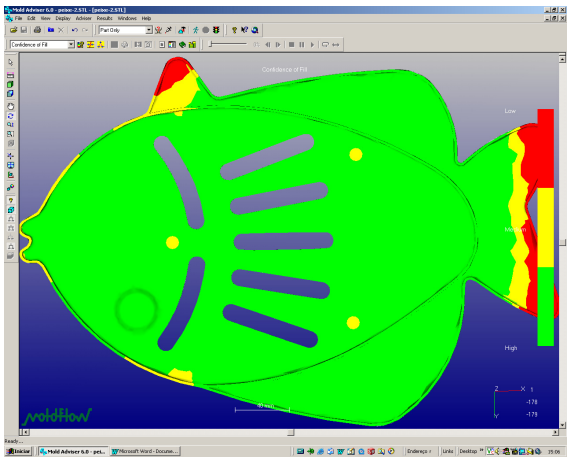


Figura 6.24 – Análise de preenchimento 3

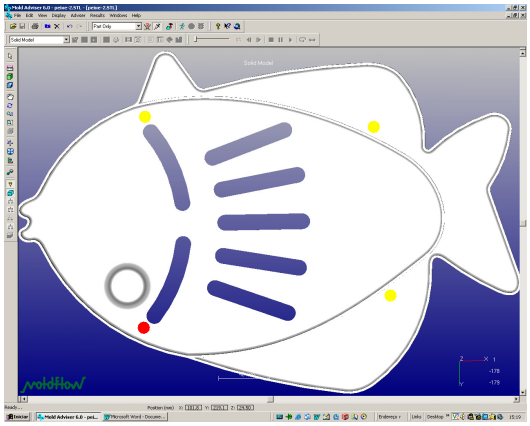


Figura 6.25 – 4 x pontos de injeção

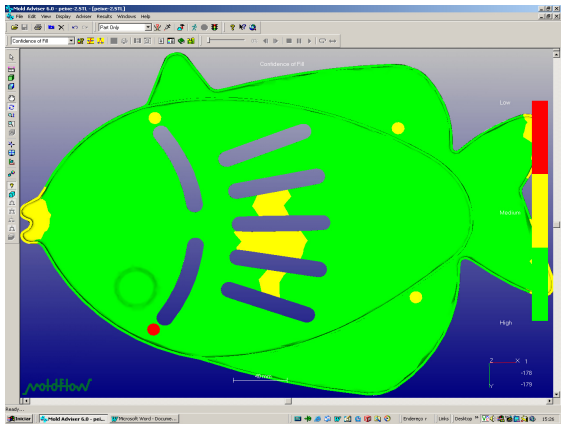


Figura 6.26 – Análise de preenchimento 4

Para evitar a ocorrência de linhas de emenda na superfície da peça, melhor seria não aumentar muito o número de pontos de injeção, por isso, como tentativa de melhorar a fluência do polímero fundido dentro do molde, a sugestão foi modificar o desenho da peça. A primeira modificação foi a colocação de pontes entre as ranhuras longitudinais Figuras 6.27, 6.28, 6.29 e 6.30, a segunda modificação foi eliminar as ranhuras transformando-as em alto relevo Figuras 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35 e 6.36 e a terceira modificação foi modificar a superfície Figuras 6.39 e 6.40, transformando-a em um único plano com bordas de 5 mm ao invés de 20 mm, conforme podemos observar nas figuras a seguir:

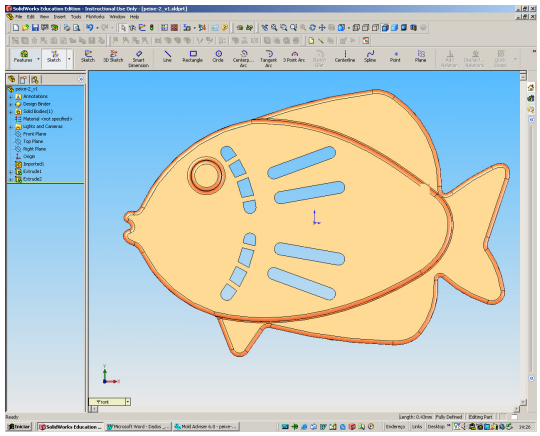


Figura 6.27 – Pontes nas ranhuras – vista 1

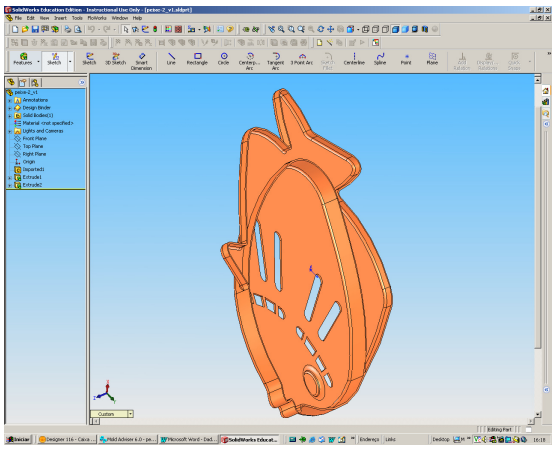


Figura 6.28 – Pontes nas ranhuras – vista 2

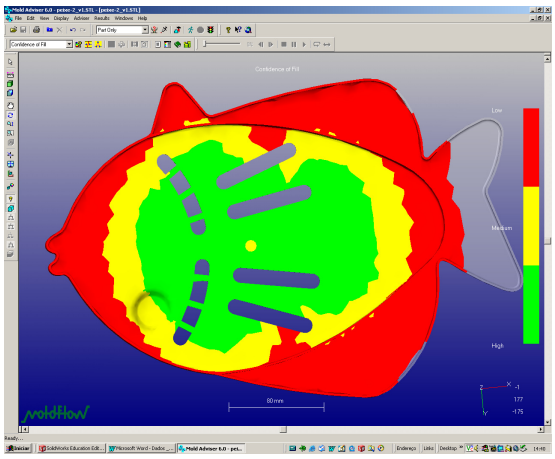


Figura 6.29 - Análise com 1 x ponto

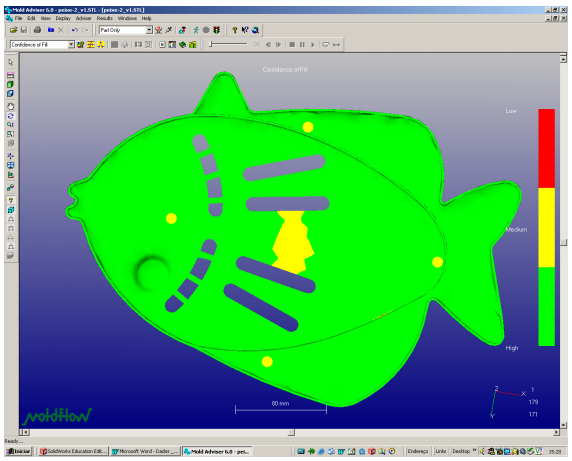


Figura 6.30 – Análise com 4 x pontos

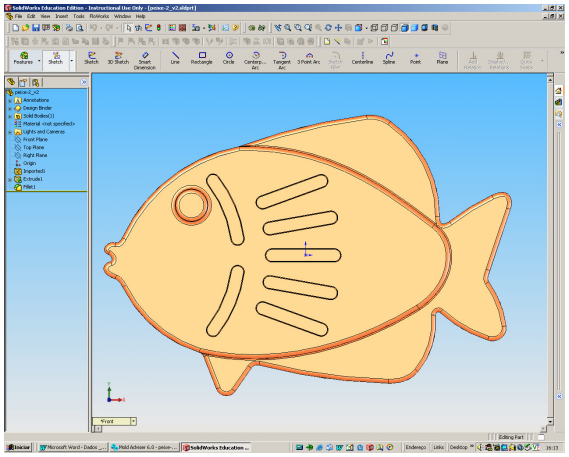


Figura 6.31. Eliminação de ranhuras - vista 1

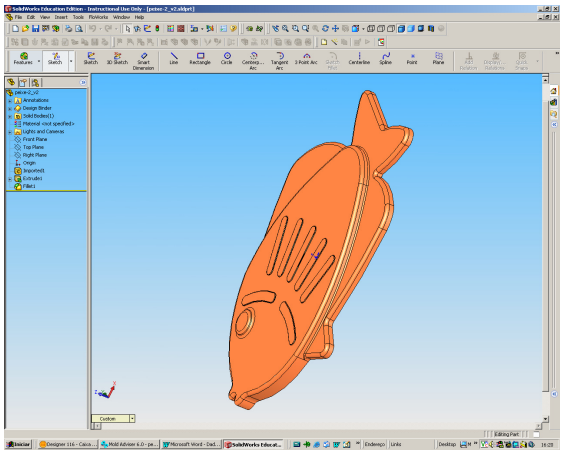


Figura 6.32. Eliminação de ranhuras - vista 2

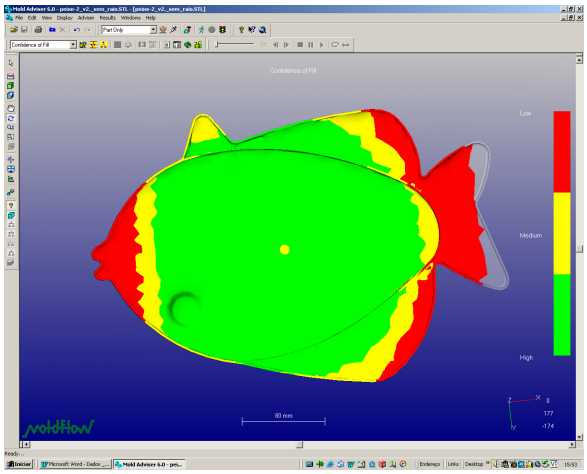


Figura 6.33. Análise com 1 x ponto

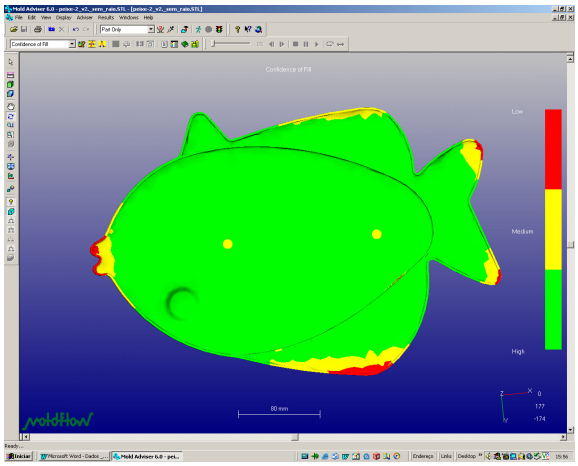


Figura 6.34. Análise com 2 x pontos

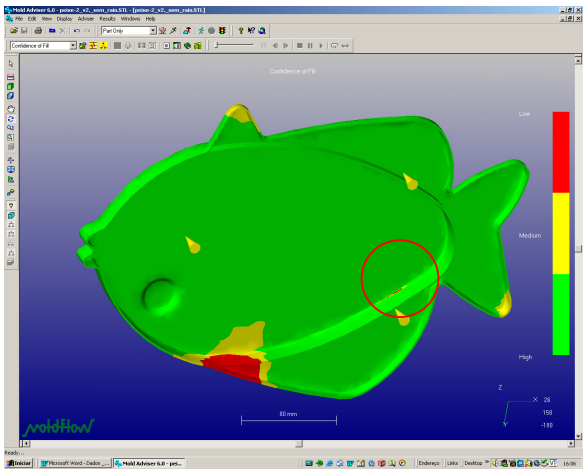


Figura 6.35. Análise com 3 x pontos

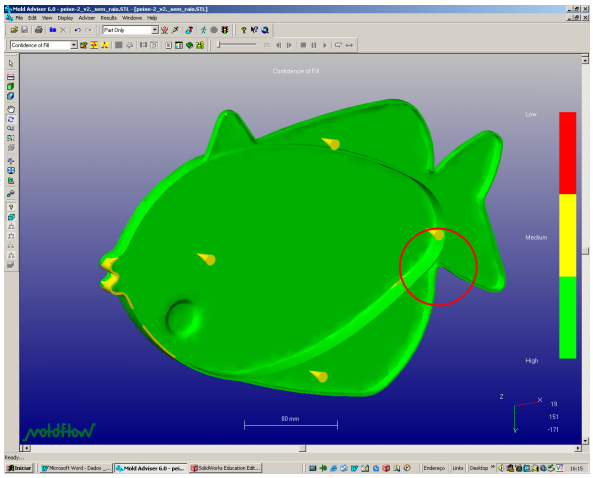


Figura 6.36. Análise com 4 x pontos

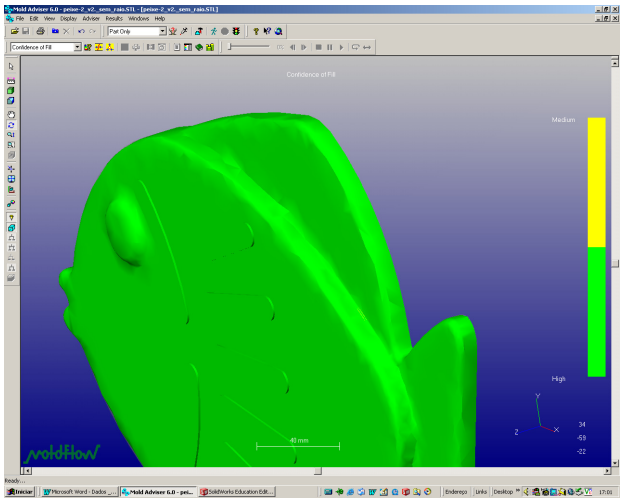


Figura 6.37 Análise em condições maximizadas

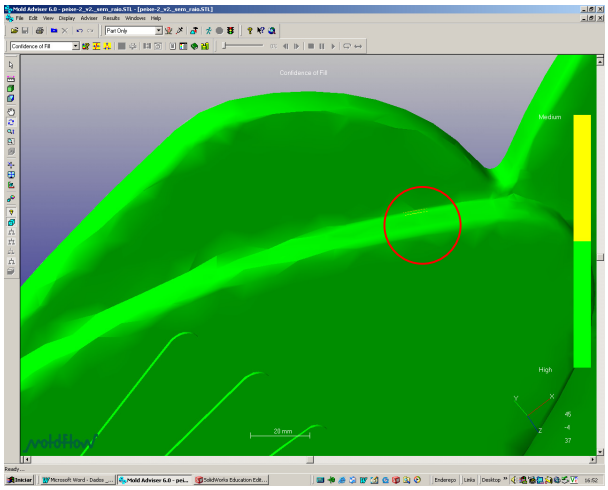


Figura 6.38 Permanência do ponto crítico

Pode-se observar nas Figuras 6.35 e 6.36, o surgimento de um ponto assinalado, de difícil preenchimento. Uma alternativa para forçar o preenchimento, foi o aumento da temperatura do molde de 45 ºC para 60 ºC, aumento da temperatura de injeção de 180 ºC para 200 ºC e da pressão de injeção de 100 mPA para 150 mPA. Nas figuras 21 e 22, foi constatado que mesmo com as condições alteradas de processo, permaneceu o ponto crítico, porém agora com indicação amarela, Figuras 6.37 e 6.38 ao invés da vermelha, Figura 6.36.

Supondo-se que o ponto crítico tivesse desaparecido com as condições maximizadas de processo, não seria viável a produção com estes parâmetros uma vez que o custo de produção seria maior além do surgimento de outros defeitos com rebarbas, pontos de degradação e maiores solicitações dos equipamentos.

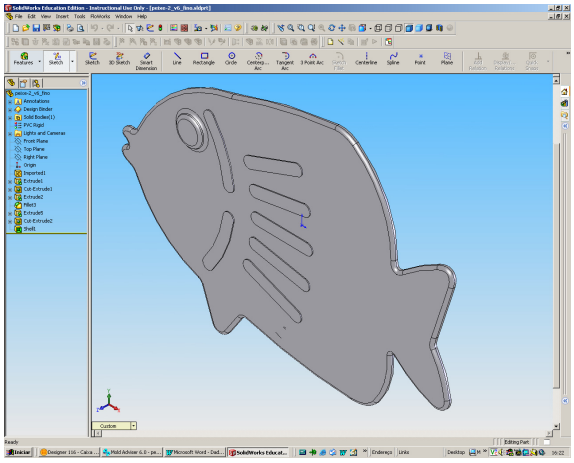


Figura 6.39 Formato plano borda 5 mm – vista1

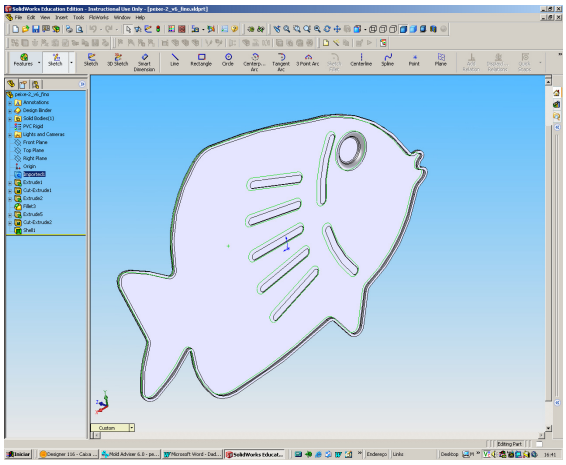


Figura 6.40 Formato plano borda 5 mm –vista2

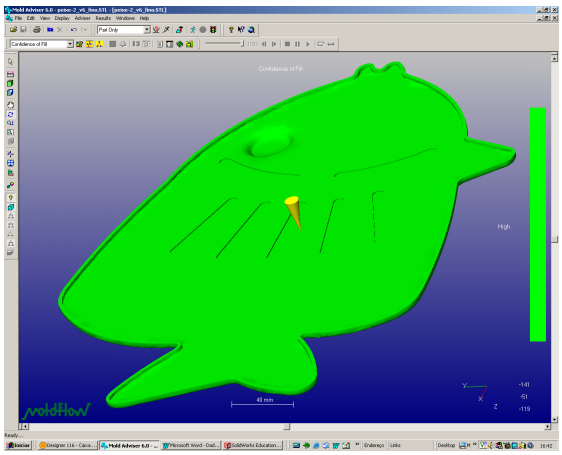


Figura 6.41.Localização do ponto de injeção

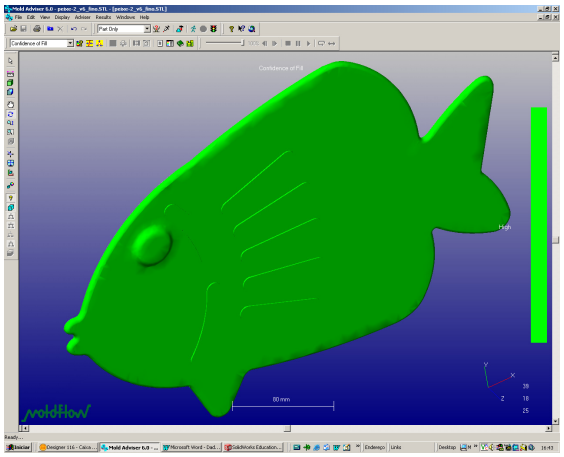


Figura 6.42. Preenchimento total

Percebeu-se que após a terceira modificação, planificação da superfície porém mantendo o alto relevo das ranhuras, e a redução da borda de 20 para 5 mm, conseguiu-se preenchimento perfeito conforme podemos observar a figura 6.42 com o indicador totalmente na cor verde.

A partir da confirmação do total preenchimento da peça no interior do molde, foram feitas outras análises para verificação de demais parâmetros de projetos e processos como pode-se observar a seguir:

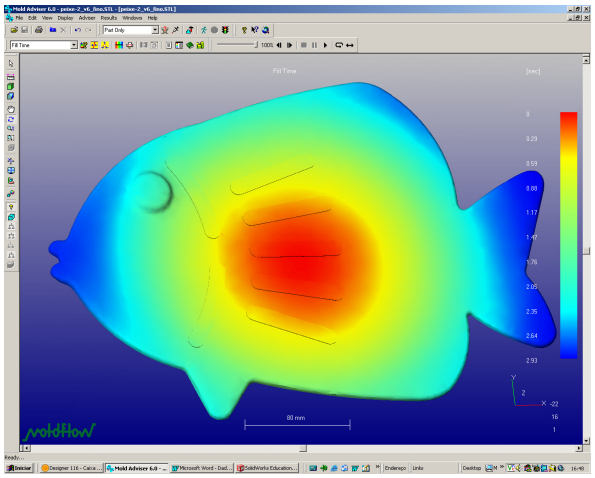


Figura 6.43Tempo de preenchimento 2,98 s

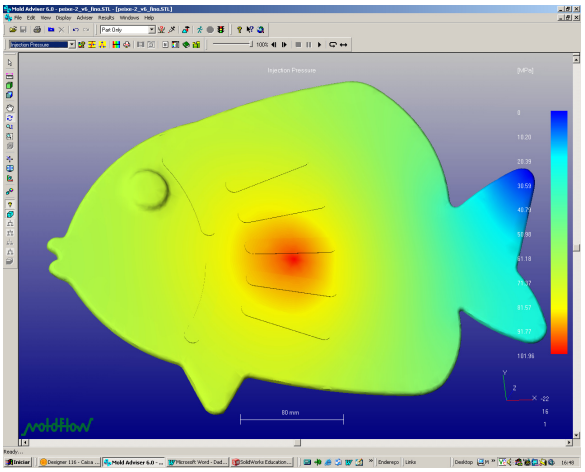


Figura 6.44 – Diferença de Pressãos 0 – 100 mPA

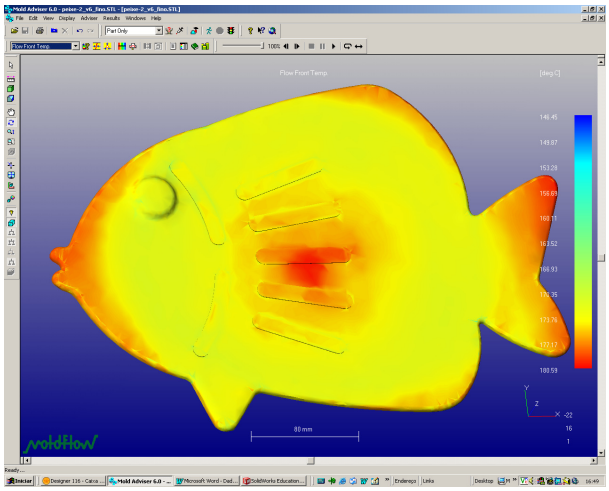


Figura 6.45 Preenchimento acima de 170 ºC

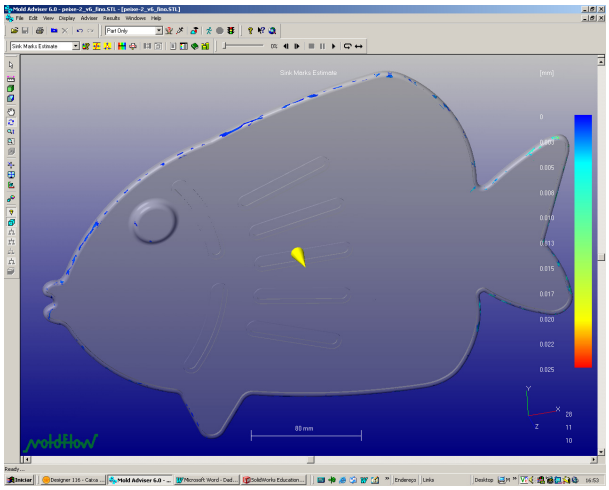
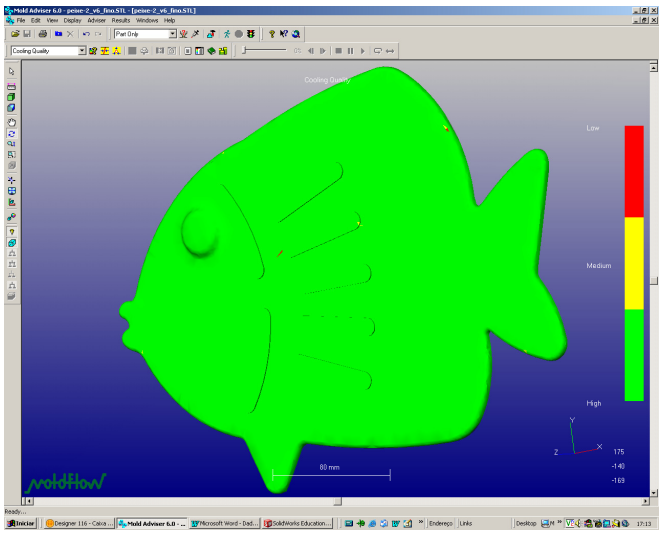


Figura 6.46. Presença de emendas 0,01 mm

A presença de emendas mostradas na figura 6.46, pode ser solucionada através de saída de gases no molde.



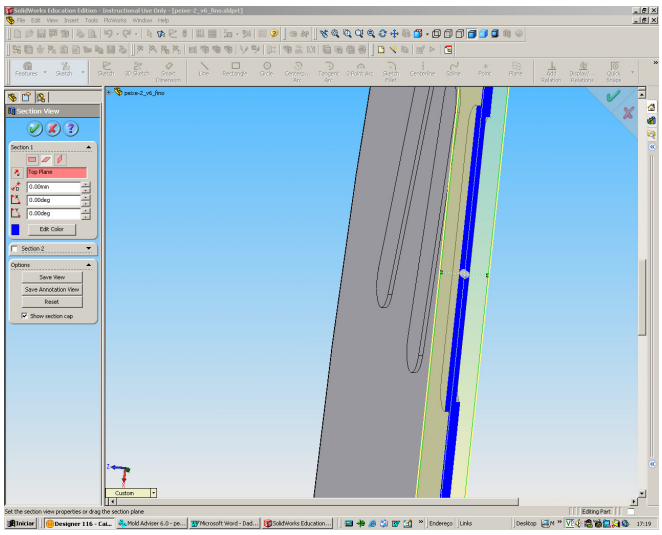


Figura 6.47. Pontos com problemas de resfriamento Figura 6.48. Desvio no caminho de fluência

Na Figura 6.48 foi constatado um desvio do fluxo do material fundido durante o trajeto, causando pontos de parada ocorrendo refrigeração não uniforme do material moldado. A sugestão é modificar o desenho nesta região com arredondamentos.

6.3.3. Estudo de caso 3

Comparação de fluxo através de cantos vivos e arredondados utilizando mesmo material, mesmas dimensões e condições de simulação, conforme figura 6.49.

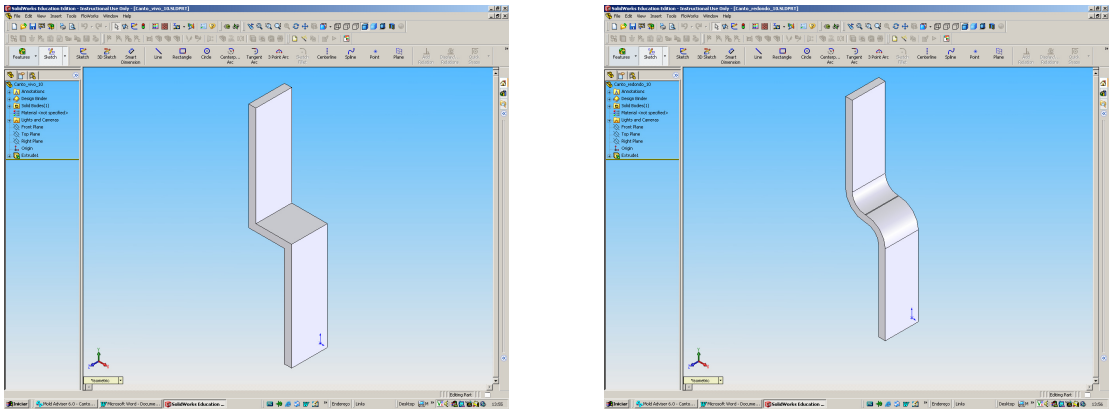


Figura 6.49. Corpos de prova com cantos vivos e arredondados

Com uma espessura de parede de 2,0 mm, e ponto de entrada localizado na extremidade superior do corpo de prova, durante a simulação não ocorreram diferenças significativas ao longo do preenchimento, porém foi observado no canto vivo, uma cor azul clara, evidenciando uma leve tendência de resfriamento nesta região, conforme figura 6.50.

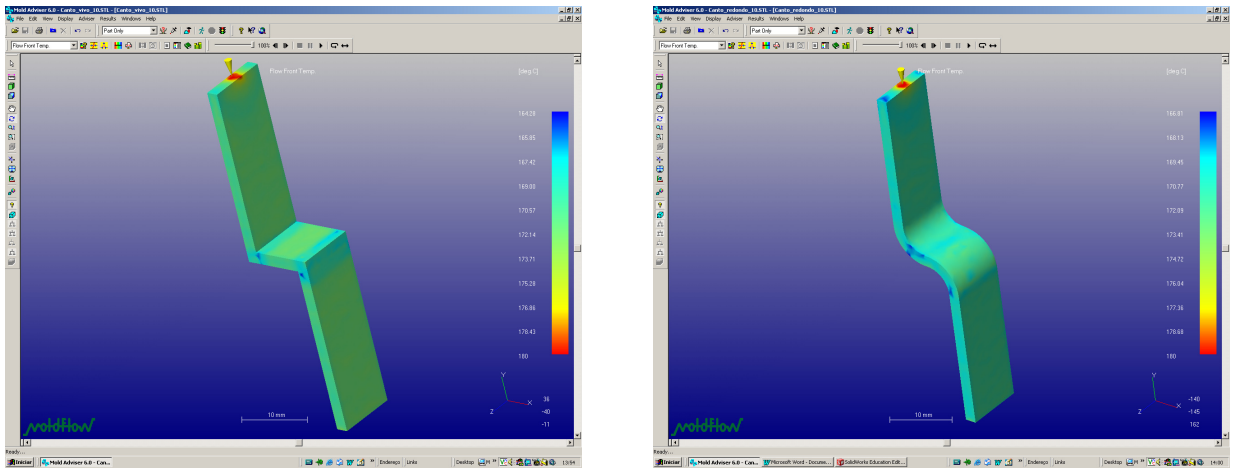


Figura 6.50 – Temperaturas durante o preenchimento, esp 2,0 mm

Foram reduzidas as espessuras de parede de 2,0 mm para 1,0 mm e mantidas as outras condições, ocorrendo, durante a simulação, nos cantos vivos uma forte tendência de solidificação de material nesta região, como pode ser observado na figura 6.51 na cor azul escuro.

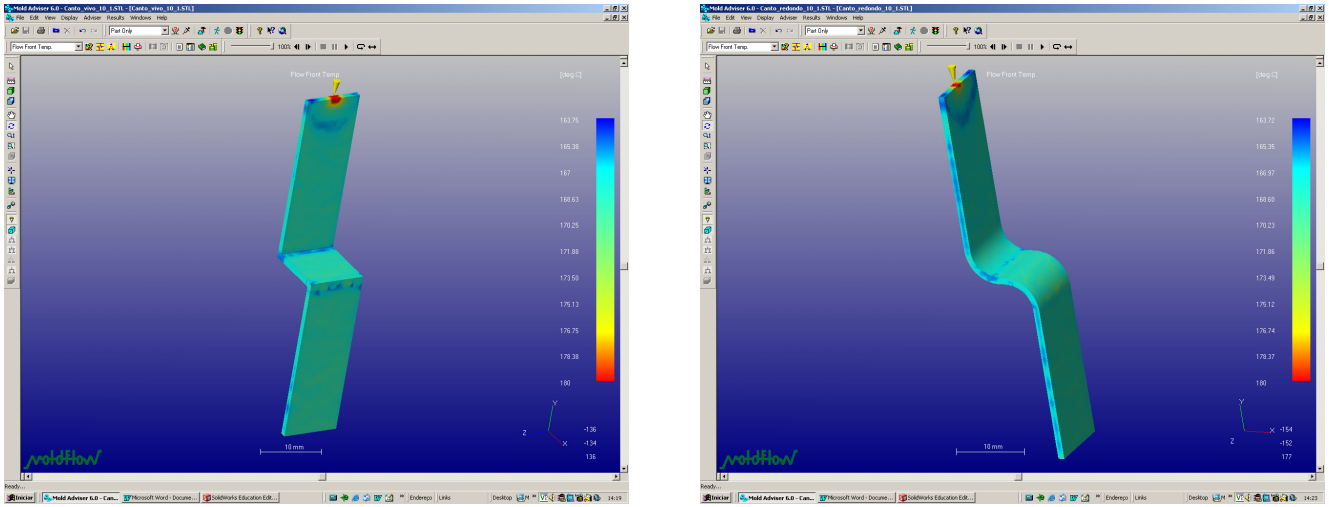


Figura 6.51. Temperaturas durante o preenchimento, esp. 1,0 mm

Com o ponto de entrada localizado na extremidade superior do corpo de prova, foi observado que o tempo de preenchimento é de 1,44 s

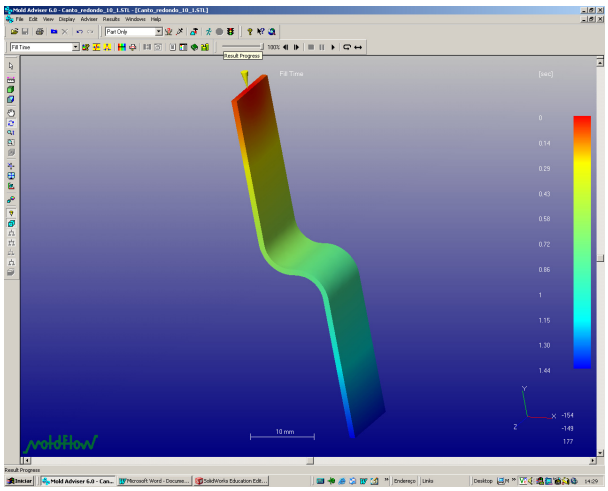


Figura 6.52 - Tempo de preenchimento 1,44 s

A sugestão do software, quanto à melhor localização do ponto de entrada de injeção, está indicada na figura 6.53 na cor azul, ou seja, na região central do corpo de prova.

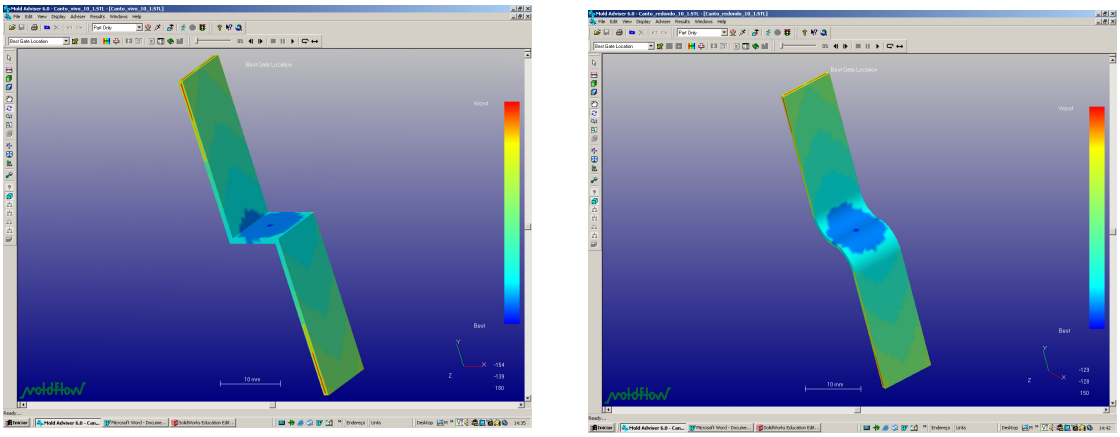


Figura 6.53 - Sugestão ponto de injeção

Com o ponto de entrada localizado na região central do corpo de prova, sugerida pelo software, foi evidenciado no gráfico de temperaturas de preenchimento, a ocorrência de de resfriamento localizado na região dos cantos vivos, conforme pode ser observado na cor azul escura na figura 6.54.

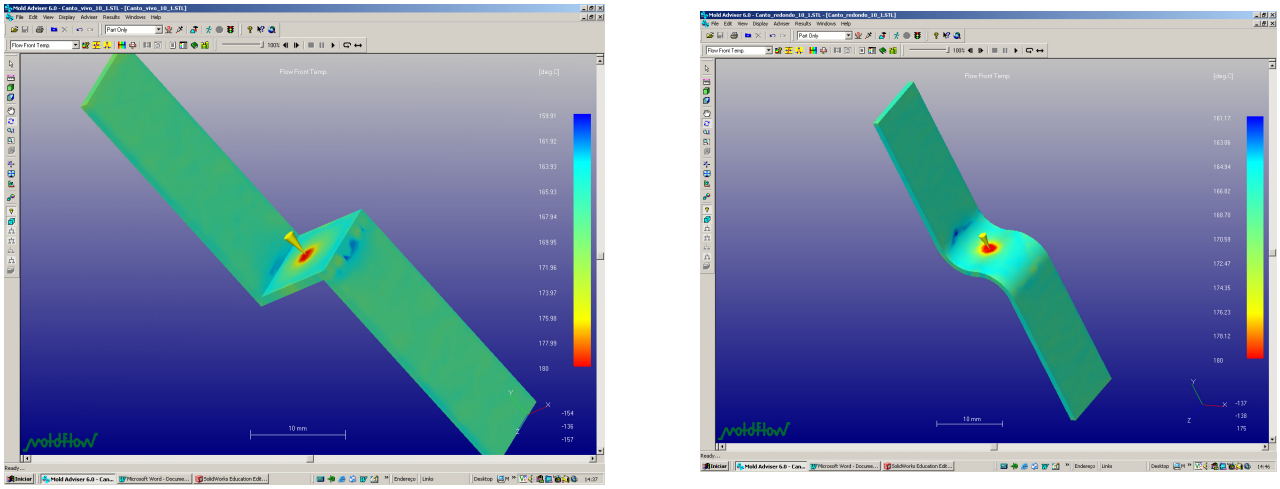


Figura 6.54-Temperaturas durante o preenchimento com ponto de injeção alterado

A alteração do ponto de entrada de injeção sugerida pelo software, não solucionou o problema de solidificação nas regiões dos cantos vivos, porém como pode ser observado na figura 6.55, ocorreu uma redução substancial do tempo de preenchimento de 1,44 s para 0,8 s.

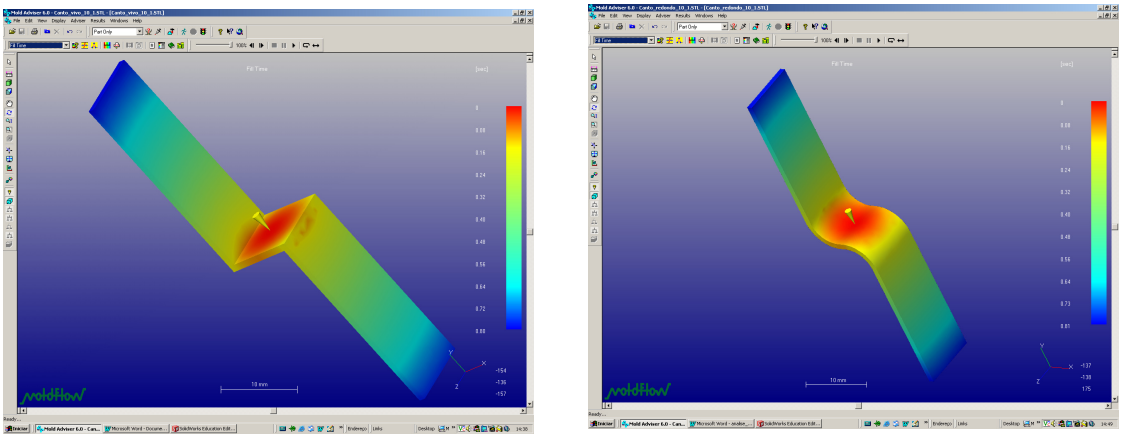


Figura 6.55. Tempo de preenchimento 0,8 s

CAPÍTULO 7

Conclusões

A utilização do software “moldflow” permite o “set-up” do molde de forma sistemática e a definição de parâmetros de processo e regulagem de máquina próximas às condições ideais. Os parâmetros reais de processo durante a produção são monitorados, analisados e comparados com os ideais sugeridos pela utilização do software, sendo que as compensações das perturbações que ocorrem no processamento, são ajustadas com maior precisão considerando-se, as condições de processo para se obter uma peça com qualidade.

Foi elaborado um método sistemático para corrigir os defeitos relacionados à velocidades, pressões, temperaturas e tempos, como por exemplo: mal preenchimento, rebarbas, rechupes, queima e linha de solda entre outros. O usuário dá o "feedback" da qualidade da peça, como critério de qualidade, podendo ser determinados os limites de controle e de especificação do processo e a partir desta situação, gerar análises estatísticas e gráficos para os parâmetros monitorados, avisando o operador de problemas potenciais, corrigindo o processo quando por exemplo a pressão e a velocidade excedem os limites definidos como normais de uma máquina.

Três estudos de casos foram apresentados. O software utilizado foi eficiente para prevenir defeitos e otimizar parâmetros de processos, diminuindo tempos envolvidos, nas fases de elaboração da ficha de processo de produtos, de preparação e regulagem dos equipamentos e durante toda a produção; desta forma há economia de energia elétrica, redução do uso de recursos naturais, protegendo, portanto, o meio ambiente.

Referências Bibliográficas

AGNELLI, J.A.M. Apostila do Curso " Introdução aos Polímeros" ,Cap. 2 , Estrutura e Propriedades dos Polímeros, Instituto Latino Americano de Tecnologia, Campinas,1991.

ARBURG- Palestra Técnica - Máquinas Injetoras e Processos Especiais de Injeção. 16º Simpósio Internacional da VDI, agosto de 2006.

ASHBY,M.F.; JONES, D.H. - Engeneering Materials 2, Pergamon Press, 1988. pp 237-238

BASF - Palestra Técnica- Air Intake Manifolds. 16º Simpósio Internacional da VDI, agosto de 2006.

BATTENFELD- Palestra Técnica - Máquinas Injetoras Convencionais e Elétricas. 16º Simpósio Internacional da VDI, agosto de 2006.

BILLMEYER JR. F.W. –Textbook of Polymer science, 3ª ed. New York: John Wiley & Sons (1984).

BLASS, A. Processamento de Polímeros. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. - Reologia de Polímeros Fundidos, EdUFSCAR, São Carlos, 2000 pp.71-109.

CALLISTER Jr.,W.D. Ciência e Engenharia de Materiais- Uma Introdução, 5a Edição, Ed.LCT, RJ,2002.

CHEN, Z.; TURNG, L. A review of current developments in process and quality control for injection molding, Advances in Polymer Technology, Vol. 24, Issue 3, pp. 165-182 (2005).

CRUZ, S. Moldes de Injeção: Termoplásticos 2ª edição - Editora Hemus (2004).

DEBONDUE, E. et. al. Weld-line sensitivity of injected amorphous polymers, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 93, pp. 644-650 (2004).

EDWARDS, S.A.; et al. Probing the interface behaviour of injection molded thermoplastics by micro-thermal analysis and temperature-modulated differential scanning calorimetry, Polymer , Vol. 44, no. 13, pp 3661-3670 (2003).

GEPLASTICS - General Electric Company. Disponível em [www.geplastics.com.br]. 2001. Acesso em Junho, 2007

GRILLET, A.M. et al. Numerical analysis of flow mark surface defects in injection molding flow, J. Rheol., vol. 46, Issue 3, pp. 651-669 (2002).

HUANG, M.C.; TAI, C.C. The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature, Journal of Materials Processing Technology, Volume 110, pp. 1-9 (2001).

KAMAL,M.R.; LAI-FOOK, R.A.; HERNANDEZ-AGUILAR Residual thermal stresses in injection moldings of thermoplastics : a theorical and experimental study, Polymer Engineering and Science, Volume 42 Issue 5 pp. 1098-1114 (2002).

KAMEOKA, S.; HARAMOTO, N.; SAKAI, T. Development of na expert system for injection moldind operations, Advances in Polymer Technology, Vol. 12, Issue 4, pp. 403-418 (2003).

KIM, H.S.; SON, J.S.; IM, Y.T. Gate location design in injection molding of an automobile junction box with integral hinges, Journal of Materials Processing Technology, Volume 140, Issues 1-3, pp. 110-115 (2003).

MALLOY, R. A. - Plastic part design for injection molding: An introduction, Hanser/Gadner Publications, 1994, Munich, Vienna, New York, Hanser.

MANO, E. B. - Polímeros como Materiais de Engenharia - Ed. Edgar Blucher, 1991.

MANO, E. B. - Introdução a polímeros - Ed. Edgar Blucher, 1985.

MANRICH, S. - Injeção de Termoplásticos, Apostila do Instituto Latino Americano de Tecnologia , 1990 Campinas.

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

MARTINS, G. Disponível em [www.planetaplastico.com.br].2006 . Acesso em Junho, 2007

MICHAELI, W.; et al , Tecnologia dos Plásticos, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo , 1992, pp 103 -115.

POMERLEAU, J.; SANSCHAGRIN, B. Injection molding shrinkage of PP: experimental progress, Polymer Engineering and Science, Volume 46, Issue 9, pp. 1275-1283 (2006).

RABELLO, M. Aditivação de Polímeros, ed.Artliber, 2000, 242p.

RAUWENDAAL, C. - Polymer Extrusion - 4 ed. Munich; Hanser; Cincinnati; Hanser Gardner, 2001.

RODOLFO, A. J. ; NUNES, L. R. ; ORMANJI, W., Tecnologia do PVC, ProEditores Associados, São Paulo ,2 ª ed. 2006, 448p.

SENAI, Escola Mário Amato- Apostila: Troca rápida "Set Up" - e Processos de Transformação Elaborada pelo Núcleo de Tecnologia do Plástico para o NAE - Núcleo de Assistência às Empresas.

SEYMOUR, R.B. Polymer for Engineering Applications, ASM International,1987, 198p.

SHI, F.; LOU, Z.L.; LU, J.G.; ZHANG, Y.Q. Optimisation of plastic injection moulding process with soft computing, Int J. Adv. Manuf. Technolo, Vol. 21, pp. 656-661 (2003).

SMARTTECH - CARNEIRO, M.S. - Apostilas de treinamento Moldflow, disponível em www.smarttechplastico.com.br, acesso em Junho 2007.

TAN, K.H.; YUEN, M.M.F. A fuzzy multiobjective approach for minimization of injection molding defects, Polymer Engineering and Science, Volume 40, Issue 4, pp. 956-971 (2004).

TANG, S.H.; ET al. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage, Journal of Materials Processing Technology, Volume 182, pp. 418-426(2007).

VAN HOLDE, K.E.; Bioquímica Física; Tradução de Juergen Heinrich Maar. Editora Edgard Blucher, 1975.

VIEIRA, R.C.C.; Atlas de Mecânica dos Fluidos e Fluidodinâmica. Editora Edgard Blucher, 1971.

ZAVAGLIA, C.A.C. Introdução à Tecnologia de Polímeros, Apostila Didática, Ministério da Aeronáutica, Centro Técnico Aeroespacial, Reciclagem e Desenvolvimento de Recursos Humanos de Nível Superior, 1989, 158 p.

ZAVAGLIA, C.A.C. Seleção de Materiais, Apostila Didática, Curso de Especialização em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Maio de 1995.

WEIR, S. Predicting surface defects in ijnection molded PVC components, Journal of Vinyl and Additive Technology, Volume 16, Issue 4, pp. 231-234 (2004).

Anexo A

Conceitos Básicos em Polímeros (ZAVAGLIA,1989), (AGNELLI,1991), (MANO, 1985), (MANO, 1991) e (RABELLO 2000).

Polímero- substâncias de alta massa molar formadas pelo encadeamento de várias moléculas denominadas monômeros. São constituídos portanto, por macro-moléculas cuja massa molar é de10^3 a 10^6daltrons. A palavra polímero engloba os seguintes materiais: plásticos, borrachas (ou elastômeros) naturais, borrachas sintéticas, materiais orgânicos (Ex.: couro, lã, celulose, proteínas formadoras de músculos, pele, etc)

Polimerização – processo químico, através do qual, várias moléculas básicas (meros) se unem para formar um polímero

Homopolímero – polímero formado por moléculas básicas de uma mesma espécie química

Copolímero – polímero formado por moléculas básicas de espécies químicas diferentes

Terpolímero – caso particular de copolímero formado por três moléculas básicas (meros) de uma mesma espécie química

Grau de polimerização - (GPou n)- número de meros que se repetem

Elastômero (ou borracha) – material que à temperatura ambiente estica, a baixas tensões , a pelo menos duas vezes o seu comprimento inicial, e volta ao tamanho inicial quando se retira a tensão

Vulcanização – reação química através da qual as propriedades físicas de um elastômero são modificadas devido à reação com enxofre ou com outros agentes promotores de ligações cruzadas

Termoplástico – polímero que pode ser amolecido repetidas vezes, sob a ação do calor, e endurecido mediante o resfriamento. Essa alteração reversível é física e não química, portanto pode ocorrer alguma degradação do material devido ao elevado número de ciclos de aquecimento-resfriamento

Termofixo (ou termorrígidos ou termoestáveis) –polímero que pode ser amolecido, sob ação do calor, mas uma vez endurecido pelo resfriamento, não será mais amolecido. Na realidade, as matérias primas para os termofixos são oligômeros, resinas termoplásticas, que quando moldadas e transformadas em produtos são curadas e transformadas em termofixos, materiais insolúveis e infusíveis, pois contém alta densidade de ligações cruzadas.

Oligômero- material com massa molar intermediária entre os materiais de baixa massa molar e os polímeros. Esse termo também sinônimo de pré-polímero, com grau de polimerização entre 5 e 100

Monômero –molécula simples que dá origem à unidade de repetição (mero) de um polímero.Essa molécula deve ser pelo menos bifuncional, para ter a capacidade de reagir em pelo menos dois pontos, dando origem à cadeia polimérica

Mero- unidade estrutural que se repete na cadeia do polímero

Blenda polimérica- misturas físicas ou mecânicas de dois ou mais polímeros, de modo que só exista interação intermolecular secundária entre as cadeias moleculares dos diferentes polímeros, ou seja, não exista reação química tradicional entre as cadeias moleculares desses polímeros

Compósito (ou material conjugado ou material composto)- material formado por pelo menos duas fases de dois componentes, sendo geralmente uma fase polimérica (matriz) e outra fase de reforço, normalmente na forma de fibras. É necessário haver uma interação química ou física entre a matriz polimérica e o reforço fibroso, proporcionando a transferência de esforços mecânicos da matriz polimérica para o reforço.

Processamento de polímeros (ou moldagem) – é a transformação de um polímero, como matéria prima, em um produto final. Muitas vezes são adicionados aditivos para facilitar o processamento e modificar as propriedades. Várias técnicas podem ser utilizadas no processamento de polímeros, podendo ser destacadas: injeção, extrusão, sopro, compressão, calandragem, termoformagem a vácuo, rotomoldagem, moldagem reativa por injeção (RIM),moldagem por por vazamento e moldagens manuais.

Aditivos – são materiais adicionados como componentes auxiliares dos plásticos e borrachas. Os aditivos atuam desde a etapa de polimerização até a moldagem final, alterando as propriedades finais dos polímeros originais. Através da escolha e dosagem adequada dos aditivos, podem-se obter polímeros feitos sob medida para aplicações específicas. Exemplos de aditivos: plastificantes, lubrificantes, estabilizantes, pigmentos, cargas, espumantes, antiestáticos, retardamento de chama, nucleantes, modificadores de comportamento ao impacto.

Plásticos de uso geral (commodities) – São polímeros de interesse comercial,que não possuem excelentes propriedades, porém são feitos em grande quantidade e são de baixo custo. Exemplos de termoplásticos: PE (HDPE, LPDE, LLDPE), PP(homo e copol.), PVC, PVA, EVA, PMMA, OS, HIPS,SAN, ABS. Exemplos de borrachas: SBR, Isopreno(IR), Butadieno (BR), Butílica (IIR, CIIR) .Exemplos de termofixos: Fenólicas (PF), Epoxi (EP), Poliéster Insaturado (UP), Amínicas (UF,MF).

Plásticos de engenharia – São polímeros com propriedades superiores, que possuem aplicações em engenharia. São mais caros que os plásticos de uso geral. Exemplos de termoplásticos: Poliamidas (PA6, PA66, PA6 10, PA10, PA12), PC, PPO modificado,

poliacetais (POM, copolímeros), PET, PBT, PTFE , PVDF, ETFE. Exemplos de elastômeros : cloropreno (CR), nitrílica (NBR), acrílica (ACM), fluorada (FKM,CFM), silicone, EVA. Exemplos de termofixos : Poliimida (PI), Bismaleimida

(BMI), Silicone.

Plásticos de uso especial – São polímeros com propriedades muito especiais e utilizados para aplicações avançadas. Normalmente são feitos em quantidades menores que os demais plásticos e, portanto, são mais caros. Exemplos de termoplásticos especiais: polisulfonas (PSF), poli (sulfeto de fenileno) (PPS), poli (éter-éter-cetona) (PEEK), poliamida imida (PAI). Exemplo de termofixo especial: poliuretano.

Temperatura de transição vítrea (T_G) - É a propriedade do material onde podemos obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado "maleável", sem ocorrência de uma mudança estrutural. A parte amorfa do material (parte onde as cadeias moleculares estão desordenadas) é a responsável pela caracterização da Temperatura de Transição Vítrea. Abaixo da T_G, o material não tem energia interna suficiente para permitir deslocamento de uma cadeia com relação a outra por mudanças conformacionais. Portanto, quanto mais cristalino for o material, menor será a representatividade da Transição Vítrea.

Temperatura de fusão cristalina (T_M)- É o valor médio da faixa de temperatura em que durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas. Neste ponto a energia do sistema é suficiente para vencer as forças intermoleculares secundarias entre as cadeias de fase cristalina, mudando do estado borrachoso para estado viscoso (fluido).

Este fenômeno só ocorre na fase cristalina, portanto só tem sentido de ser considerado para polímeros semicristalinos.

A tabela I-1 apresenta exemplos de temperaturas de transição vítrea e de fusão para alguns polímeros.

Material	**T_G(^{o}C)**	**T_M (^{o}C)**
PE(baixa dens.)	-110	115
Teflon	-97	327
PE (Alta dens.)	-90	137
PP	-18	175
Nylon 6,6	57	265
PET	69	265
PVC	87	212
PS	100	240
PC	150	265

Tabela I-1 - Temperaturas de transição vítrea e de fusão para alguns polímeros.

Anexo B

Propriedades de Alguns Polímeros Termoplásticos (ZAVAGLIA, 1995), (SEYMOUR,1987) e (CALLISTER, 2002)

1- ACETAIS (POLI ÓXIDO DE METILENO-POM)

PROPRIEDADE	Homopolí-mero	Copolímero	Copolímero Reforçado (25% fibra de vidro)
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	125	110	160
Máxima temperatura de trabalho(aquecimento prolongado) (^{o}C)	100	100	125
Coeficiente de expansão térmica linear (cm/cm/ ^{o}Cx 10^{-5})	10,0	8,5	5,0
Resistência à compressão (MPa)	106,1	110,3	117,2
Resistência à flexão(MPa)	96,5	89,6	193,0
Resistência ao impacto (IZOD)(cm.N/cm de entalhe)	80,1	69,4	96.1
Resistência à tração (MPa)	68,9	62,0	128,6
Alongamento (%)	30	50	3
Dureza, Rockwell	M94	M78	M79
Densidade(g/cm^{3})	1,41	1,41	1,61
Constante dielétrica	3,2	3,7	4,0

2- POLIAMIDAS (NYLONS)

PROPRIEDADE	**Nylon 66**	**Nylon 66 reforçado com fibra de vidro**	**Nylon6**	**Nylon 6 reforçado com fibra de vidro**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	75	250	80	210
Máxima temperatura de trabalho (^oC)	120	140	125	130
Coeficiente de expansão térmica linear(cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	8,0	2,0	8,0	3,0
Resistência à compressão(MPa)	103,5	207,0	96,5	131,0
Resistência à Flexão(MPa)	103,5	276,0	96,5	207,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	80	106,7	160	160
Resistência `a Tração (MPa)	82,7	172,0	62,0	172,0
Alongamento(%)	60	3	3	3
Dureza , Rockwell	R120	M100	M119	M101
Densidade (g/cm^3)	1,2	1,4	1,15	1,4
Constante Dielétrica	4,0	4,0	4,0	4,0
Absorção de Água (%)	2,5	3,0	2,7	3,2

3- PLÁSTICOS POLIFLUORCARBÔNICOS

PROPRIEDADE	PTFE	PCTFE	PVDF	PVF	PE-CTFE	PE-TFE
Temp. de deflexão a 1820kPa (^oC)	100	100	80	90	115	120
Máxima temperatura de trabalho (^oC)	250	200	150	125	100	160
Coeficiente de expansão térmica linear ($cm/cm/^oCx10^{-5}$)	10	14	8,5	10	8	7
Resistência à compressão (MPa)	27,6	38,0	-	-	41,4	48,3
Resistência à Flexão (MPa)	-	60	-	-	48,3	38,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	160	133,5	-	-	-	-
Resistência `a Tração (MPa)	24,1	34,5	55,2	-	48,3	48,3
Alongamento(%)	200	100	200	-	200	250
Dureza , Rockwell	D52	R80	R110	D64	R95	R50
Densidade (g/cm^3)	2,16	2,1	1,76	1,4	1,7	1,7
Constante Dielétrica	2,0	2,5	8,0	8,0	5,0	2,7
Absorção de Água (%)	0	0	0	0	0	0

4- POLIETILENO

PROPRIEDADE	**PEBD**	**PEAD**	**PEUAPM**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	40	85	85
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	40	80	80
Coeficiente de expansão térmica linear (cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	10,0	12,0	12,0
Resistência à compressão(MPa)	-	20,7	-
Resistência à Flexão(MPa)	-	-	-
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	Não Quebra	106,7	Não Quebra
Resistência `a Tração (MPa)	5,5	27,6	38,0
Alongamento(%)	100	30	400
Dureza , Rockwell	D40	D40	R50
Densidade (g/cm^{3})	0,91	0,95	0,94
Constante Dielétrica	2,3	2,3	2,3

5- POLIESTIRENO

PROPRIEDADE	**PS (Sem Carga)**	**HIPS**	**PS 30% Fibra de Vidro**	**SAN**
Temperatura de deflexão a 1820kPa(^{o}C)	90	90	105	100
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	75	70	95	85
Coeficiente de expansão térmica linear(cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	7,5	8,0	4,0	6,0
Resistência à compressão (MPa)	89,6	45,0	103,4	90,0
Resistência à Flexão (MPa)	82,7	50,0	117,0	100,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	21	80	80	30
Resistência `aTração (MPa)	41,4	41,4	82,7	60,0
Alongamento(%)	1,5	3,0	1,0	1,5
Dureza , Rockwell	M60	M34	M60	M80
Densidade (g/cm^{3})	1,04	1,04	1,2	1,07
Constante Dielétrica	2,5	3,0	3,0	3,5

6- POLICARBONATO

PROPRIEDADE	SEM REFORÇO	COM 20% FIBRA DE VIDRO
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	130	145
Máxima temperatura de trabalho (^oC)	115	130
Coeficiente de expansão térmica linear(cm/cm/$^oCx10^{-5}$)	6,8	2,2
Resistência à compressão (MPa)	86,0	124,0
Resistência à Flexão (MPa)	93,0	158,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	534	106
Resistência `a Tração (MPa)	72,0	131,0
Alongamento(%)	110	4
Dureza , Rockwell	M70	M92
Densidade (g/cm^3)	1,2	1,4
Constante Dielétrica	3	4
Absorção de Água (%)	0,15	0,25

7- POLI(TEREFTALATO DE ETILENO)

PROPRIEDADE	**PET**	**PET com 30 % fibra de vidro**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	100	226
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	100	160
Coeficiente de expansão térmica linear(cm/cm/^{o}Cx10^{-5}	6,5	2,9
Resistência à compressão (MPa)	86,0	172,0
Resistência à Flexão(MPa)	112,3	234,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	26,7	50
Resistência `aTração (MPa)	62,0	158,0
Alongamento(%)	100	2,5
Dureza , Rockwell	M95	M100
Densidade (g/cm^{3})	1,35	1,56
Constante Dielétrica	3,6	4,0
Absorção de Água (%)	0,2	0,05

8- POLI(TEREFTALATO DE BUTILENO)

PROPRIEDADE	**PBT**	**PBT com 30 % fibra de vidro**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	65	200
Máxima temperatura de trabalho (^oC)	60	150
Coeficiente de expansão térmica linear (cm/cm/$^oCx10^{-5}$)	7,0	2,5
Resistência à compressão (MPa)	75,0	120,0
Resistência à Flexão (MPa)	96,0	110,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	53,4	50,0
Resistência `aTração (MPa)	55,0	117,0
Alongamento(%)	100	4
Dureza , Rockwell	M70	M90
Densidade (g/cm^3)	1,35	1,50
Constante Dielétrica	4,0	4,0
Absorção de Água (%)	0,05	0,05

9- ACRÍLICOS (PMMA)

PROPRIEDADE	ACRÍLICO FUNDIDO	BLENDA ACRÍLICO -PVC
Temperatura de deflexão a 1820kPa(^{o}C)	95	70
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^{o}C)	75	60
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ ^{o}Cx 10^{-5})	7,0	6,0
Resistência à compressão (MPa)	103,4	57,9
Resistência à flexão (MPa)	96,5	72,4
Resistência ao impacto (IZOD) (cm.N/cm de entalhe)	21,4	8,0
Resistência à tração (MPa)	65,5	44,8
Alongamento (%)	4	100
Dureza, Rockwell	M80	M100
Densidade (g/cm^{3})	1,18	1,25
Constante dielétrica	3,0	3,5

10 – POLI (ÓXIDO DE FENILENO)

PROPRIEDADE	**PPO**	**PPO com 30% Fibras de Vidro**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	100	145
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	80	130
Coeficiente de expansão térmica linear (cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	5,0	2,0
Resistência à compressão (MPa)	96,0	123,0
Resistência à Flexão(MPa)	89,0	144,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	270	107
Resistência `aTração (MPa)	55,0	120,0
Alongamento(%)	50	4
Dureza , Rockwell	R115	R115
Densidade (g/cm^{3})	1,1	1,1
Constante Dielétrica	2,8	3,0
Absorção de Água (%)	0,7	1,0

11- POLI (SULFETO DE FENILENO)

PROPRIEDADE	PPS Sem Reforço	PPS Com 40% Fibra de Vidro
Temperatura de deflexão a 1820kPa(^{o}C)	135	250
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	110	200
Coeficiente de expansão térmica linear(cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	5,0	2,2
Resistência à compressão (MPa)	110,0	145,0
Resistência à Flexão (MPa)	96,0	207,0
Resistência ao Impacto, Izod(cm.N/cm de entalhe)	21	75
Resistência `aTração (MPa)	74,0	141,0
Alongamento(%)	1,1	1,0
Dureza , Rockwell	R123	R123
Densidade (g/cm^{3})	1,3	1,6
Constante Dielétrica	3,8	4,6

12 – POLISULFONAS

PROPRIEDADE	**POLISULFONA**	**POLI (ÉTER SULFONA)**
Temperatura de deflexão a 1820kPa(^{o}C)	175	205
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	150	165
Coeficiente de expansão térmica linear(cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	5,4	5,5
Resistência à compressão (MPa)	96,0	96,0
Resistência à Flexão (MPa)	107,0	127,0
Resistência ao Impacto, Izod(cm.N/cm de entalhe)	80	80
Resistência `a Tração (MPa)	82,0	82,0
Alongamento(%)	25	25
Dureza , Rockwell	M69	M88
Densidade (g/cm^{3})	1,24	1,37
Constante Dielétrica	3,1	3,1
Absorção de Água (%)	0,3	0,4

13- POLI (ÉTER-ÉTER-CETONA)

PROPRIEDADE	PEEK Sem Reforço	PEEK Com 40% Fibras de Vidro
Temperatura de deflexão a 1820kPa(^{o}C)	150	300
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	125	225
Coeficiente de expansão térmica linear (cm/cm/^{o}Cx10^{-5})	5,5	2,2
Resistência à compressão(MPa)	90,0	125,0
Resistência à Flexão(MPa)	110,0	250,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	50	75
Resistência `a Tração (MPa)	70,0	107,0
Alongamento(%)	50	2
Dureza , Rockwell	R123	R123
Densidade (g/cm^{3})	1,3	1,5
Constante Dielétrica	3,2	3,5
Absorção de Água (%)	0,15	0,12

14- POLÍMERO CRISTAL LÍQUIDO (LCP)

PROPRIEDADE	**LCP Sem Reforço**	**LCP Com 50% de Talco**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	350	325
Máxima temperatura de trabalho (^{o}C)	250	250
Resistência à compressão (MPa)	42,0	42,0
Resistência à Flexão (MPa)	125,0	110,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	135	70
Resistência `a Tração (MPa)	135,0	70,0
Alongamento(%)	4,0	3,0
Dureza , Rockwell	R60	R76
Densidade (g/cm^{3})	1,35	1,84
Constante Dielétrica	3,0	3,5
Absorção de Água (%)	0	0

15 – POLI (ÉTER- IMIDA)

PROPRIEDADE	**PEI**	**PEI 10% fibra de vidro**	**PEI 20% fibra de vidro**	**PEI 30% fibra de vidro**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	190	200	205	210
Máx. temp. de trabalho(^{o}C)	170	175	180	185
Coeficiente de expansào térmica linear	5,6	4,4	3,2	2,0
Resistência à compressão(MPa)	140,0	155,0	169,0	176,0
Resistência à Flexão(MPa)	145,0	195,0	205,0	225,0
Resistência ao Impacto, Izod (cm.N/cm de entalhe)	133,5	146,0	213,0	267,0
Resistência `aTração (MPa)	104,0	114,0	138,0	169,0
Alongamento(%)	6,0	6,0	3,0	3,0
Dureza , Rockwell	M109	M115	M120	M125
Densidade (g/cm^{3})	1,27	1,35	1,45	1,6
Constante Dielétrica	3,1	3,3	3,5	3,7
Absorção de Água (%)	0,06	0,1	0,15	0,2

16 - POLIPROPILENO(PP) E POLIMETILPENTENO(TPX)

PROPRIEDADE	PP	TPX
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	80	55
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^{o}C)	70	50
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ ^{o}Cx 10^{-5})	9,0	11,7
Resistência à compressão (MPa)	44,8	38,0
Resistência à flexão (MPa)	48,0	34,5
Resistência ao impacto (IZOD)(cm.N/cm de entalhe)	27	27
Resistência à tração (MPa)	34,5	24,1
Alongamento (%)	100	15
Dureza, Rockwell	R80	L70
Densidade(g/cm^{3})	0,90	0,83
Constante dielétrica	2,3	2,1

17 - COPOLÍMEROS DE ETILENO (EVA E EVAL)

PROPRIEDADE	EVA	EVAL	IONÔMERO
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	-	-	45
Temperatura de transição vítrea (^oC)	-	60	-
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ $^oCx\ 10^{-5}$)	22	-	15
Resistência à tração (MPa)	20,0	65,0	27,0
Alongamento (%)	500	250	400
Dureza, Shore D	30	-	60
Densidade(g/cm^3)	0,93	1.16	0,95
Constante dielétrica	3,0	-	3,0

18 - POLIAMIDAS (FIBRAS)

PROPRIEDADE	Nylon 66	Nylon 6	Nylon 11	Nylon 610
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	75	80	55	80
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^oC)	65	70	60	75
Ponto de fusão (^oC)	265	215	185	220
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ $^oCx\ 10^{-5}$)	8,0	8,0	10,0	10,0
Resistência à tração (MPa)	82,7	62,0	50,0	55,0
Alongamento (%)	60	100	120	100
Densidade(g/cm^3)	1,14	1,13	1,05	1,09
Constante dielétrica	4,0	4,0	3,5	4,5

19 - POLÍMEROS DE CELULOSE

PROPRIEDADE	ETIL CELULOSE	TRIACETATO DE CELULOSE	ACETATO BUTIRATO DE CELULOSE
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	65	65	65
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^{o}C)	60	60	60
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ ^{o}Cx 10^{-5})	15,0	12,5	14,0
Resistência à compressão(MPa)	120,0	55,0	34,5
Resistência à flexão(MPa)	41,4	55,2	41,3
Resistência ao impacto (IZOD)(cm.N/cm de entalhe)	21,3	106,7	34,5
Resistência à tração(MPa)	34,5	41,5	34,5
Alongamento (%)	10	25	50
Dureza, Rockwell	R60	R80	R75
Densidade(g/cm^{3})	1,1	1,3	1,2
Constante dielétrica	3	4	4

20 - POLIÉSTER (FIBRAS)

PROPRIEDADE	POLIÉSTER
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	65
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^oC)	60
Ponto de fusão (^oC)	240
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ $^oCx\ 10^{-5}$)	7
Resistência à tração (MPa)	60,0
Alongamento (%)	50
Densidade (g/cm^3)	1,35
Constante dielétrica	3,0

21 - POLIAMIDA AROMÁTICA (FIBRAS)

PROPRIEDADE	POLIAMIDA AROMÁTICA
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	260
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^oC)	150
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ $^oCx\ 10^{-5}$)	2,6
Resistência à tração(MPa)	120,0
Alongamento (%)	5
Densidade (g/cm^3)	1,2
Constante dielétrica	3,0

22 - POLI IMIDA (PI) (FIBRAS)

PROPRIEDADE	**PI**
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^{o}C)	315
Máxima temperatura de trabalho (aquecimento prolongado) (^{o}C)	300
Coeficiente de expan-são térmica linear (cm/cm/ ^{o}Cx 10^{-5})	5,0
Resistência à tração(MPa)	96,5
Alongamento (%)	8
Densidade (g/cm^{3})	1,4
Constante dielétrica	3,5

23. POLI IMIDA

PROPRIEDADE	TERMOPLÁSTICO	TERMOFIXO COM 50% FIBRA DE VIDRO
Temperatura de deflexão a 1820kPa (^oC)	315	350
Máxima temperatura de trabalho (^oC)	300	325
Coeficiente de expansão térmica linear ($cm/cm/^oCx10^{-5}$)	5,0	1,3
Resistência à compressão (MPa)	241,3	234,4
Resistência à Flexão (MPa)	172,4	144,8
Resistência ao Impacto, Izod(cm.N/cm de entalhe)	80	294
Resistência `a Tração (MPa)	96,5	44,0
Alongamento(%)	8	0,5
Dureza , Rockwell	E60	M118
Densidade(g/cm^3)	1,4	1,6
Constante Dielétrica	3,4	3,5
Absorção de Água (%)	0	0,2