

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO NA QUALIDADE DE PEÇAS TERMOPLÁSTICAS
MOLDADAS POR INJEÇÃO, COM ESTUDO DE CASO EM SISTEMAS CAE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALBERT YURI FARIAS MYLLA

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1998

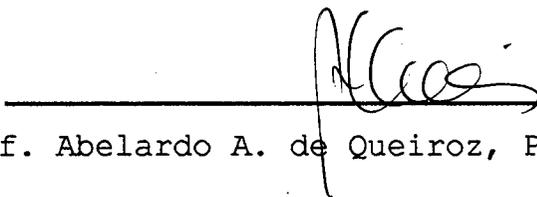
INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO NA QUALIDADE DE PEÇAS TERMOPLÁSTICAS
MOLDADAS POR INJEÇÃO, COM ESTUDO DE CASO EM SISTEMAS CAE

ALBERT YURI FARIAS MYLLA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. - ORIENTADOR



Prof. Abelardo A. de Queiroz, Ph.D. - COORDENADOR DO CURSO

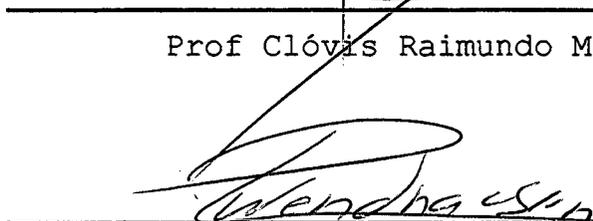
BANCA EXAMINADORA



Prof. Aureo Campos Ferreira, Ph.D.



Prof Clóvis Raimundo Maliska, Ph.D.



Prof. Paulo Wendhausen, Dr-Ing.

A Deus

A meus Pais, Sr. Mylla e Dna. Ita

A meus irmãos, Cláudio, Andyara e Mozara

Agradecimentos:

- Ao CNPq pelo auxílio financeiro.
- Ao professor Carlos Henrique Ahrens pela orientação e apoio durante todas as etapas do trabalho, e pela amizade e paciência dentro e fora do ambiente de trabalho.
- Aos professores António Sérgio Pouzada e António Brito do Curso de Engenharia de Polimeros da Universidade do Minho, pelo apoio indispensável para a realização do trabalho.
- À Empresa Portuguesa Molde Matos Lda. pela acolhida e ensinamentos que contribuíram de muito para a realização deste trabalho.
- Aos amigos da Molde Matos, Sr. Arnaldo Matos, Arnaldo Pedro Matos, Sr. Albano, Sr. Franco, Clodine, Sr. Catarino, enfim, todas as pessoas que me acolheram tão bem.
- Aos amigos da Universidade do Minho.
- À Piedade, Peixoto e Braida, por me "aturarem" durante minha estada em Portugal.
- A todos meus amigos do CIMJECT, pelo apoio dentro do laboratório e "descontrações" fora dele.
- Ao Curso Técnico em Plásticos da Escola Técnica Federal de Pelotas, Unidade de Ensino Descentralizado de Sapucaia do Sul.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	4
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
2. MORFOLOGIA E PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS RELATIVOS AO FENÔMENO DE RESFRIAMENTO	8
2.1. MORFOLOGIA DOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS.....	10
2.1.1. POLÍMERO AMORFO.....	11
2.1.2. POLÍMERO SEMI-CRISTALINO.....	12
2.1.2.1. Os Esferulitos.....	13
2.1.2.2. Cristalização.....	14
2.1.2.3. Cristalização Orientada.....	16
2.1.2.4. Grau de cristalinidade.....	18
2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	19
2.2.1. CAPACIDADE TÉRMICA OU CALOR ESPECÍFICO.....	19
2.2.2. CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	20
2.2.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	21
3. CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO QUE INFLUENCIAM E SÃO INFLUENCIADAS PELO SISTEMA DE RESFRIAMENTO	22

3.1. PARÂMETROS DE INJEÇÃO.....	23
3.1.1. VAZÃO VOLUMÉTRICA.....	25
3.1.2. TEMPERATURA DE INJEÇÃO.....	26
3.1.3. TEMPERATURA DO MOLDE.....	26
3.2. TENSÕES INTERNAS ORIGINÁRIAS DO RESFRIAMENTO.....	31
3.2.1. MECANISMOS DE EMPENAMENTO.....	33
a) Contração de área.....	33
b) Contração da seção transversal.....	34
c) Variação da contração diferencial.....	35
4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.....	36
4.1. COM RELAÇÃO A FORMA DOS CANAIS DE RESFRIAMENTO.....	37
4.2. COM REALAÇÃO AO TRAÇADO DOS CANAIS DE RESFRIAMENTO...	40
4.3. GEOMETRIAS ESPECIAIS PARA CANAIS DE RESFRIAMENTO.....	42
4.3.1. POSTIÇOS INTERNOS.....	44
4.3.2. DEFLETORES.....	45
4.3.3. CASCATAS.....	46
4.4. OUTRAS FORMAS DE RESFRIAMENTO.....	45
4.4.1. PINOS TÉRMICOS.....	47
4.4.2. LIGAS COM ALTA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	49
5. VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM MOLDE PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.....	50
5.1. SOLUÇÕES ANALÍTICAS.....	50
5.2. SOLUÇÕES NUMÉRICAS.....	61

5.2.1.	VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE UM SOFTWARE CAE...	62
5.2.2.	A ANÁLISE ATRAVÉS DE UM SOFTWARE DE CAE.....	65
5.2.2.1.	Análise Bidimensional.....	66
5.2.2.2.	Análise Tridimensional.....	67
5.2.3.	PROCEDIMENTO PARA EFETUAR UMA SIMULAÇÃO DE CAE PARA RESFRIAMENTO.....	67
5.2.3.1.	Modelamento da Peça e Análise de Preenchimento.....	68
5.2.3.2.	Modelamento dos Canais de Resfriamento.	69
5.2.4.	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	70
6.	ESTUDO DE CASO.	
	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO.....	73
6.1.	ESTUDO DE CASO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO ANALÍTICO PROPOSTO E O MÉTODO NUMÉRICO.....	73
6.1.1.	ESCOLHA DA PEÇA.....	74
6.1.2.	PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	75
6.1.2.1.	Levantamento de Informações da Peça e do Molde.....	76
6.1.2.2.	Aplicação da Metodologia.....	79
6.1.2.3.	Simulação do Softwares de CAE para Resfriamento.....	78
6.2.	ESTUDO DE CASO 2 - ANÁLISE DO PROJETO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM MOLDE PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.....	81
6.2.1.	ESCOLHA DA PEÇA.....	82
6.2.2.	ANÁLISE DE RESFRIAMENTO PARA O MOLDE ORIGINAL.	81
6.2.3.	ANÁLISE DE RESFRIAMENTO PARA O MOLDE MODIFICADO.....	85

6.2.4. ANÁLISE DE RESFRIAMENTO COM TEMPERATURA DO FLUIDO DE RESFRIAMENTO MAIS ELEVADA.....	86
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	87
7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1.....	87
7.1.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	87
7.1.1.1. Tempo de Resfriamento.....	88
7.1.1.2. Distribuição de temperaturas entre a saída e a entrada dos canais de resfriamento.....	89
7.1.1.3. Distribuição de temperaturas nas paredes do molde.....	89
7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2.....	92
7.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MOLDE ORIGINAL.....	94
7.2.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS ORIUNDOS DA MODIFICAÇÃO PROPOSTA.....	97
7.2.3. ANÁLISE DE RESFRIAMENTO COM A TEMPERATURA MAIS ELEVADA DO FLUIDO DE RESFRIAMENTO.....	98
8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	99
BIBLIOGRAFIA.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela	Legenda	Página
3.1 -	Temperatura de molde recomendadas para diferentes materiais.....	28
4.1 -	Diâmetros para os furos dos canais de resfriamento.....	39
4.2 -	Propriedades das ligas de AMPCO, comparadas com os materiais mais utilizados para a construção de moldes.....	49
5.1 -	Software de CAE para análise de resfriamento disponíveis no mercado.....	65
6.1 -	Resultados obtidos empregando a metodologia proposta no molde da peça do primeiro estudo de caso.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura	Legenda	Página
2.1 -	Gráfico de temperatura x viscosidade onde é notada a temperatura de transição vítrea	9
2.2 -	Gráfico de viscosidade e alongação x temperatura onde são mostradas as regiões onde ocorrem a Tg e a Tm....	10
2.3 -	Esquema da morfologia de um polímero amorfo.....	11
2.4 -	Fotomicrografia de um cristalito.....	13
2.5 -	Fotomicrografia de esferulitos de polietileno, e um esferulito em detalhe.....	14
2.6 -	Esquema de nucleação e crescimento de um esferulito ao longo do tempo (t0 a t3).....	15
2.7 -	Fotomicrografia de um corte transversal de uma peça injetada em POM.....	18
2.8 -	Variação da entalpia com a temperatura para alguns polímeros.....	20
3.1 -	Distribuição dos tempos de cada etapa do tempo total de ciclo.....	23
3.2 -	Formação da camada solidificada e escoamento em fonte ou "fountain flow".....	24
3.3 -	Cortes transversais em peças injetadas em PP, demonstrando a variação da espessura da casca em função da temperatura do molde.....	27
3.4 -	Variação da temperatura da superfície da cavidade durante o ciclo de injeção.....	29
3.5 -	Gráfico representativo do comportamento das tensões internas em (a) um material com propriedades elásticas constantes e (b) em um polímero real.....	32

3.6 - Contração de área.....	33
3.7 - Deformações por contração de área.....	34
3.8 - Empenamento por contração da seção transversal.....	34
4.1 - Forma ideal de canais de resfriamento.....	38
4.2 - Forma possível de canais de resfriamento.....	38
4.3 - Forma mais usual de canais de resfriamento.....	39
4.4 - Resfriamento externo com postiço redondo.....	43
4.5 - Postiço de resfriamento para o macho.....	44
4.6 - Esquema de funcionamento de um defletor.....	45
4.7 - Esquema de funcionamento de uma cascata.....	46
4.8 - Esquema ilustrativo de funcionamento de um Pino térnico.....	48
5.1 - Comportamento da difusividade térmica com a temperatura.....	52
5.2 - Variação da entalpia com a temperatura para alguns polímeros.....	53
5.3 - Esquema do fluxo de calor no molde.....	57
5.4 - Distribuição de temperatura nas paredes da cavidade..	60
5.5 - Análise bidimensional.....	66
5.6 - Peça modelada no CAD para análise de preenchimento...	68
5.7 - Análise de preenchimento.....	69
5.8 - modelamento dos canais de resfriamento.....	70
6.1 - Peça do primeiro estudo de caso.....	75
6.2 - Traçado circuito de canais de baseado nas informações do método analítico.....	78
6.3 - Peça do segundo estudo de caso.....	81
6.4 - Análise de preenchimento para a peça do estudo de caso 2.....	82
6.5 - Traçado dos canais de resfriamento do molde original do estudo de caso 2.....	83

6.6 - Desenho de conjunto dos canais para o estudo de caso 2.....	84
7.1 - Tempo de resfriamento para peça do estudo de caso 1..	88
7.2 - Distribuição de temperaturas nas paredes do macho....	90
7.3 - Distribuição de temperaturas nas paredes da fêmea....	91
7.4 - Distribuição do diferencial de temperatura entre a fêmea e o macho do molde.....	93
7.5 - Perda de carga nos canais de resfriamento.....	95
7.6 - Distribuição do diferencial de temperatura das paredes da cavidade do molde com o canal 1 desativado.....	96
7.7 - Tempo de resfriamento utilizando-se água a 16°C para a peça do estudo de caso 2.....	97
7.8 - Tempo de resfriamento utilizando-se água a 1°C para a peça do estudo de caso 2.....	98

RESUMO

No presente trabalho estudou-se as morfologias dos materiais termoplásticos, classificando estes materiais em amorfos e semi-cristalinos, dando ênfase às estruturas neste último quando do seu resfriamento em condições homogêneas e não homogêneas de temperatura. Levando em conta a temperatura do molde, foram levantados os possíveis defeitos oriundos da não homogeneidade da retirada de calor por parte do sistema de resfriamento.

Apresentou-se também as geometrias e recomendações de projeto, para canais de resfriamento utilizadas para proporcionar o resfriamento da peça no interior da cavidade do molde. Adicionalmente, é proposta uma metodologia baseada em soluções analíticas e descrito um procedimento para simulação, utilizando um software de CAE para resfriamento, utilizados para verificar a eficiência do traçado de circuitos de resfriamento em molde de injeção de termoplásticos.

ABSTRACT

This work presents a thermoplastics morphologies study, where the thermoplastics were classified in amorphous and semi-crystallines. An especial attention was given to semi-crystallines thermoplastics polymers structures, formed when cooled at homogeneous and non homogeneous conditions.

Some defects may be caused by the mold wall temperature non homogeneity. The most important defects originated are related too.

This work also describes the geometries and design recommendations for the cooling channels, used to perform an efficient cooling for the material into the cavity. A methodology based on analytical solution, and a simulation procedure for CAE software are proposed to evaluate the cooling circuits performance.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os polímeros termoplásticos vêm, nos últimos tempos ganhando campo na indústria substituindo outros materiais com algumas vantagens: menor custo, baixo peso e boa estabilidade química. Estas, bem como outras características específicas de cada um dos tipos de termoplásticos, promovem-lhes uma grande versatilidade no que diz respeito a sua utilização, que pode ir desde peças onde o que importa é somente a forma, não sendo exigido nenhum esforço funcional, até peças funcionais, ou de engenharia, como engrenagens.

Os termoplásticos podem ser moldados por diversos processos de transformação, sendo o processo de moldagem por injeção o mais empregado em nível mundial, devido à maior versatilidade no que diz respeito a formas e aplicações.

Basicamente, a moldagem por injeção se faz injetando o termoplástico sob alta pressão em uma cavidade de um molde que contém a pré-forma da peça a ser produzida. Contudo, apesar de parecer simples, a obtenção de peças de qualidade depende do

controle de inúmeros parâmetros ou condições de injeção, cujos valores, muitas vezes, estão situados em uma faixa estreita de tolerâncias. Adicionalmente, a construção dos moldes é algo complexo e não raro, sua elaboração inadequada se constitui numa importante causa de defeitos na peça que foi injetada.

Um molde pode ser considerado como uma ferramenta formada por um conjunto de três sistemas, quais sejam: injeção, extração e resfriamento.

O sistema de resfriamento, cuja função é a de retirar calor do material termoplástico, promovendo sua solidificação no interior da cavidade até que possa ser extraído, sem causar deformações na peça, exerce uma importância significativa na qualidade da peça a ser obtida. Segundo Thienel [1], um projeto incorreto do sistema de resfriamento pode ser a causa de, por exemplo:

- Um tempo de ciclo muito longo;
- Variações dimensionais na peça;
- Propriedades não uniformes da peça;
- Tensões internas elevadas e localmente diferenciadas;
- Peça com regiões apresentando diferenças de contrações e
- Baixa reprodutibilidade das peças injetadas.

Apesar desta importância, esta etapa de projeto do molde, ainda é, muitas vezes, realizada de forma empírica, baseada em experiência de casos [24]. Como justificativa para tal procedimento é apresentada, entre outras, a dificuldade de se

posicionar adequadamente os canais por onde deverá circular o fluido de resfriamento no molde, uma vez que estes devem se desviar de outros elementos constituintes do molde, como por exemplo, pinos extratores.

Mesmo com a disponibilidade de softwares de CAE (Computer Aided Engineering) destinados à área de moldes de injeção, cujo projeto do sistema de resfriamento pode ser simulado e avaliado antes mesmo da fabricação do molde, a situação de projetar baseado na experiência vivida prevalece. É verdade que estes softwares não fornecem automaticamente o traçado mais adequado para o sistema de resfriamento, mas sim, a partir de um traçado inicial estabelecido pelo projetista, o que torna o software dependente de uma certa prática em projeto de moldes por parte do usuário.

Assim, o uso de softwares de CAE para analisar o projeto do sistema de resfriamento envolve custos adicionais de software, hardware e profissional qualificado, o que tem sido considerado por muitos fabricantes de moldes como gastos desnecessários em função de um certo descaso que dão à importância de se efetuar o projeto do sistema de resfriamento de forma sistemática. Entretanto, informações como vazão de fluido de resfriamento e número de Reynolds, que podem ser obtidos de softwares CAE de resfriamento, são importantes não só para o desenvolvimento adequado do projeto do molde mas, principalmente, para o processamento adequado do polímero junto à máquina injetora [22,24].

1.1 - OBJETIVOS DO TRABALHO

Com base no exposto, o entendimento do comportamento do material termoplástico durante o processamento, sobretudo na etapa de resfriamento, e de técnicas que assegurem o projeto de um sistema de resfriamento que promova uma troca de calor homogênea e tão rápida quanto possível, como as empregadas pelos softwares de CAE, é um tema de pesquisa ainda a ser bastante explorado. As informações obtidas de estudos nesta área, quando apresentadas de forma organizada, poderão servir de base para facilitar o entendimento e estabelecer o grau de importância que o projetista de moldes deve dar ao projeto do sistema de resfriamento, e ao uso de ferramentas de CAE, quando o objetivo é assegurar uma peça de melhor qualidade.

Assim, o presente trabalho tem como objetivos:

1. Apresentar as principais influências do resfriamento sobre a morfologia do material termoplástico, como motivação da importância do resfriamento no processo de injeção, visando apresentar uma descrição dos principais conceitos relacionados a este assunto para facilitar a compreensão do fenômeno de resfriamento de peças de termoplástico moldadas por injeção.
2. Estudar o processo de moldagem por injeção, em especial as características de processamento junto à máquina injetora que

exercem influência no fenômeno de resfriamento, com o objetivo de mostrar os efeitos causados por um resfriamento não homogêneo em peças moldadas por injeção, enfatizando o tipo de estrutura formada ao longo da espessura da peça, bem como os possíveis defeitos oriundos da formação das referidas estruturas.

3. Fazer um levantamento, através de literatura e pesquisas de campo, sobre procedimentos utilizados no projeto de moldes, mais especificamente, os relativos ao projeto do sistema de resfriamento de moldes para injeção de termoplásticos, visando apresentar técnicas, geometrias e recomendações para se efetuar o referido projeto.
4. Pesquisar a respeito de métodos de cálculo existentes para dimensionar sistemas de resfriamento de moldes para peças de termoplásticos, visando elaborar e apresentar uma sistemática de cálculo para o caso de se empregar soluções analíticas e um procedimento de simulação e análise dos resultados, no caso de se empregar softwares de CAE.
5. Através de um estudo de caso, verificar a eficiência da solução analítica apresentada na sistemática proposta, comparando-a com os resultados da solução numérica, fornecidas por um software de CAE de resfriamento. Adicionalmente, em um outro estudo de caso, mostrar a

importância do uso de um software de CAE para resfriamento na fase de projeto de um molde, apresentando os resultados previstos para o comportamento deste após a realização de alterações geométricas ou de condições de processamento, fundamentadas nos conhecimentos adquiridos ao longo deste trabalho.

1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO

A fim de alcançar estes objetivos, este trabalho foi dividido em 8 Capítulos, sendo que o Capítulo 1 é composto por uma introdução ao assunto, apresentação dos objetivos e da estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a definição de material termoplástico, define propriedades, expõe conceitos e classifica-os quanto à morfologia. Nesta classificação, expõe-se os conceitos de materiais amorfos e semi-cristalinos, com suas diferenças estruturais e as propriedades específicas de cada um, além de definir as propriedades térmicas relevantes para o entendimento do fenômeno de resfriamento.

O Capítulo 3 trata do processamento dos polímeros. Este apresenta os parâmetros de injeção e suas influências na peça moldada, enfatizando a influência da temperatura das paredes da cavidade no processamento do material. Adicionalmente é

apresentado, neste Capítulo, o mecanismo de empenamento, oriundo de um resfriamento não homogêneo da peça.

O Capítulo 4 apresenta recomendações de projeto retiradas de manuais técnicos e de entrevistas com projetistas e profissionais da área. Apresenta também, as configurações mais usuais para os canais de resfriamento, bem como elementos e materiais empregados para retirar o calor de regiões do molde de difícil acesso pelos meios usuais.

No Capítulo 5 são apresentados métodos de cálculo para determinar a eficiência do sistema de resfriamento proposto pelo projetista. É apresentada também uma sistemática baseada em soluções analíticas para avaliar o sistema de resfriamento para peças mais simples. Adicionalmente é feita uma explanação geral sobre sistemas CAE de resfriamento, além de descrever o procedimento que deve ser feito para a realização de uma análise em CAE para resfriamento.

No Capítulo 6, por sua vez, são descritos dois estudos de caso. Em um faz-se uma análise comparativa entre uma solução analítica proposta e um método numérico, e em outro, é mostrado como o software de CAE pode ajudar o projetista a fazer a escolha do traçado mais apropriado para os canais de resfriamento.

Os resultados dos estudos de caso são então apresentados e discutidos no Capítulo 7.

Finalmente, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 8.

CAPÍTULO 2

MORFOLOGIA E PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS RELATIVOS AO FENÔMENO DE RESFRIAMENTO

Genericamente, entende-se por polímero termoplástico, um material que amolece com um aumento de temperatura e torna a endurecer com o resfriamento. Por definição, este processo pode se repetir muitas vezes [2], contudo esta repetibilidade é apenas teórica, pois ocorrem alterações nas propriedades do material causadas por mudanças químicas durante o processo de moldagem, tais como oxidação e degradação térmica [3]. O processo de resfriamento, conforme citado no capítulo 1, é responsável por alterações significativas na peça. Contudo, para sua melhor compreensão é preciso entender os conceitos apresentados a seguir.

A) Conceito de Temperatura de Transição Vítrea (T_g)

Como efeito de um resfriamento lento em um polímero, tem-se um decréscimo de sua agitação molecular. Continuando com este resfriamento, o decréscimo da temperatura faz com que a taxa de movimentos entre as moléculas diminua continuamente, até que

estes praticamente cessam. Então, o material polimérico se apresenta com uma ausência de movimentos moleculares. A este estado é dado o nome de *Estado Vítreo* [4]. A *Temperatura de Transição Vítreo* (T_g) pode ser definida como a temperatura abaixo da qual estes movimentos moleculares cessam. Abaixo desta temperatura, o material termoplástico se comporta como vidro, isto é, apresenta-se rígido, porém frágil [9]. A figura 2.1 mostra um gráfico da viscosidade em função da temperatura. Neste gráfico nota-se a temperatura a partir do qual o material termoplástico passa de um estado rígido, para um estado dúctil [23,41].

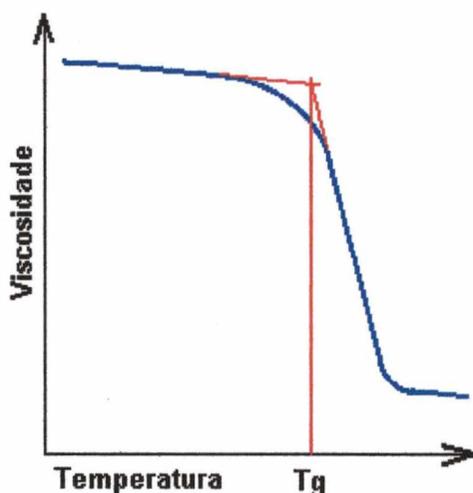


Figura 2.1 - Gráfico de temperatura x viscosidade onde é notada a temperatura de transição vítrea.

B) Conceito de Temperatura de Fusão Cristalina (T_m)

Em alguns tipos de materiais termoplásticos existe uma organização das cadeias moleculares quando o material se encontra no estado sólido, como será descrito mais adiante no item 2.1.2. Em função disto, pode-se definir como *temperatura de*

fusão cristalina (T_m), a temperatura acima da qual ocorre uma desorganização destas estruturas, permitindo o deslizamento entre as cadeias moleculares [4,23]. A figura 2.2 apresenta um gráfico de viscosidade e alongação em função da temperatura onde é possível notar o comportamento da viscosidade e alongação do material com a temperatura, bem como as regiões de temperatura onde ocorrem a T_g e a T_m .

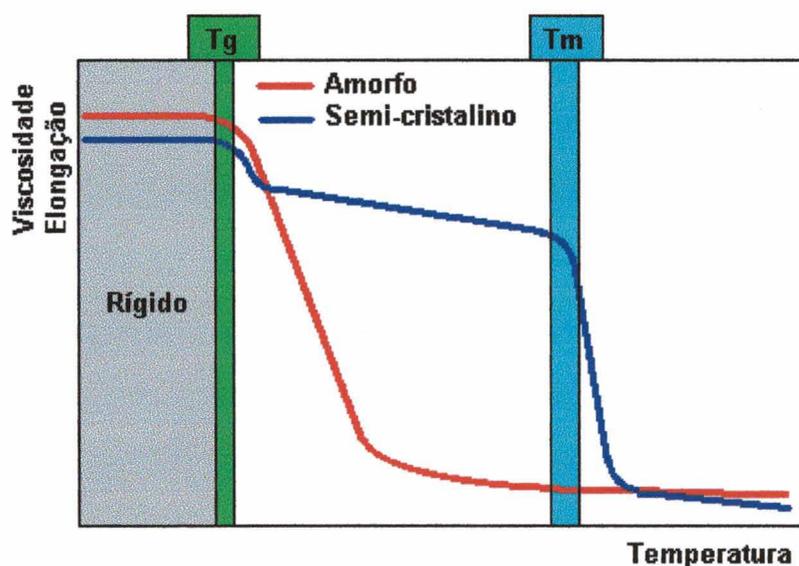


Figura 2.2 - Gráfico viscosidade e alongação x temperatura onde são mostradas as regiões onde ocorrem a T_g e a T_m .

2.1 - MORFOLOGIA DOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Os polímeros termoplásticos podem ser classificados quanto a sua morfologia em amorfos e semi-cristalinos [5,6,23].

2.1.1 - POLÍMEROS AMORFOS

Do ponto de vista morfológico, um polímero amorfo é descrito como uma estrutura não organizada, composta por moléculas enroladas e emaranhadas [6]. A uma temperatura superior a T_g , as vibrações de átomos vizinhos tornam-se mais cooperativas, resultando em movimentos de segmentos de cadeia [5]. Na temperatura T_g , a energia de ligação desses segmentos torna-se igual a energia térmica localizada. A frequência de movimentos dos segmentos é o suficiente para imprimir ao polímero uma ductilidade, mas não para causar um fluxo de material, com um nível de viscosidade tal que permita o processamento do polímero. Somente a 40 - 50°C acima da temperatura T_g é que os polímeros amorfos são considerados processáveis por escoamento, isto é, quando os escorregamentos entre as cadeias não resultam em níveis de tensão tão elevados [5]. Na figura 2.3 é esquematizada a estrutura morfológica de um material amorfo.

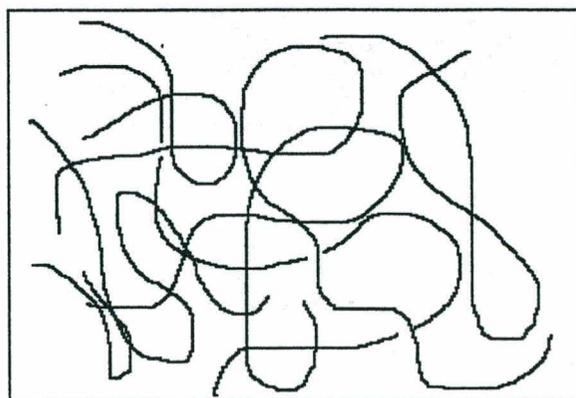


Figura 2.3 - Esquema da morfologia de um material amorfo [5].

A desordem da estrutura molecular nos polímeros amorfos tem como consequência a formação de vazios, que são estacionários abaixo da temperatura T_g , e móveis acima desta. Elevando-se a temperatura para níveis superiores a T_g , o papel dos vazios é fundamental, uma vez que são necessários para que ocorra a difusão dos segmentos. Isto é, os segmentos de polímeros deslocam-se para dentro dos vazios no processo de difusão e fluxo.

O polímero amorfo pode apresentar uma orientação das cadeias no estado vítreo. Esta orientação é gerada por deformação ou fluxo, acima da temperatura T_g , seguido de uma solidificação. Como no polímero amorfo as cadeias são praticamente imóveis abaixo da temperatura T_g , a orientação se mantém, determinando a anisotropia nas propriedades do material [5].

Assim, uma peça moldada a partir de um polímero amorfo (por exemplo, PS, PC, ABS, etc.), apresenta como características alta dureza e rigidez, transparência, pequena contração no molde, quando da sua solidificação [6], e uma baixa resistência ao impacto [2].

2.1.2 - POLÍMEROS SEMI-CRISTALINOS

Quando resfriados, os polímeros semi-cristalinos se caracterizam por tenderem a se organizar em estruturas lamelares. Contudo, algumas regiões permanecem em um estado

amorfo, resultando em um material com zonas organizadas dispersas em uma matriz de material amorfo, o que justifica denominar o polímero de semi-cristalino [7].

As lamelas resultantes da organização molecular do polímero cristalizável possuem características atribuídas a monocristais, como facetas regulares (vista ao microscópio eletrônico), e franjas de difração. Por isso a denominação de cristalino [5]. Estas pequenas estruturas lamelares recebem o nome de *cristalitos*. Na figura 2.4 é apresentada a micrografia eletrônica de um *cristalito* de polietileno.

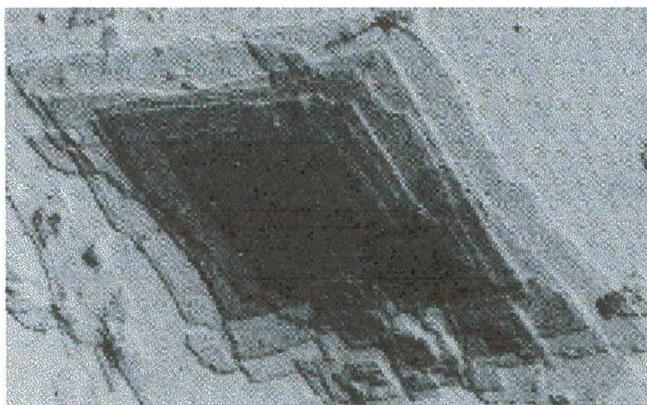


Figura 2.4 - Fotomicrografia de um *cristalito*.

2.1.2.1 - Os Esferulitos

Freqüentemente os *cristalitos* também costumam se organizar em agregados grandes. Um exemplo de tais agregados que se formam em condições de tensão mínima são de forma esférica ou aproximadamente esférica, crescendo radialmente a partir de um ponto de nucleação, denominados de *esferulitos* [4,10]. Esta estrutura, com um tamanho típico na ordem de 0.01 mm de

diâmetro, quando observadas sob luz polarizada, apresenta uma aparência de "Cruz de Malta", como mostrada na figura 2.5.

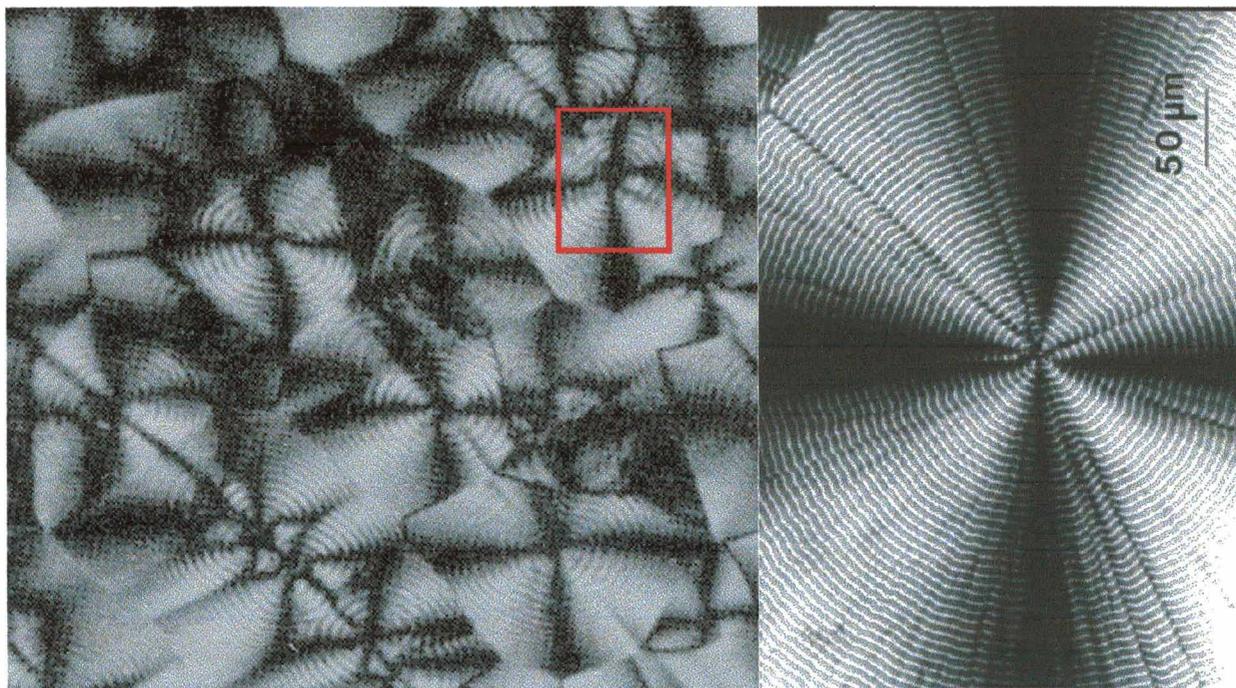


Figura 2.5 - Fotomicrografia de esferulitos de polietileno[10], e um esferulito em detalhe.

2.1.2.2 - Cristalização

Quando o polímero fundido é resfriado abaixo da temperatura de fusão cristalina, inicia-se o processo de cristalização a partir de nucleações, em diferentes regiões do material fundido. Se a temperatura for mantida constante, os *esferulitos* crescem a uma taxa constante, até encontrarem outros adjacentes. À medida que o *esferulito* vai crescendo, entre as lamelas (*cristalitos*), ficam aprisionadas porções de polímero no estado amorfo [4,10]. Esta primeira etapa é chamada de cristalização primária. As etapas descritas estão representadas na figura 2.6.

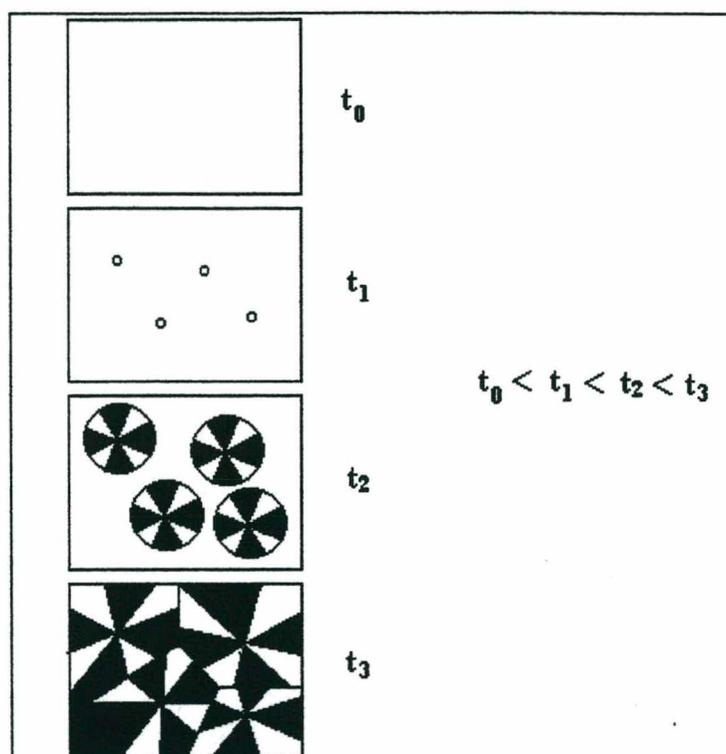


Figura 2.6 - Esquema de nucleação e crescimento de um *esferulito* ao longo do tempo (t_0 a t_3) [4].

Depois de cessada a cristalização primária, o polímero amorfo aprisionado entre os *cristalitos*, pode cristalizar, em uma etapa chamada de cristalização secundária [4].

Se os *esferulitos* forem excessivamente grandes, o polímero se torna frágil. Para evitar isto, podem-se adicionar agentes nucleantes ou aumentar a taxa de retirada de calor, diminuindo a temperatura do molde. Estes dois procedimentos resultam em maior número de nucleações. Como os *esferulitos* limitam seu crescimento em função do encontro com outros *esferulitos* adjacente [8], isto resultará em *esferulitos* menores.

2.1.2.3 - Cristalização Orientada

Segundo [13], a cristalização descrita na seção anterior é válida apenas quando o polímero não estiver sujeito a um fluxo, e for resfriado uniformemente. Em um processo de injeção, criam-se camadas cristalinas diferenciadas sob o aspecto microestrutural, uma vez que a cristalização ocorre a partir de um material fundido não uniformemente orientado, pressurizado e resfriado.

Conforme mostrado na figura 2.6, o processo de cristalização ocorre basicamente em duas etapas, nucleação e crescimento. Estas são afetadas pelas condições de temperatura, pressão, etc., devido aos fatores relacionados:

- O início da cristalização está relacionada diretamente à velocidade de resfriamento.
- A orientação do polímero exerce uma influência sobre a velocidade de nucleação.
- A velocidade de cristalização aumenta consideravelmente com a orientação das moléculas do fundido resfriado.
- O resfriamento necessário para induzir a cristalização é muito reduzido pela existência de fluxo, isto é, a temperatura de cristalização aumenta com a taxa de cisalhamento.
- O avanço da frente de cristalização faz-se da região externa (mais fria), para a região interna da peça (mais quente).

Estes fatores resultam na formação de estruturas cristalinas diferenciadas entre si, variando conforme as condições localizadas. Assim, segundo [13], uma orientação molecular acentuada, atuando em conjunto com uma rápida velocidade de resfriamento na periferia do molde, cria condições para a ocorrência de uma cristalização induzida pelo fluxo de polímero dentro da cavidade. Devido a grande orientação molecular o desenvolvimento de *esferulitos* é impedido, ocorrendo a formação de estruturas cristalinas fibrosas. Estas regiões atuam como núcleos de cristalização das cadeias não orientadas, formando uma estrutura denominada "*shish kebab*" [13].

Analisando as estruturas formadas desde a periferia de uma peça até o seu núcleo, nota-se que, à medida que se afasta da periferia em direção ao núcleo, a orientação torna-se menor, devido a um gradiente térmico menor. A cristalização em estruturas lamelares fica mais dispersa, ocorrendo a partir destas o crescimento de estruturas em camadas. Quando as lamelas centrais são curtas, as estruturas assumem a forma de *esferulitos* orientados. No centro da peça, como os gradientes térmicos são baixos, ocorre a formação de estrutura esferulítica normal. Esta mudança nas estruturas formadas podem ser vistas na figura 2.7, uma fotomicrografia de uma seção transversal de uma peça injetada em POM (Poli(Oxi-Metileno)) vista em microscópio óptico sob luz polarizada.

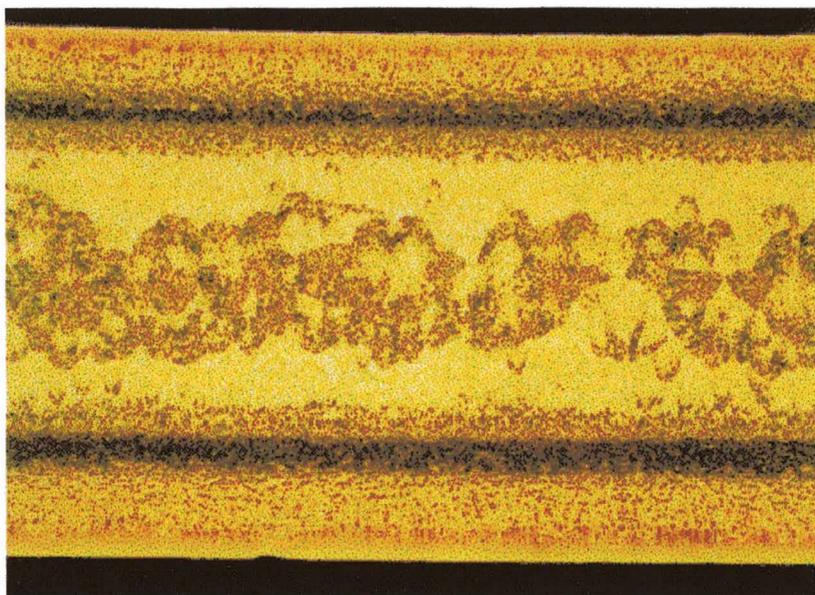


Figura 2.7 - Fotomicrografia de um corte transversal de uma peça injetada em POM.

Por vezes, em alguns polímeros com cristalização lenta, pode-se formar, na parte diretamente abaixo da parede da cavidade, uma camada de polímero amorfo [19]. Algumas vezes, dependendo das condições de processamento, pode-se apresentar até um núcleo amorfo, entre camadas de *esferulitos* orientados [19].

Como resultado tem-se a formação de uma estrutura em camadas, relativamente simétrica (para iguais condições de processamento em ambas as partes), o que influencia nas propriedades finais das peças moldadas [13].

2.1.2.4 - Grau de Cristalinidade

As propriedades dos polímeros semi-cristalinos dependem do seu grau de cristalinidade. Este, por sua vez, é dependente de características intrínsecas do material, como, por exemplo, o peso molecular, e de condições de processamento. Pode-se dizer,

de uma maneira geral, que um aumento da cristalinidade resulta em um aumento da densidade, temperatura de fusão, resistência mecânica, dureza, resistência a solventes e impermeabilidade a gases. A cristalinidade, devido às orientações moleculares, acaba por afetar a passagem de luz através do material e este por sua vez, apresenta-se então translúcido [7]. Pode-se aumentar a transparência de um polímero semi-cristalino ao tornar seus *esferulitos* suficientemente pequenos [9], utilizando os métodos descritos anteriormente.

2.2 - PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas dos polímeros termoplásticos possuem uma grande influência na amplitude dos gradientes térmicos que por sua vez, influenciam as estruturas formadas. Portanto, serão conceituadas as principais propriedades que exercem influência sobre estes gradientes.

2.2.1 - CALOR ESPECÍFICO (c_p)

Esta é uma propriedade termofísica definida como uma mudança isobárica da entalpia do polímero com a temperatura [11]. A capacidade térmica da maioria dos polímeros pode ser obtida a partir da descrição da entalpia.

Para polímeros termoplásticos semi-cristalinos este valor é totalmente dependente da temperatura aproximando-se de T_m , e exibe descontinuidade na T_m [11]. A figura 2.8 mostra a variação da entalpia com a temperatura para alguns polímeros.

Para polímeros termoplásticos amorfos, esta é fracamente dependente da temperatura. O calor específico sofre uma queda desprezível acima da T_g [11].

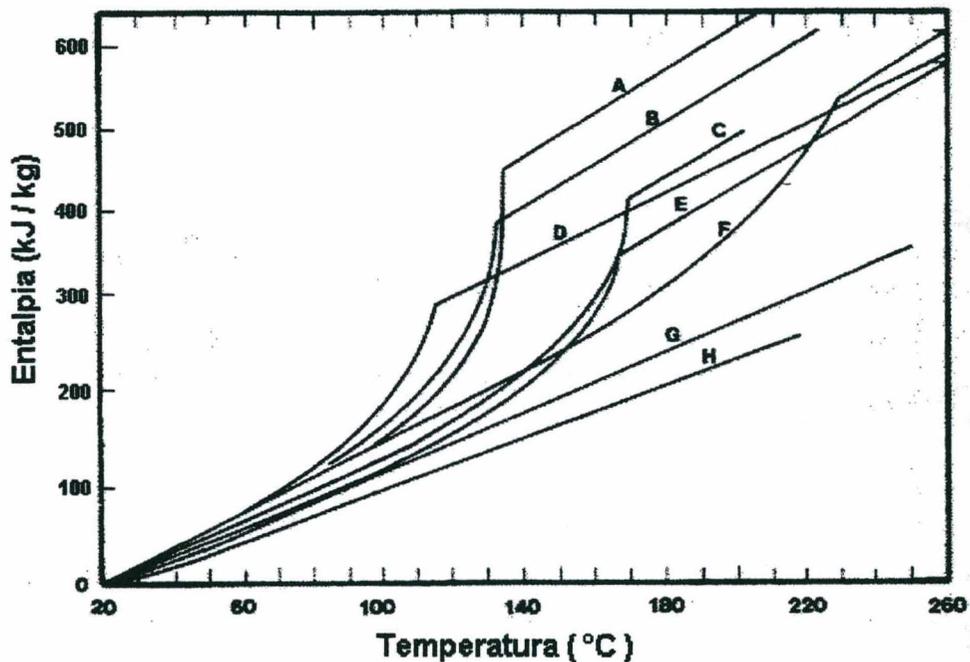


Figura 2.8 - Variação da entalpia com a temperatura para alguns polímeros. A:PEAD, B:PEMD, C:POM, D:PEBD, E:PP, F:PA-66, G:PS, H:PVC.

2.2.2 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k)

A condutividade térmica nos dá idéia da taxa de transferência de calor por condução de um determinado material.

Este valor é facilmente previsível para substâncias orgânicas simples. Para os polímeros termoplásticos, os efeitos do processamento no volume livre das moléculas e a ordenação molecular de semi-cristalinos, causam um desvio nos valores calculados experimentalmente. A condutividade térmica é uma das mais difíceis propriedades para se mensurar [11].

2.2.3 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α)

É a razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica por unidade de volume, sendo a última o produto do calor específico pela massa específica do material [41].

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO QUE INFLUENCIAM E SÃO INFLUENCIADAS PELO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

No processo de moldagem por injeção, o material solidificado em forma granulada ou em pó é aquecido até atingir uma temperatura na qual possa ser processado, quando então é forçado a entrar na cavidade do molde que se encontra a uma temperatura inferior à do material injetado, mantendo-se o molde fechado até que a peça atinja um grau de rigidez tal que seja possível a sua extração [13,36]. Depois da peça retirada, o molde se fecha e o ciclo é reiniciado. Por esta razão, considera-se o processo de injeção como um processo cíclico onde se alternam etapas em uma seqüência programada [13].

O tempo total, necessário para se realizar o ciclo de injeção, chamado tempo de ciclo [35], é a soma dos tempos requeridos por cada uma das etapas. As parcelas de tempo envolvidos em cada etapa do processo em uma peça típica estão representados na figura 3.1. Convém salientar que a parcela

respectiva ao resfriamento é consideravelmente maior que as demais [16,36]. Portanto, qualquer redução nesta parcela de tempo refletirá significativamente no tempo de ciclo.

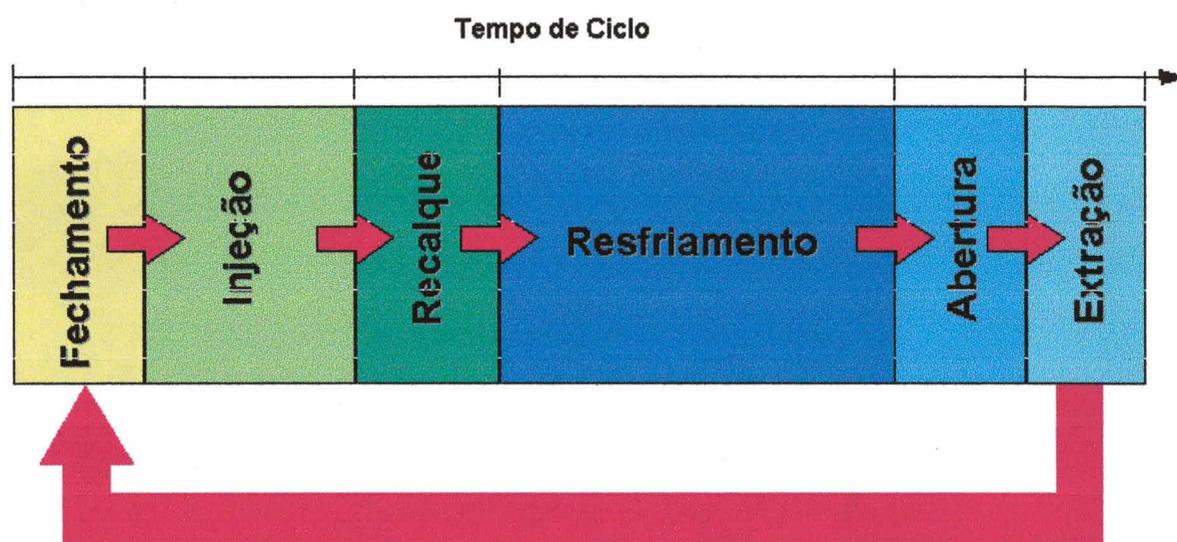


Figura 3.1 - Distribuição dos tempos de cada etapa no tempo total de ciclo.

3.1 - PARÂMETROS DE INJEÇÃO

Para obterem-se peças de boa qualidade, com determinadas propriedades, e em um menor tempo de ciclo, reduzindo-se a etapa de resfriamento, é essencial selecionar adequadamente as condições de processamento, ou seja os parâmetros de injeção compatíveis com o polímero e essas propriedades.

Contudo, esta tarefa não é tão simples, uma vez que a obtenção de uma peça de boa qualidade depende do ajuste de um conjunto de parâmetros de injeção.

Para melhor compreender tal situação é preciso entender a relação que existe entre os parâmetros de injeção e o fenômeno de resfriamento.

Durante a injeção, devido ao fato das paredes da cavidade estarem a uma temperatura menor que a do fundido, uma camada de material termoplástico solidifica ao entrar em contato com as paredes da cavidade. Devido a características de escoamento oriundas deste fenômeno a frente de fluxo desenvolve uma geometria denominada escoamento em fonte¹ ou em chafariz [13,17]. Esta geometria tem por característica o escoamento do material pela parte central e a solidificação brusca do mesmo junto às paredes da cavidade, proporcionando a formação do que é denominado de **camada solidificada** (figura 3.2).

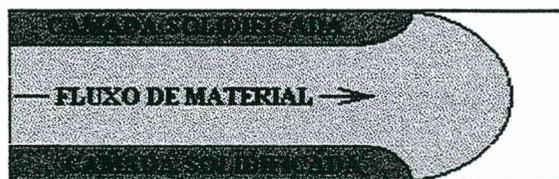


Figura 3.2 - Formação da camada solidificada e escoamento em fonte ou em chafariz

Além da camada solidificada existe uma outra camada que se forma durante o resfriamento denominada de **casca**², que se forma em polímeros semi-cristalinos correspondendo a uma espessura que vai desde a parede da cavidade até a região de maior taxa de

¹ Para melhor compreensão deste fenômeno é indicado a leitura do trabalho de D'Ávila [17] e Brito [13].

² Esta estrutura é também chamada de pele ou camada superficial e é melhor descrita em [13]

cisalhamento³. Esta camada se caracteriza por apresentar uma cristalização altamente orientada na direção do fluxo do material polimérico, induzida pelo mesmo [17], sendo responsável por alterações nas propriedades mecânicas de peças injetadas.

Mudanças nas condições de processamento podem implicar em alterações tanto na espessura da camada solidificada quanto na da casca, originando cristalização diferenciada (no caso dos semi-cristalinos), criação de tensões residuais internas, empenamento, etc., que acabam se refletindo como defeitos na peça final. Adicionalmente, pode-se ter um tempo de ciclo mais longo que o realmente necessário, refletindo em maior custo para as peças injetadas.

Dentre os parâmetros de injeção, a **Vazão Volumétrica**, a **Temperatura de Injeção** e a **Temperatura do Molde** são os mais relevantes no que diz respeito ao resfriamento da peça, influenciando no processo de formação da camada solidificada e da casca.

3.1.1 - VAZÃO VOLUMÉTRICA

Esta variável mantém uma relação estreita com a espessura da camada solidificada nos materiais injetados. Com um aumento da vazão, devido à maior geração de calor por dissipação viscosa [14], a espessura da camada solidificada diminui. Apesar desta redução da camada solidificada favorecer a retirada de calor, o

³ Taxa de cisalhamento é a diferença de velocidade entre as camadas de material (dv/dy) [17].

material que flui pela parte central sofre um aumento de temperatura o que significa mais calor a ser retirado pelo sistema de resfriamento.

3.1.2 - TEMPERATURA DE INJEÇÃO

É a temperatura do material na saída do bico de injeção da máquina, ou seja, a temperatura que o material entra no molde, cujo valor depende das propriedades e características de cada material. Para os amorfos está muito acima da T_g [5], e para os semi-cristalinos, acima da T_m .

A temperatura de injeção também exerce influência na espessura da camada solidificada, ou seja, quanto maior, menor será a camada solidificada formada.

3.1.3 - TEMPERATURA DO MOLDE

Entende-se por temperatura do molde como sendo a temperatura média nas paredes da cavidade do molde. Esta temperatura também exerce influência sobre as propriedades da peça injetada. Quanto maior for a temperatura do molde, menor será a espessura da camada solidificada [14] e da casca [21,39]. Na figura 3.3 são mostradas fotomicrografias de seções transversais de peças injetadas em PP (Polipropileno), com diferentes temperaturas de molde. Repara-se a diferença entre as espessuras de casca para várias temperaturas de molde. A camada mais esbranquiçada,

representada na figura, representa a parcela respectiva a casca. Já a parte mais escura representa o núcleo da peça.

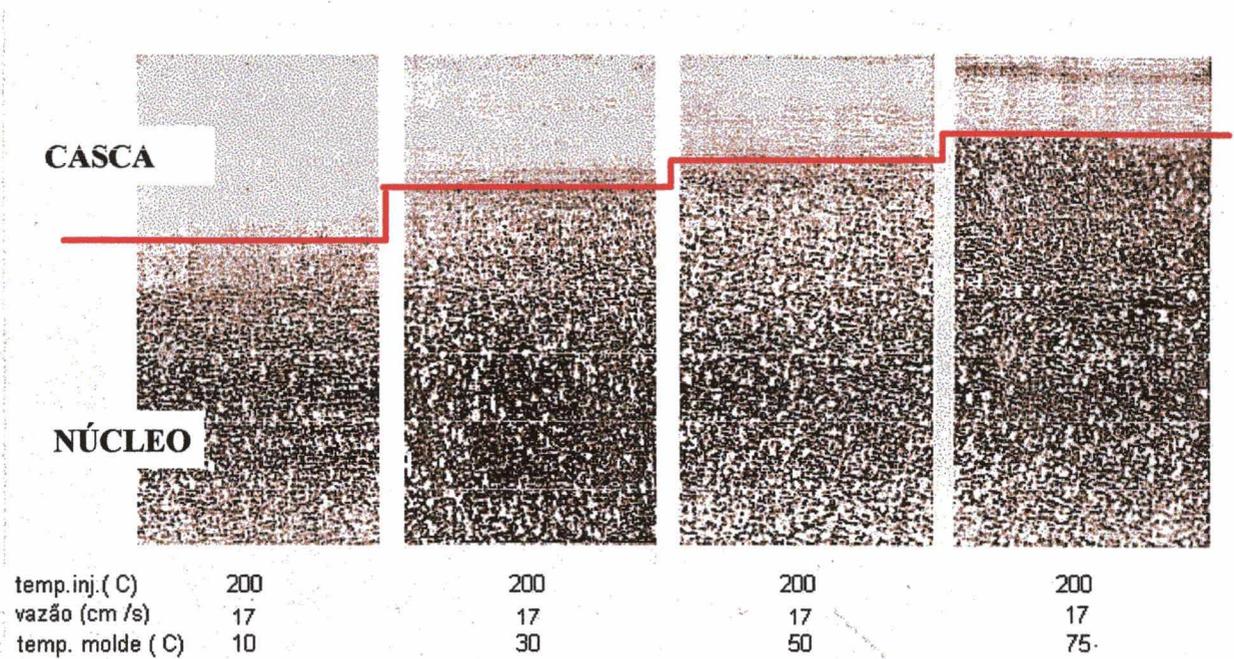


Figura 3.3 - Cortes transversais em peças injetadas em PP, demonstrando a variação da espessura da casca em função da temperatura do molde [21].

Este aumento da temperatura do molde acarreta em diminuição das tensões internas, minimização das linhas de solda, deixa a superfície da peça com um aspecto mais brilhante [16,43] e, em materiais semi-cristalinos, promove uma cristalização mais uniforme. O grau de cristalinidade cai bruscamente com o decréscimo da temperatura do molde. Mas a alta temperatura do molde implica em um aumento no tempo de ciclo, pois como visto anteriormente, a etapa de resfriamento é a responsável pela maior parcela do tempo de ciclo.

Os fabricantes dos materiais termoplásticos geralmente especificam uma faixa ótima de temperatura do molde (além de

outras grandezas), para os seus produtos como, por exemplo, as faixas de temperatura mostradas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Temperaturas de molde recomendadas para diferentes termoplásticos.

TERMOPLÁSTICO	TEMPERATURA DO MOLDE (°C)
PC + ABS	70 - 100
PA 6.6 PA 6	70 - 90
PP	20 - 60
PC	80 - 100
PEAD	20 - 60
PET	130 - 140
ABS	60 - 80

As temperaturas médias do molde devem ser estabelecidas e mantidas tão constantes quanto possíveis, garantindo assim uma homogeneidade na peça.

Esbarra-se, então, no problema de que a temperatura do molde não é constante durante o ciclo de injeção, estando sujeita a flutuações com o tempo, devido à entrada do material termoplástico na cavidade [43]. A flutuação é periódica, e sua origem deve-se a fatores físicos, como a condutividade térmica e o calor específico do material do molde, e do material a ser injetado, etc., sendo que o sistema de resfriamento, não exerce influência na amplitude destas flutuações [43]. A flutuação da temperatura do molde está ilustrada na figura 3.4. Inicialmente, a temperatura do molde encontra-se em um valor $T_{w\min}$. Quando o material é injetado e entra em contato com a parede da cavidade, que está fria, a temperatura da parede eleva-se para $T_{w\max}$ momentaneamente, e então começa a decrescer. No instante em que a peça é desmoldada, as paredes da cavidade estão a uma

temperatura T_{wE} , decrescendo rapidamente até a temperatura T_{wmin} , recomeçando o ciclo [43].

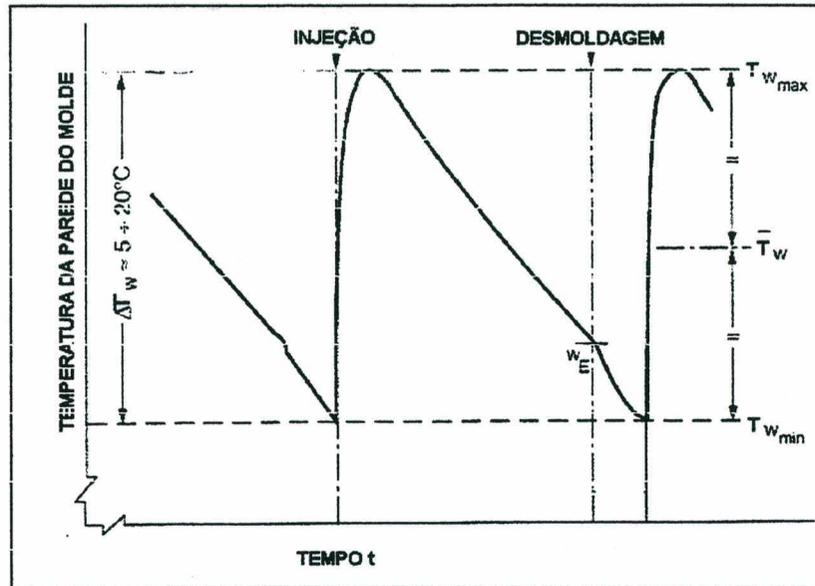


Figura 3.4 - Variação da temperatura da superfície da cavidade durante o ciclo de injeção.

A temperatura T_{wmax} é função da Permeabilidade Térmica (b) do material do molde e do material, descrita por

$$b = \sqrt{\rho \cdot k \cdot c_p} \quad (3.1)$$

A temperatura máxima do molde durante o ciclo pode ser descrita então como sendo,

$$T_{wmax} = \frac{b_w \cdot T_{wmin} + b_m \cdot T_m}{b_w + b_m} \quad (3.2)$$

Onde: ρ = densidade do material injetado [kg/m^3]

b_w = permeabilidade térmica do material do molde

b_m = permeabilidade térmica do material injetado

T_m = temperatura do fundido [$^{\circ}\text{C}$]

A temperatura $T_{w \max}$ está nas vizinhanças de $T_{w \min}$. A diferença de temperaturas se deve em grande parte ao material do molde. Para um material com permeabilidade térmica maior, a diferença entre as temperaturas decresce.

Então para um molde construído com um material de baixa permeabilidade térmica, com postigos de um material com alta permeabilidade, o pico de temperatura será maior que em um de baixa, dando condições ao material termoplástico de ter uma solidificação mais lenta localmente. Com isso, pode-se dizer que a temperatura $T_{w \max}$ tem uma importância decisiva na obtenção de peças de qualidade [43].

Para fins de cálculo de tempo de ciclo e outros fatores dependentes da temperatura do molde, a temperatura a ser considerada deve ser uma média entre as temperaturas máxima e mínima do molde [43], então,

$$\bar{T}_w = \frac{T_{wmax} - T_{wmin}}{2} \quad (3.3)$$

Como a temperatura do molde, é uma média das temperaturas das paredes do molde, para garantir uma boa qualidade da peça moldada, o diferencial de temperatura nas paredes do molde ΔT deve ser o mínimo possível, para que haja uma retirada de calor uniforme do material [39]. A retirada de calor uniforme é de grande importância para se conseguir propriedades constantes ao longo da peça moldada [22].

3.2 - TENSÕES INTERNAS ORIGINÁRIAS DO RESFRIAMENTO

Tensões internas surgem quando o material termoplástico não é resfriado homoganeamente. A dependência das propriedades elásticas (módulo de Young) com a temperatura acaba convertendo as tensões que agem temporariamente, somente durante o resfriamento, em tensões residuais que continuam após o resfriamento ter sido completado [12].

Com o intuito de melhor compreender o fenômeno, [12] Struik analisou o resfriamento de uma placa de comprimento infinito, com espessura de $2L$. O resfriamento é realizado, simetricamente, de uma temperatura de 100°C , até uma temperatura final de 20°C .

Para representar a não homogeneidade, considera-se a placa sendo resfriada em 2 etapas. Estas duas etapas estão representadas na figura 3.5(a).

Em um tempo t_1 , a temperatura da periferia é reduzida de 100°C para 20°C , sendo que o núcleo continua à temperatura inicial. Já, em um tempo t_2 , o núcleo também tem sua temperatura reduzida para 20°C .

Inicialmente considera-se que o material está livre de tensões. Em uma primeira etapa, a casca contrai. Conseqüentemente, uma tensão de compressão surge no núcleo e uma de tração na periferia, como representado na figura 3.5(a) em linha tracejada.

Já, em uma segunda etapa, acontece o inverso, o núcleo contrai e as tensões tenderiam a se neutralizar, se não fosse o fato de as propriedades elásticas serem dependentes da temperatura. Para essa diferença de temperatura, pode-se ter o módulo de Young variando de 100 (a 100°C) até 1000 (a 20°C). Este exemplo é válido para materiais como o PVC cuja T_g é de 80°C (entre 100°C e 20°C). Este mecanismo explica a origem de tensões internas em polímeros amorfos, e semi-cristalinos com alta T_g . A figura 3.5(a) mostra o comportamento de um material idealizado com propriedades elásticas constantes e a figura 3.5(b) o comportamento de um polímero real.

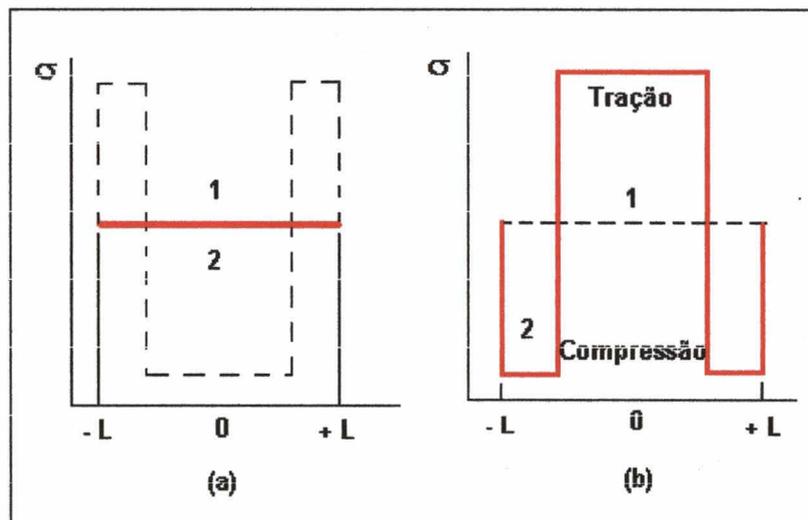


Figura 3.5 - Gráficos representativos do comportamento das tensões internas em (a) um material com propriedades elásticas constantes e (b) um polímero real.

As tensões internas convertem-se em deformações muito mais facilmente em polímeros semi-cristalinos que em amorfos, pois estes se encontram sempre acima da T_g , e, conseqüentemente, são

mais rígidos. Estas deformações, ou empenamentos, serão descritas a seguir.

3.2.1 - MECANISMO DE EMPENAMENTO

Segundo [15,37], as causas de empenamento são explicadas por contrações diferenciais ao longo da espessura da peça moldada, sendo de três tipos básicos:

a) Contração de Área: Esta é função das variações locais na cristalização, no caso de semi-cristalinos e contração por temperatura no caso de amorfos. Como descrito anteriormente, surgem tensões de compressão na casca e de tração no núcleo, como ilustrado na figura 3.6.

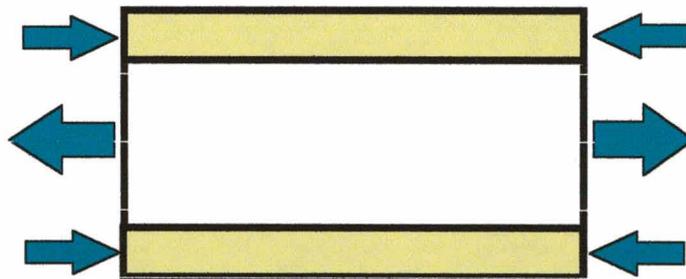


Figura 3.6 - Contração de área.

Este tipo de tensões gera deformações como as apresentadas na figura 3.7.

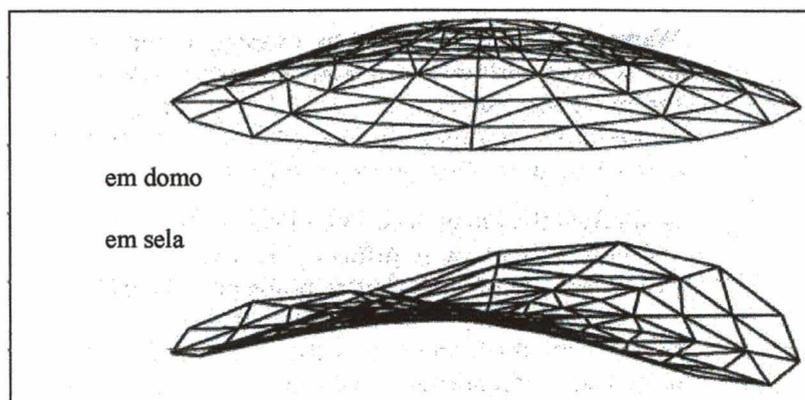


Figura 3.7 - Deformações por contração de área [15].

b) Contração da Seção Transversal: Causada por disposição inadequada ou ineficiência do sistema de refrigeração. Existindo um diferencial de temperatura entre o topo e a base da cavidade (entre as paredes do macho e a fêmea do molde) a casca se forma mais espessa na superfície mais fria e mais fina na mais quente. Isto faz surgir um momento fletor na peça, ao longo da seção transversal, conforme ilustrado na figura 3.8.

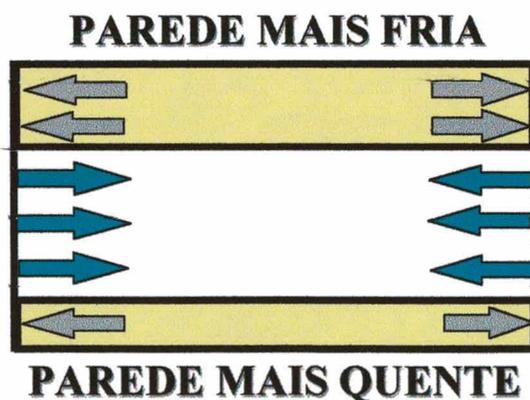


Figura 3.8 - Empenamento por contração da seção transversal

c) Variação da Contração Direcional: Causada por diferenças nas contrações paralelas e perpendiculares ao caminho de fluxo (caminho percorrido pelo material durante sua injeção na cavidade), no momento da solidificação.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

No decorrer da etapa de projeto de um molde de injeção de termoplásticos existem muitas decisões a serem tomadas sobre a disposição de todos os elementos constituintes deste molde. Para tanto, é necessário um estudo minucioso capaz de prever o funcionamento de cada elemento do molde.

Normalmente, o projeto inicia-se a partir de um desenho da peça, visando determinar a posição da cavidade e, se a peça possuir uma geometria que não permita sua extração simples, a posição dos elementos móveis. Já é determinada também a posição da linha de fechamento do molde.

Uma vez cumprida estas etapas, dispõem-se os sistemas de alimentação, extração e resfriamento no molde. Na teoria, esta disposição pode ser feita de maneira simultânea, mas na prática, não é possível, sendo seguida a ordem referida. O ponto de injeção está relacionado diretamente com a qualidade da peça. Desta maneira, o projetista buscará uma solução onde a injeção

proporcione um bom preenchimento da cavidade e a marca de injeção fique menos visível. O sistema de extração também pode gerar marcas na peça. Por isso precisa ser estudado de forma a evitar que fiquem marcas aparentes em uma superfície funcional e, ao mesmo tempo, promova a extração da peça sem danificá-la. O espaço restante acaba sendo utilizado para a implantação do sistema de resfriamento. As soluções adotadas aqui, por parte do projetista, na maioria das vezes, são oriundas de conhecimentos adquiridos ao longo dos anos e catalogados como soluções possíveis para casos semelhantes [26-31,34]. As recomendações orientam o traçado dos canais de resfriamento e dão noção dos diâmetros a serem utilizados.

4.1 - FORMA DOS CANAIS DE RESFRIAMENTO

Existe uma grande diferença entre formas ótimas e factíveis. Alguns traçados podem ser ótimos do ponto de vista de resfriamento, mas não atendem aos esforços estruturais aos quais o molde está sujeito, uma vez que as pressões de injeção utilizadas no processo de moldagem por injeção são da ordem de 20 Mpa [14].

Em uma peça plana, segundo Glastrow e Bernhardt [24,43], poderia se pensar em um resfriamento utilizando uma geometria de canal como a mostrada na figura 4.1. Mas, devido às pressões envolvidas no processo de injeção do termoplástico, a cavidade

pode vir a se deformar pela falta de rigidez do molde em direção ao canal de resfriamento, ou até mesmo, em um caso mais crítico, o molde pode ficar danificado.

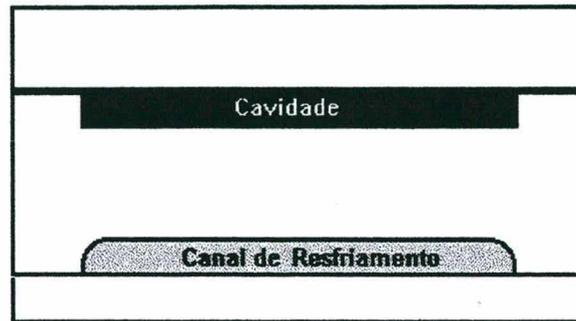


Figura 4.1 - Forma ideal de canal de resfriamento.

Outra possibilidade não tão comprometedora para o desempenho estrutural implica na usinagem de canais de seção retangular no postigo, obtendo-se a forma de canal ilustrado na figura 4.2 [24,43].

Esta forma favorece a retirada de calor da peça injetada e não compromete a resistência durante o trabalho do molde. Contudo, é de difícil usinagem e não se adota frequentemente por questões de custo.

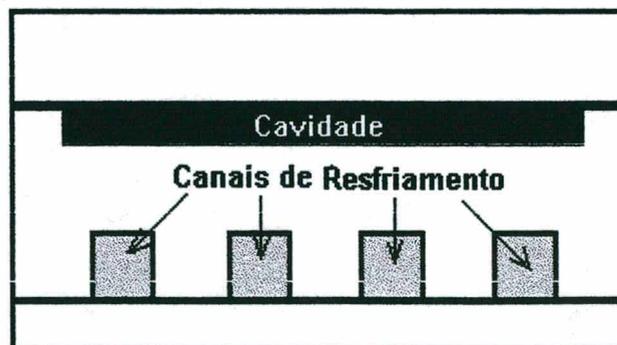


Figura 4.2 - Forma possível de canais de resfriamento.

A solução mais usual é a confecção de furos cilíndricos como mostrado na figura 4.3, facilmente usináveis, mesmo não sendo a melhor solução no que diz respeito à troca de calor.

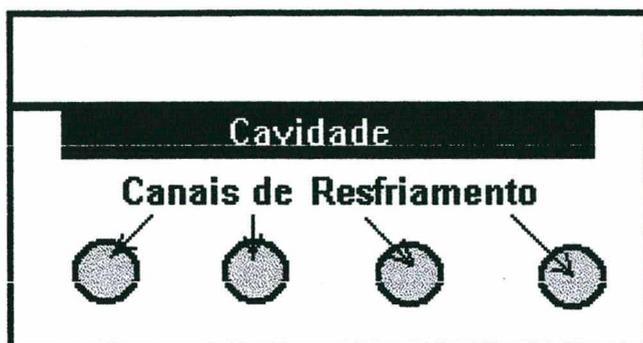


Figura 4.3 - Forma mais usual de canais de resfriamento

Os furos que darão origem aos canais não deverão ter diâmetros muito grandes. Os diâmetros grandes promovem uma retirada de calor não uniforme, além de necessitarem de grandes vazões de fluido de resfriamento para se estabelecer um escoamento turbulento. Então a preferência é dada a furos de diâmetro menor e em maior número [28].

Literaturas técnicas [22,24,28] fornecem os valores mais usuais para os diâmetros dos canais de resfriamento, que são selecionados levando em conta a espessura da peça a ser resfriada, conforme exemplifica a tabela 4.1 [24].

Tabela 4.1 - Diâmetros para os furos dos canais de resfriamento

Espessura da peça	Diâmetro do canal
até 2 mm	8 a 10 mm
2 a 4 mm	10 a 12 mm
4 a 6 mm	12 a 15 mm

4.2 - TRAÇADO DOS CANAIS DE RESFRIAMENTO

O traçado dos canais de resfriamento depende diretamente da disposição dos demais elementos constituintes do molde. O projetista deve desviar os canais de elementos móveis, extratores, furos, e de uma série de outros obstáculos que poderão existir, e mesmo assim promover uma eficiente retirada de calor da peça plástica. Para isso, são utilizadas recomendações de posicionamento dos canais de resfriamento dentro do molde.

Existem recomendações que tratam do distanciamento entre os canais e as paredes da cavidade, que variam um pouco de literatura para literatura. Segundo Menges [22], recomenda-se que a distância entre o centro do canal e a parede da cavidade seja de 2 a 5 diâmetros. Aumentando a distância entre os canais de resfriamento e a parede da cavidade, reduz-se a eficiência do resfriamento [28]. Já, para a distância entre os canais de resfriamento, o valor recomendado por [22,24] é de 4 diâmetros.

Com estas distâncias recomendadas, espera-se que o diferencial de temperaturas na parede da cavidade do molde seja menor, evitando-se defeitos oriundos da retirada de calor localizada, ou de pontos quentes. Isto vale para superfícies planas, ou por onde se possa passar os canais.

Na prática, deve-se prever a construção dos canais levando em consideração os furos que deverão ser feitos para se alcançar o traçado do circuito. Muitas vezes parte-se de uma rede de

furos e, obstruindo esta rede em alguns pontos, chega-se ao traçado desejado para o circuito.

O problema de espaço não se refere somente aos canais, mas à rede de furos que os originam, tendo que levar isto em consideração.

Ainda quanto ao traçado do circuito, existem outras recomendações que devem ser consideradas, a fim de se obter uma peça plástica de qualidade, tais como:

- É imprescindível que, ao invés de um grande circuito de resfriamento, exista uma série de pequenos circuitos [27]. O diferencial de temperatura do fluido refrigerante entre a entrada e a saída de um circuito de resfriamento deve ser o menor possível, e não exceder os 5°C [22]. O diferencial recomendado por Bernhart [25] é de $2,8^{\circ}\text{C}$ (5°F), já Rees [44] considera tolerável até 10°C .
- Em uma peça que tenha uma certa simetria, é recomendado que se divida os circuitos em duas partes simétricas. Isto promove uma retirada de calor uniforme dos dois lados da peça.
- O fluxo do fluido refrigerante deve, tanto quanto possível, seguir o fluxo do material plástico, isto é, a entrada dos canais de resfriamento deve se dar próximo ao ponto de injeção, e seguir para a periferia da peça [28]. O fluxo de fluido refrigerante em concordância com o fluxo de material termoplástico na cavidade é menos eficiente do ponto de vista de retirada de calor, mas proporciona a obtenção de peças de melhor qualidade.

- Em casos de peças que apresentem paredes altas, é recomendado se fazer um canal separado para cada parede. Se não for possível, pelo menos circuitos diferentes para paredes verticais e horizontais [26].
- No projeto de canais de resfriamento das duas partes do molde (macho e fêmea), estes devem encontrar-se dispostos transversalmente entre si. Isto promove uma retirada de calor mais uniforme e a não formação de regiões extremamente refrigeradas.
- Os elementos móveis devem ser refrigerados separadamente para que não haja um aquecimento excessivo destes [29].
- Usar diâmetros constantes em cada um dos canais de resfriamento para manter um número de Reynolds constante [29].
- Deve-se ter canais de resfriamento separados para os canais do sistema de alimentação [26].
- Se o molde possuir um sistema de alimentação por bicos quentes, deve existir um sistema de resfriamento em oposição ao ataque deste na peça [26].

4.3 GEOMETRIAS ESPECIAIS PARA CANAIS DE RESFRIAMENTO

Nem todas as peças podem ser resfriadas com canais como os apresentados anteriormente. Nestes casos, é necessário ter-se soluções que permitam a retirada de calor em regiões de difícil acesso por canais comuns. Estes casos requerem geometrias

especiais de canais que, na prática, já são consagradas. A escolha de qual solução usar para cada caso é uma decisão que requer um conhecimento de projeto, fabricação e custos.

Um caso onde o resfriamento por canais oriundos de uma rede de furos seria bastante complexo é por exemplo, o resfriamento de uma peça profunda, como um balde.

Geralmente, em peças cilíndricas, para facilitar a usinagem, o molde é feito a partir de postigos torneados. Desta maneira é possível obter uma boa eficiência no resfriamento da parte fêmea do molde, como por exemplo, através da usinagem de um rasgo helicoidal na parte externa do postigo, como ilustrado na figura 4.4, promovendo uma boa retirada de calor e com uma resistência mecânica satisfatória. Deve-se tomar cuidado com as dimensões do rasgo, mantendo a mesma área da seção transversal das outras partes do circuito, para que não haja uma desaceleração do fluido de resfriamento, quando da sua entrada nesta parte do circuito.

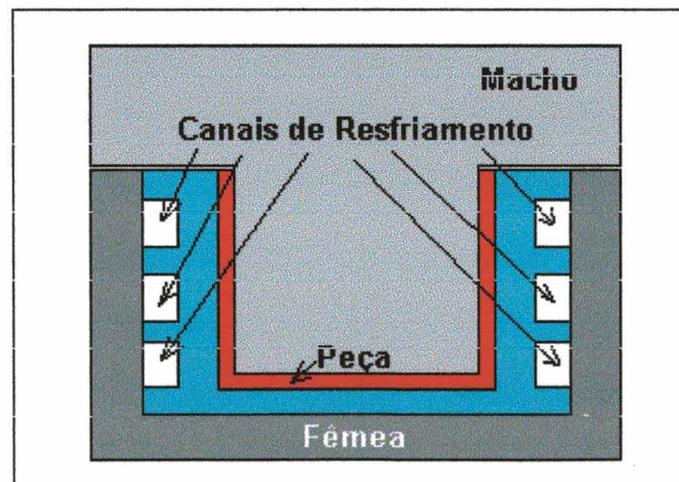


Figura 4.4 - Resfriamento externo em um postigo redondo.

Para a parte interna, já não é tão simples. Serão mostradas algumas alternativas de canais de resfriamento utilizadas para retirar calor de partes profundas, ou de difícil acesso pelos meios usuais de resfriamento.

4.3.1 - POSTIÇOS INTERNOS

Quando o local a se retirar calor for cilíndrico, pode-se recorrer a postiços colocados internamente ao macho, com a mesma geometria do descrito para a parte externa, ou seja, um rasgo helicoidal em um cilindro, colocado no interior do macho, como mostrado na figura 4.5.

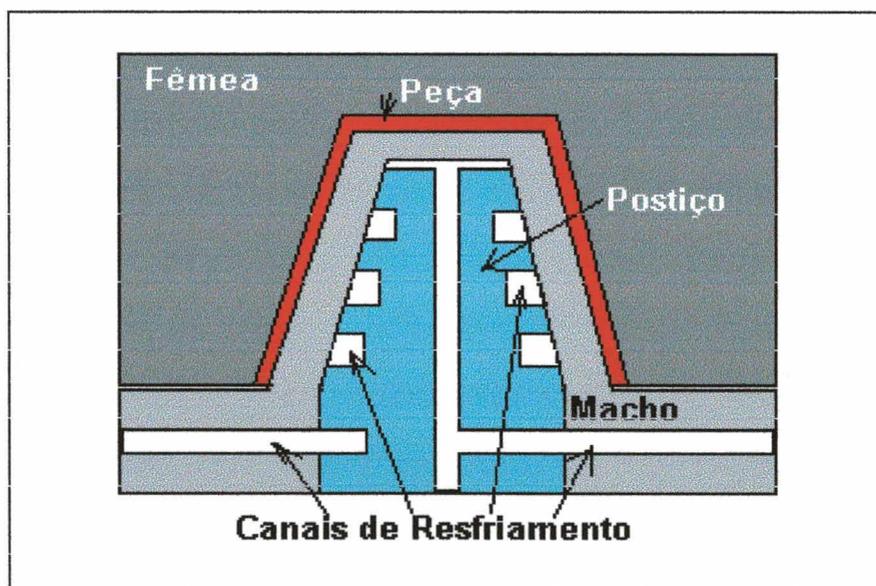


Figura 4.5 - Postiços de resfriamento para o macho.

4.3.2 - DEFLETORES

São constituídos de um furo cego, onde é colocada uma palheta, ou seja, uma lâmina que separa este furo em duas cavidades, unindo-as somente por uma passagem no final do furo, como ilustrado na figura 4.6 [34]. Esta lâmina não necessariamente é reta, podendo ser construída em forma de hélice, o que melhora a troca de calor [33].

Possui uma construção simples e requer somente um canal de fluido refrigerante, o que permite colocar vários defletores em série.

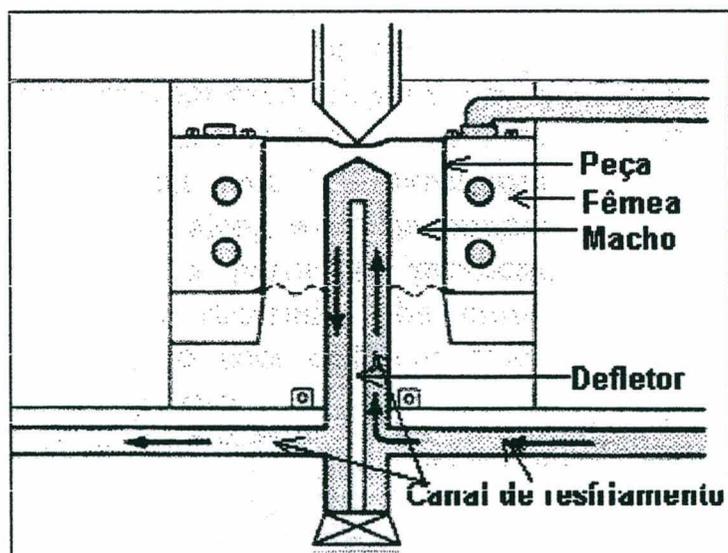


Figura 4.6- Esquema do funcionamento de um defletor

Os defletores apresentam limitantes quanto as suas dimensões, ou seja, são limitados pelos diâmetros dos furos e suas profundidades [27]. Em função do fluido estar em contato com o molde na subida, quando chega ao ponto mais crítico, que é

o superior, a água já se encontra aquecida, no caso de furos longos, e um diâmetro muito pequeno restringe a vazão.

4.3.3 - CASCATAS

Para casos de furos mais profundos recomenda-se a utilização de cascatas, cujo esquema de funcionamento é mostrado na figura 4.7. Consistem de um furo cego, com um tubo metálico concêntrico em seu interior. Este tubo, alimentado por um canal de resfriamento, conduz o fluido refrigerante até o ponto mais profundo do furo, onde transborda, escoando pela cavidade gerada entre a parte externa do tubo e a interna do furo [34].

Na maioria das vezes, as cascatas respeitam o sentido do fluxo do material.

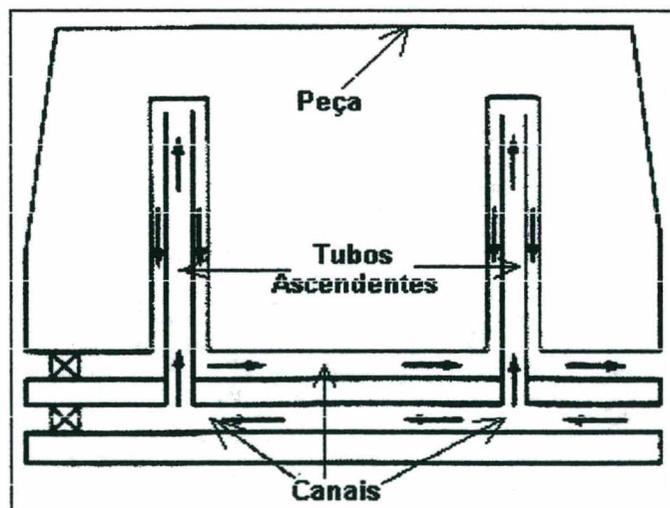


Figura 4.7 - Esquema do funcionamento de uma cascata.

Como a alimentação do fluido refrigerante é feita por um canal, e a retirada, é feita por outro, o circuito se torna

paralelo, não havendo a passagem de fluido refrigerante por várias cascatas.

A construção das cascatas é mais complexa, por isso seu custo é mais elevado e esta solução é usada apenas quando necessário.

Existem também elementos normalizados [30], que possuem o princípio de funcionamento das cascatas. São conhecidos como sistemas de agulhas, e conseguem alcançar profundidades grandes com diâmetros de canal de até 1 mm. A alimentação pode ser tanto paralela como em série.

4.4 - OUTRAS FORMAS DE RESFRIAMENTO

Além dos canais, que refrigeram o molde levando diretamente o fluido de resfriamento até as zonas mais quentes, pode-se promover a retirada de calor, utilizando materiais e/ou elementos de melhor condutividade térmica, como os apresentados a seguir.

4.4.1 - PINOS TÉRMICOS (TUBOS DE CALOR)

O pino térmico, apresentado esquematicamente na figura 4.8, é composto de uma câmara selada, cujas paredes possuem uma camada de um material poroso, com propriedades capilares, denominado de *pavio*. Esta câmara contém no seu interior um fluido de trabalho. No *pavio* este fluido está na fase líquida e

no espaço central na fase vapor. Este arranjo promove um fluxo distinto em cada parte.

Quando uma parte do pino térmico é aquecida e a outra resfriada, estabelece-se um fluxo de contra corrente entre as partes, com adição e diminuição de massa. Ocorre uma evaporação e condensação onde se tem a interface líquido-vapor e ocorre uma evaporação na região aquecida. O excesso de vapor flui para a região resfriada, onde condensa, fornecendo o calor latente que é removido por condução para o circuito de resfriamento. O condensado retorna para a zona aquecida, onde reinicia o ciclo [31].

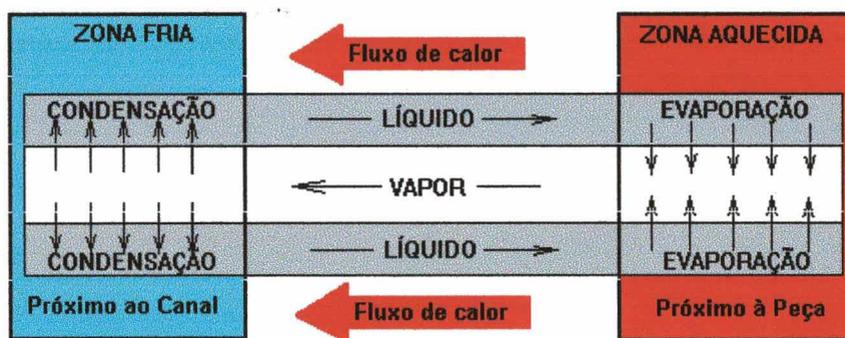


Figura 4.8 - Esquema ilustrativo do funcionamento de um pino térmico.

A condutividade térmica do pino térmico, por depender do fluido de trabalho, é milhares de vezes maior do que a do melhor metal [31], podendo trabalhar com diferenciais de temperatura de até 3°C [30]. Um inconveniente do pino térmico é o fato de que, para se ter uma eficiente troca de calor, é necessário uma certa área de contato entre o pino e o furo no qual ele é encaixado, o que exige um bom acabamento do furo. Adicionalmente, pode-se

utilizar uma pasta especial que possui uma boa condutividade térmica e aumenta a superfície de contato entre o pino e o furo. A utilização de pinos térmicos esbarra também no fator preço.

4.4.2 - LIGAS COM ALTA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Em casos de regiões onde a retirada de calor é difícil, e não se pode atingi-la com outra solução, são utilizados insertos feitos de ligas de alta condutividade térmica. Também em casos onde é desejado retirar o calor rapidamente, os materiais de alta condutividade térmica podem ser empregados. Dentre os principais utilizados atualmente, tem-se o AMPCO^{®1}, e o cobre-berílio, cujas propriedades podem ser comparadas com as de outros materiais na tabela 4.2.

Tab. 4.2 - Propriedades das ligas de AMPCO[®], comparadas com os materiais mais utilizados para a construção de moldes [32].

	Condutividade térmica a 20°C	Difusividade térmica a 20°C	Dureza Brinell HB 30	Coef. expansão 10 ⁻⁶ /K	Densidade de Kg/m ³
aço 18Cr8Ni	15	4	235-390	11	7.85
aço AISI 420	23	7	510	10.5	7.85
aço AISI H13	25	8	350-530	10.1	7.85
aço AISI P20	29	10	265-345	11.1	7.85
Ligas de Al	155	63	50-140	23	2.70
Cu Be 2	105	30	300-345	16.5	8.20
Ligas de Zn	100	37	90-100	22.7	6.76
AMPCO 18	62	25	187	16	7.45
AMPCO 25	33	13	375	16	6.93
AMPCOLOY 83	106	30	340-380	16.5	8.26
AMPCOLOY 97	330	97	147	17	8.87

¹ AMPCO[®] é o nome comercial de uma liga metálica a base de cobre.

CAPÍTULO 5

VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM MOLDE PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

A verificação da eficiência de um determinado sistema de canais de resfriamento, deve seguir uma sistemática e pode ser feita com base em uma solução analítica ou uma solução numérica. O critério de utilização de uma ou de outra é o grau de complexidade da peça a ser resfriada.

5.1 - SOLUÇÕES ANALÍTICAS

Na solução analítica simplificações são feitas, principalmente em termos de geometria da peça e canais de resfriamento para facilitar os cálculos, o que leva a resultados aproximados, mas que já fornecem uma boa idéia da eficiência do sistema. Neste caso, uma idéia da ordem de grandeza das vazões

de fluido nos canais de resfriamento é obtido, o que auxilia no seu posicionamento.

Para determinar estas e outras grandezas, existem recomendações e procedimentos de cálculo propostos por vários autores [22,24,43]. Contudo, tais recomendações e procedimentos, muitas vezes, não são adotados por parte dos projetistas de moldes em função de necessitarem da avaliação de muitos parâmetros antes de obter o resultado e não fazerem parte de uma metodologia mais abrangente que forneça, adicionalmente, procedimentos para cálculos de outras grandezas necessárias para verificar a eficiência do sistema de resfriamento.

Buscando apresentar uma alternativa para tal situação é apresentada a seguir uma proposta de metodologia de cálculo, tendo como base algumas recomendações fornecidas da literatura, com a introdução de simplificações e procedimentos mais simples.

Através desta metodologia, é possível determinar o tempo de resfriamento, o fluxo de calor da peça para o circuito de resfriamento, auxiliar no dimensionamento dos canais e, finalmente, verificar a eficiência do sistema de resfriamento proposto.

Para tanto, a metodologia define seis etapas a serem seguidas.

Etapa 1 - Tempo de Resfriamento

O tempo de resfriamento, que deve ser o menor possível, é estimado através da utilização de equação 5.1 proposta por

Menges [22], que descreve o resfriamento de uma placa plana em regime transiente.

$$t_c = \frac{s^2}{\alpha_{ef} \pi^2} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{T_M - T_W}{\bar{T}_E - T_W} \right) \quad (5.1)$$

onde: t_c = Tempo de resfriamento [s]
 s = Espessura [mm]
 T_M = Temperatura de injeção [°C]
 T_W = Temperatura do molde [°C]
 \bar{T}_E = Temperatura de desmoldagem [°C]
 α_{ef} = Difusividade térmica efetiva [mm²/s]

sendo a difusividade térmica obtida através de gráficos, como o mostrado na figura 5.1.

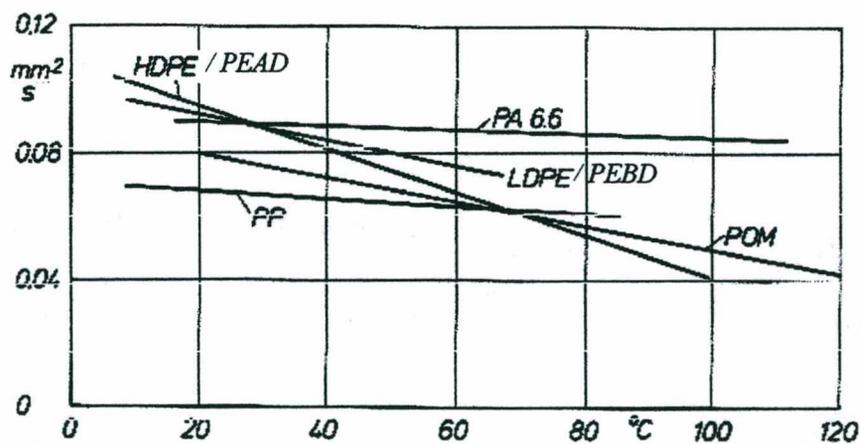


Figura 5.1 - Comportamento da difusividade térmica efetiva com a temperatura.

Pelas formulações apresentadas, pode-se observar que a temperatura do molde é a grandeza que mais influi no tempo de

resfriamento, pois as demais são constantes ou inerentes ao processo.

Etapa 2 - Balanço do Fluxo de Energia

Durante o processo de injeção, o material fundido, depois de preencher a cavidade, deve solidificar-se o suficiente para que possa ser desmoldado. Para que isso aconteça deve haver uma troca de calor entre o material e as paredes da cavidade. Para calcular este fluxo de calor, é necessário saber quanto calor deve ser retirado do material termoplástico para que este solidifique e a peça possa ser extraída. Este cálculo é feito pela variação da entalpia do material entre as temperaturas de injeção e desmoldagem.

A variação da entalpia, que é determinada consultando o gráfico da figura 5.2, multiplicada pela massa a ser injetada, resulta na quantidade de calor a ser retirada da peça.

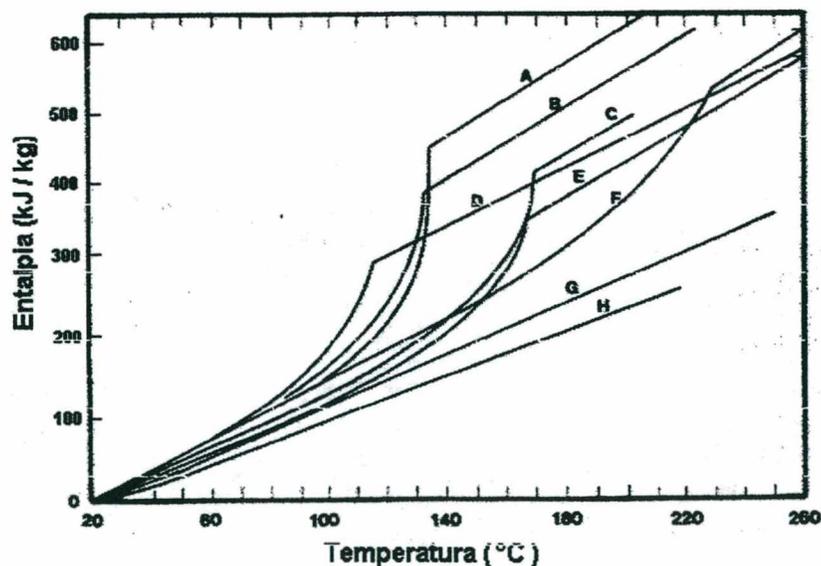


Figura 5.2 - Variação da entalpia com a temperatura para alguns polímeros. A:PEAD, B:PEMD, C:POM, D:PEBD, E:PP, F:PA-66, G:PS, H:PVC.

Dividindo este valor pelo tempo de injeção obtido pela equação 5.1, obtém-se o fluxo de calor no molde, dado por:

$$q_{ks} = \Delta h \cdot \frac{m_{ks}}{t_c} \quad (5.2)$$

ou

$$q_{ks} = \Delta h \frac{\rho_{ks} \cdot V}{t_c} \quad (5.3)$$

onde: q_{ks} = Calor fornecido pelo termoplástico [W]

Δh = Diferença de entalpia [KJ/kg]

ρ_{ks} = Massa específica média do material

entre a injeção e desmoldagem [kg/m³]

m_{ks} = Massa injetada no molde [kg]

V = Volume de material injetado no molde [m³]

Essa quantidade de calor terá de ser extraída do molde para que haja um equilíbrio de energia, considerando o processo em regime permanente.

Nos moldes com duas partes, o macho deve ser responsável pela retirada de 55% do calor e a fêmea pelos outros 45% [29]. Portanto deve-se calcular separadamente a quantidade de calor que o sistema de resfriamento do macho e da fêmea deverão retirar.

Traçando-se um volume de controle em torno do molde, tem-se uma fonte introduzindo calor no sistema (q_{ks}), oriundo do material termoplástico injetado. Uma parcela deste calor será

perdida para o ambiente (q_E), outra retirada por um sistema de resfriamento do molde (q_C). Pode ainda existir uma outra fonte de calor originária de um sistema de canais quente, por exemplo, que será chamada de calor adicional (q_{AD}).

Um balanço do fluxo de calor ficaria então,

$$Q_{KS} + Q_{AD} - Q_E - Q_C = 0 \quad (5.4)$$

Introduzindo a simplificação de que os valores de q_{AD} e q_E são desprezáveis diante dos demais [29], isto é, que todo calor da peça moldada é retirada pelo sistema de resfriamento, tem-se,

$$Q_{KS} - Q_C = 0 \quad (5.5)$$

Etapa 3 - Vazão de Fluido de Resfriamento

Com a simplificação feita anteriormente, todo o calor do material injetado terá de ser cedido para o fluido de resfriamento. Então, como:

$$Q_C = m \cdot c \cdot (T_{c \text{ out}} - T_{c \text{ in}}) \quad (5.6)$$

pode-se reescrever a equação 5.5 como sendo:

$$Q_{KS} = m \cdot c \cdot (T_{c \text{ out}} - T_{c \text{ in}}) \quad (5.7)$$

ou

$$m = \frac{Q_{KS}}{c \cdot (T_{c \text{ out}} - T_{c \text{ in}})} \quad (5.8)$$

onde: m = vazão mássica de fluido refrigerante [m^3/s]

c = calor específico do fluido refrigerante [$KJ/kg^\circ C$]

$T_{c\ out}$, $T_{c\ in}$ = temperaturas de entrada e
saída do fluido refrigerante [$^\circ C$]

Estes cálculos de vazão e posteriormente, de diâmetro devem ser feitos separadamente para o macho e a fêmea, definindo estas grandezas para cada parte do molde.

Recomenda-se que a temperatura de saída do fluido de resfriamento não exceda a $5^\circ C$ da temperatura de entrada [14,22,26], como já mencionado no capítulo anterior.

Etapa 4 - Diâmetros dos Canais de Resfriamento

Sabendo a vazão mássica necessária, a etapa seguinte é a determinação do diâmetro dos canais.

Para um canal com seção transversal constante e circular, Incropera [42] define o Número de Reynolds (Re_D) como,

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (5.9)$$

sendo D = diâmetro do canal [m]

μ = viscosidade do fluido refrigerante [m^2/s]

O Número de Reynolds deve ser maior que 10000, para representar um regime completamente turbulento [42]. Com isso, pode-se obter o diâmetro máximo dos canais.

Reordenando a Equação 5.9, tem-se:

$$D = \frac{4 \cdot m}{\pi Re_D \mu} \quad (5.10)$$

Etapa 5 - Comprimento dos Canais de Resfriamento

Na metodologia proposta para facilitar o dimensionamento dos canais, faz-se uma estimativa do comprimento de canal requerido para satisfazer as necessidades de resfriamento da peça como sugerido por [29].

Para calcular o comprimento do canal o comprimento do canal de resfriamento, deve-se considerar o fluxo de calor como apresentado na figura 5.3, onde R1 é a resistência devido a condução no molde e R2 a resistência devida a convecção no canal de resfriamento.

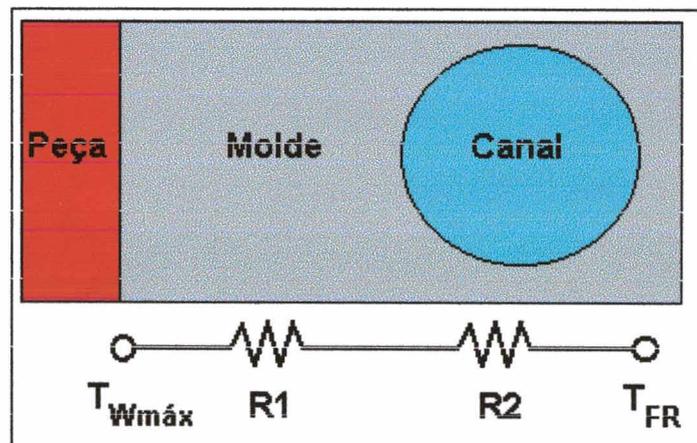


Figura 5.3 - Esquema do fluxo de calor no molde.

Portanto considerando regime permanente de troca de calor tem-se o fluxo de calor como sendo:

$$q_{ks} = \frac{T_{Wmax} - T_{FR}}{R1 + R2} \quad (5.11)$$

onde,

$$R1 = \frac{1}{k_M \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{4 \cdot A}{D}\right)}} \quad (5.12)$$

e

$$R2 = \frac{1}{h \cdot \pi \cdot D \cdot L} \quad (5.13)$$

sendo: T_{FR} = Temperatura do fluido de resfriamento [°C]

T_{Wmax} = Temperatura máxima das paredes do molde durante o preenchimento (já definida no capítulo 3) [°C]

k_M = condutividade térmica do material do molde [W/m°C]

h = coeficiente de troca de calor por convecção [W/m²°C]

A = Distância entre a superfície do molde e o canal de resfriamento [m]

L = Comprimento do canal [m]

Portanto calcula-se o comprimento do canal de resfriamento L , substituindo as equações 5.12 e 5.13 na equação 5.11. e isolando-se L , obtendo-se:

$$L = \frac{T_{Wmax} - T_{FR}}{q_{ks} \left(\frac{1}{k_M \frac{2. \pi}{\ln \frac{4. A}{D}}} + \frac{1}{h. \pi. D} \right)} \quad (5.14)$$

Para se obter o coeficiente de troca de calor por convecção h , tem-se que:

$$Nu_D = \frac{h. D}{k_F} \quad (5.15)$$

onde: Nu_D = Número de Nusselt
 k_F = Condutividade térmica do fluido de resfriamento [W/m°C]

portanto:

$$h = \frac{Nu_D \cdot k_F}{D} \quad (5.16)$$

Segundo Incropera [42], o número de Nusselt pode ser calculado segundo a equação:

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.17)$$

onde Pr é o Número de Prandtl para a temperatura média do fluido refrigerante e

$$f = (0.79.(\ln Re_D) - 1.64)^{-2} \quad (5.18)$$

Realiza-se então o posicionamento dos canais de resfriamento, seguindo as recomendações descritas no capítulo 4.

Etapa 6 - Eficiência do Circuito Proposto

Para se verificar a eficiência do circuito a metodologia proposta baseia-se no trabalho de Zollner [43]. Segundo Zollner, o posicionamento dos canais, assim como o diâmetro dos mesmos, geram um diferencial de temperatura na superfície do molde. Observando a figura 5.4, nota-se que para canais de grande diâmetro e em menor número a distribuição de temperatura é mais irregular que para canais com diâmetros menores e em maior número.

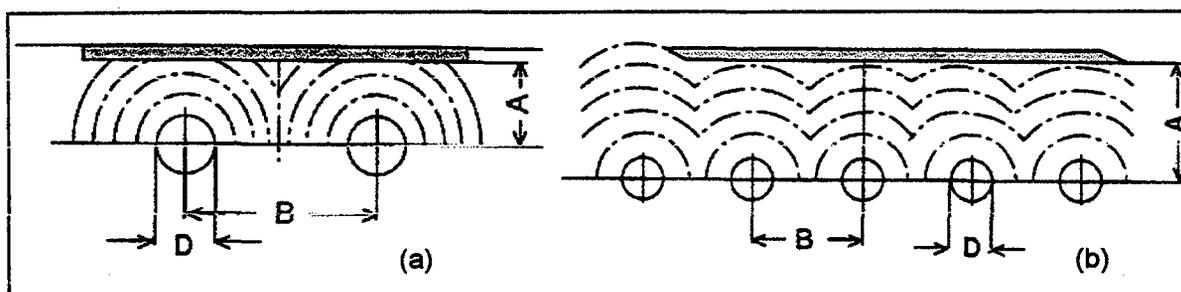


Figura 5.4 - Distribuição de temperatura nas paredes da cavidade. (a) - canais de grande diâmetro e distantes um do outro. (b) - canais de pequeno diâmetro e em maior número.

Assim, as grandezas físicas que agem sobre o diferencial de temperatura nas paredes do molde são o diâmetro D , o espaçamento entre os canais B , e a distância entre o centro dos canais e a parede do molde A .

A diferença de homogeneidade da temperatura da parede não pode ultrapassar de 2,5% a 5% para semi-cristalinos e de 5% a

10% para amorfos [43]. Esta diferença pode ser calculada pela seguinte equação:

$$j = 2.4Bi^{0.22} \left(\frac{B}{A} \right)^{2.8 \left| \ln \left(\frac{B}{A} \right) \right|} \quad (5.19)$$

$$Bi = \frac{h.D}{k_M} \quad (5.20)$$

onde Bi = número de Biot

k_M = condutividade térmica do material do molde.

Pode se expressar o erro em °C através da expressão,

$$\Delta T_w = T_w \frac{j}{100\%} \quad (5.21)$$

Esta proposta de metodologia visa atender peças do tipo placas planas e outras geometrias similares como peças pouco profundas, com grandes superfícies planas. Sua validade foi testada em um estudo de caso, cuja descrição é apresentada nos capítulos 6 e 7.

5.2 - SOLUÇÕES NUMÉRICAS

Para peças mais complexas, com partes mais profundas, superfícies de forma livre e cheias de detalhes, é recomendável utilizarem-se soluções numéricas, empregadas nos softwares de CAE¹ (Computer Aided Engineering). Os cálculos nele envolvidos,

¹ Mesmo existindo softwares que utilizam métodos analíticos para simulação do resfriamento, foi considerado que os softwares CAE utilizam apenas métodos numéricos para a realização da referida simulação.

visam determinar módulo e direção do fluxo de calor dentro do molde.

A utilização do método numérico é mais vantajosa que o método analítico [43] pois:

- Além das soluções serem válidas para peças de geometria complexa, o fluxo de calor não é considerado apenas unidimensional.
- Obtêm-se simulações mais precisas das condições de resfriamento.
- Como o módulo de análise de resfriamento dos softwares de CAE (que utilizam métodos numéricos), possui interfaceamento com os demais módulos dos softwares de CAE, é possível introduzir estes resultados oriundos do resfriamento, em módulos de análise de empenamento, contração, etc.

5.2.1 - VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE UM SOFTWARE DE CAE

Tendo em vista que a ineficiência térmica não afeta somente a qualidade da peça, mas também a produtividade do molde, os softwares de CAE vêm de encontro a esta deficiência.

Estes softwares de análise de resfriamento, podem prever tempos de ciclo com resultados precisos, tomando como base propriedades termodinâmicas do material, molde, líquido de resfriamento e características geométricas do molde [40].

Além de predizer tempos de ciclo, este tipo de programa é muito útil sendo usado para testar diferentes projetos do sistema de resfriamento.

Segundo [40], em algumas aplicações, o tempo total entre o projeto da peça plástica e a produção de peças livres de defeitos, pode ser reduzido em até 40%.

A necessidade de um software que possa avaliar o efeito de qualquer modificação nas variáveis de projeto na performance do molde é evidente, tendo em vista o número de variáveis envolvidas no processo [40], sendo estas:

- Localização dos canais de resfriamento;
- Diâmetro destes canais;
- Perdas de cargas nestes;
- Comprimento dos circuitos;
- Vazão de líquido de resfriamento;
- Material do Molde.

A utilização destes softwares apresenta melhores resultados quando o molde está ainda na fase de projeto. Pois pode-se alterar o traçado dos canais. Mas em casos tardios, onde o molde já tenha sido produzido, pode-se ter ganhos de produtividade com a utilização de softwares CAE de, no mínimo, 10 a 15% [40].

Os softwares de CAE permitem uma avaliação de um projeto do sistema de resfriamento proposto antes da construção deste. Isto permite aos projetistas de molde uma avaliação completa da qualidade do projeto e revisão dos projetos para dar-lhes mais

eficiência. Com isso, pode-se ganhar muito em tempo de ciclo, custo e qualidade das peças moldadas, e custos com try-out em moldes novos.

Através de uma análise em um software de CAE conseguem-se melhoramentos não somente na peça a ser moldada mas também em todo o conjunto que compõe o sistema de resfriamento. Segundo [14,25,40,43], através de uma análise em CAE consegue-se:

- *Aumentar a produção.* Melhorando a troca térmica com os canais, consegue-se redução no tempo de ciclo.
- *Melhorar a qualidade das peças, nivelamento e balanceamento do resfriamento no molde.* Isto elimina tensões residuais de origem térmica, que podem originar empenamentos nas peças moldadas. Melhora também propriedades como resistência ao impacto e aparência da superfície da peça.
- *Redução do investimento.* Um molde com o sistema de resfriamento bem dimensionado, apresenta um tempo de ciclo menor, com isso consegue produzir mais peças. Então, para a mesma produção, é necessário menos tempo de máquina, não necessitando investimentos em novos equipamentos para manter produção.
- *Redução de custos de resfriamento da água.* Através da análise, obtêm-se dados como vazões ótimas, perdas de carga nos canais e níveis de temperatura do líquido de resfriamento empregado. Isto facilita o dimensionamento

dos equipamento de resfriamento como torres de resfriamento, unidade de refrigeração("chillers"), e bombas.

- *Redução de custos de operação e gastos com energia.* O uso de condições de operação levam a uma economia de energia. Com isso, os custo de operação e energia serão menores.

5.2.2 - A ANÁLISE ATRAVÉS DE UM SOFTWARE DE CAE

Existem vários softwares de CAE disponíveis no mercado, como por exemplo os relacionados na tabela 5.1, através dos quais, a análise do sistema de resfriamento do molde pode ser realizada.

Tabela 5.1 - Softwares de CAE para análise de resfriamento disponíveis no mercado

Software	Fornecedor	Módulo de Análise Térmica
Moldflow	Moldflow	MF-Cool
C-Mold	CCMP	C-Cool
Cadmould	Simcon	C2D C3C-Mecool
Femould	Hahn&Kolb	C2D
I-Deas Plastics	SDRC	Polycool I-Deas Mold Cooling
PC-Mold	KIMW	PC-Therm
TMConcept	Plastics & Computers	TMC-MTA
Simuflow	C-Tech	Simucool
Strim 100 Plastic	Cisigraph	Cooling Analysis

5.2.2.1 - Análise Bidimensional

Este é um tipo de análise que utiliza o método de diferenças finitas, que descreve uma situação tridimensional através de um modelo bidimensional [43].

Esta análise considera um estado estacionário no molde e no líquido de resfriamento. É levado em conta então o efeito aproximado da localização dos canais de resfriamento e a geometria da peça [40].

Os resultados apresentados são bastante satisfatórios quando a seção transversal da peça moldada for uniforme, isto é, não variar ao longo da peça. Mas não são tão precisos quando se trata de peças complexas. O efeito da geometria da peça possui uma grande importância para o perfil de temperaturas na peça moldada e, conseqüentemente, para se prever defeitos, como o empenamento. A figura 5.5 mostra a representação de uma análise bidimensional, as conseqüências de uma posição incorreta dos canais e a nova posição destes.

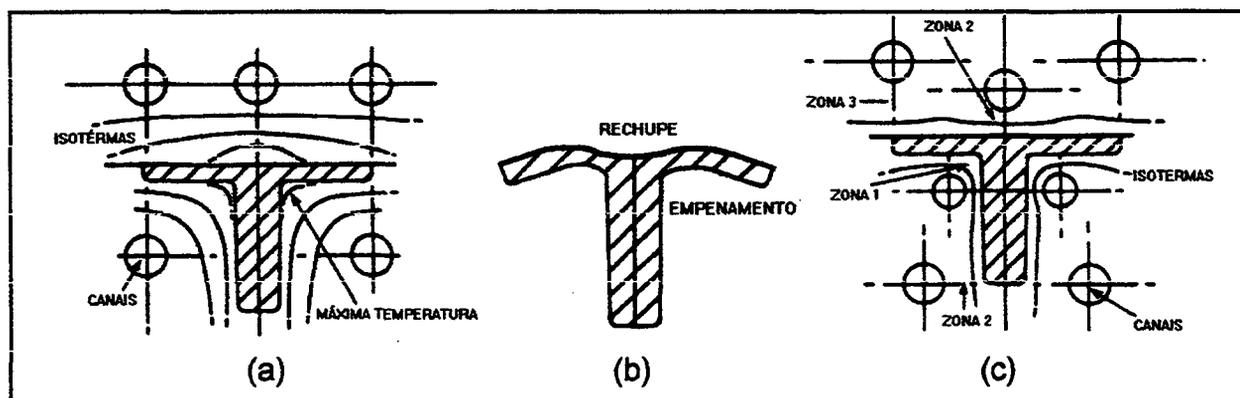


Figura 5.5 - Análise bidimensional. (a) - um mau posicionamento dos canais. (b) - o resultado deste mau posicionamento. (c) - um posicionamento otimizado, com melhor distribuição de temperaturas

5.2.2.2 - Análise Tridimensional

A análise tridimensional é uma análise bidimensional integrada com um modelo tridimensional sólido [40]. Gera resultados mais precisos pois pode utilizar resultados oriundos de uma análise de injeção (ver item 5.2.3), retirando desta informações, como a temperatura do material, em várias partes da peça [14].

Estas análises geralmente utilizam um modelo considerando regime transiente na peça e no molde, e regime estacionário no fluido de resfriamento. Isso significa considerar uma análise não linear, considerando a variação da condutividade térmica e capacidade térmica do material termoplástico durante a etapa de resfriamento [40].

5.2.3 - PROCEDIMENTO PARA EFETUAR UMA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CAE PARA RESFRIAMENTO

A simulação do resfriamento propriamente dita, é uma etapa que depende de etapas anteriores, necessárias para gerar informações geométricas, de temperaturas, e uma série de outros dados relevantes a uma simulação de resfriamento. Estas etapas podem ser divididas em:

- Modelamento da Peça e Análise de Preenchimento²
- Modelamento dos canais de resfriamento
- Avaliação dos resultados da simulação

² Mais detalhes sobre o procedimento de modelamento e análise de preenchimento consultar Dihlmann [18]

5.2.3.1 - Modelamento da Peça e Análise de Preenchimento

O modelamento da peça é realizado em um software de CAD (Computer Aided Design), quer seja externo ou incorporado ao software de CAE. O modelo é composto por um conjunto de superfícies, que ligadas entre si dão forma à peça (figura 5.6-a). Estas superfícies devem ser subdivididas em elementos menores (figura 5.6-b). A este procedimento é dado o nome de geração da malha. São atribuídas então as espessuras às superfícies, dando então características tridimensionais à peça.

Com a peça modelada, procede-se a definição de condições de contorno de preenchimento, onde é definido o ponto ou pontos de injeção, isto é o local por onde o material entra na cavidade. Definido este ponto ou pontos, resta a análise de preenchimento propriamente dita. Na figura 5.7, observam-se resultados de uma análise de preenchimento no que diz respeito ao tempo de injeção (figura 5.7-a) e temperatura de injeção (figura 5.7-b)

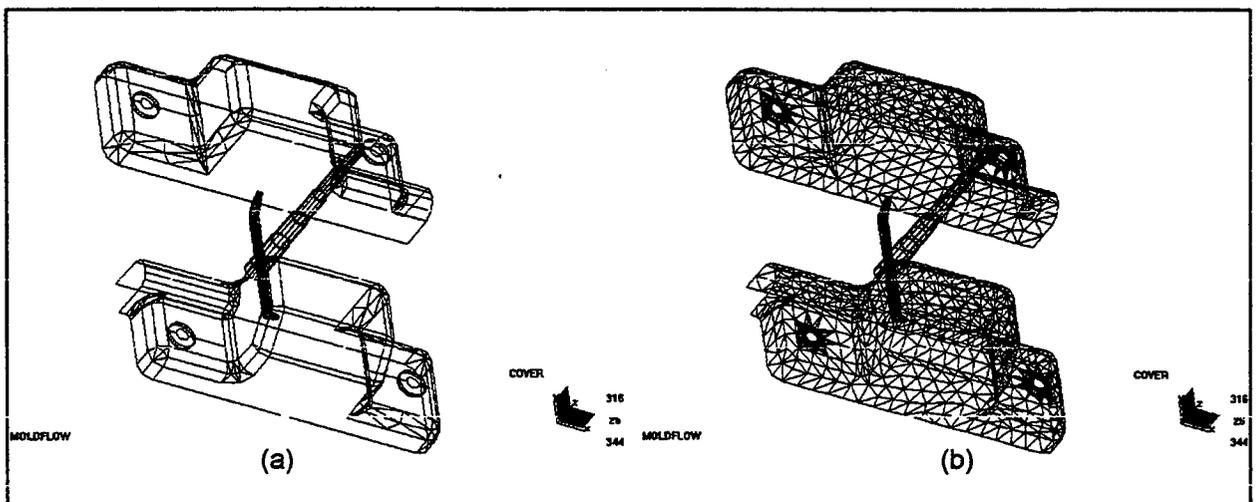


Figura 5.6 - Peça modelada no CAD para análise de preenchimento. (a) superfícies e (b) malha.

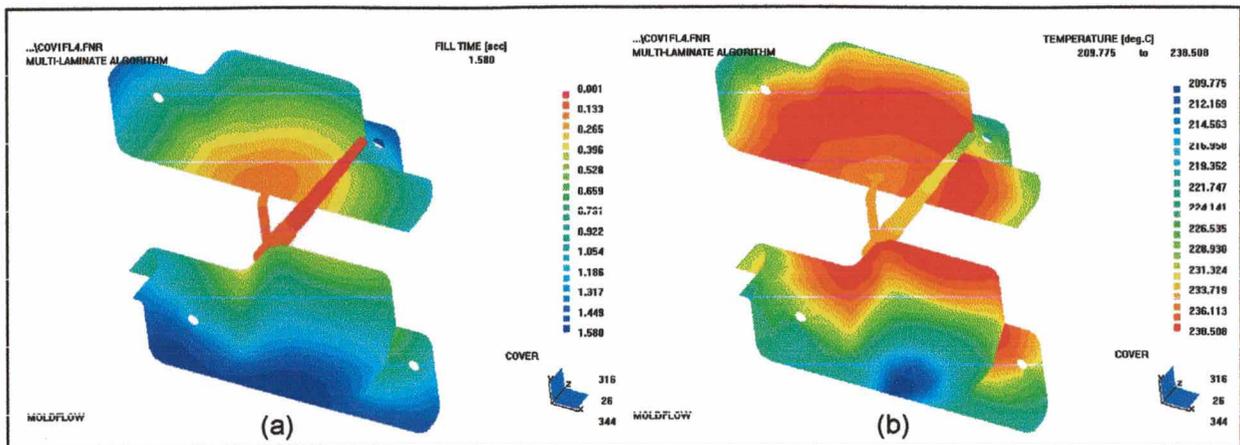


Figura 5.7 - Análise de preenchimento. (a) tempo de injeção. (b) distribuição de temperatura após o preenchimento.

5.2.3.2 - Modelamento dos Canais de Resfriamento

O traçado dos canais de resfriamento possui uma grande influência no comportamento do sistema de resfriamento de um molde. Assim, para analisar a influência do traçado dos canais é necessário o modelamento dos canais de resfriamento como foram idealizados. Novamente, utilizando-se um software de CAD, modela-se os canais, atribuindo-lhes diâmetros e forma da seção transversal como mostrado na figura 5.8.

Antes de proceder a simulação do sistema de resfriamento, resta apenas estabelecer as condições de contorno, sendo estas:

- Material do molde
- Fluido de resfriamento
- Temperatura do fluido de resfriamento
- Vazão do fluido de resfriamento ou o número de Reynolds do sistema canais-fluido de resfriamento.

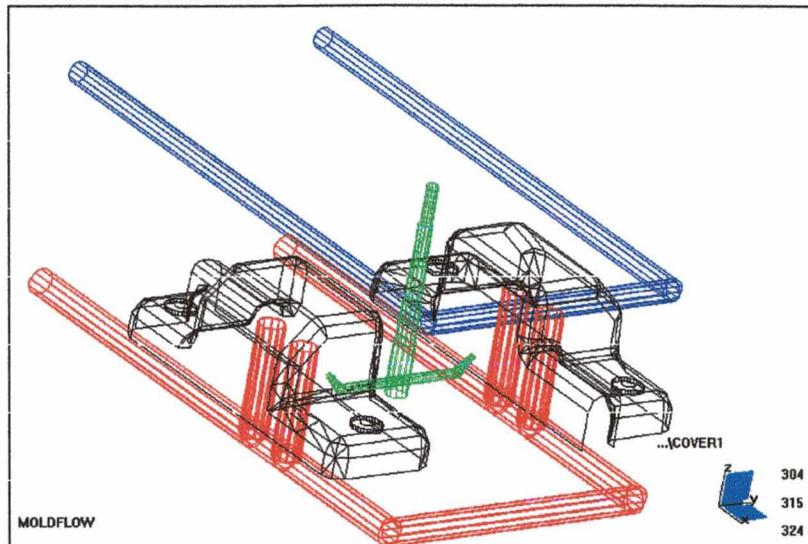


Figura 5.8 - Modelamento dos canais de resfriamento (em azul e vermelho).

5.2.3.3 - Avaliação dos Resultados da Simulação

Após executada a simulação, o software de CAE normalmente fornece como resultado dados como:

- Distribuição de temperaturas nas paredes da cavidade
- Diferencial de temperatura entre as partes macho e a fêmea da cavidade
- Tempo de resfriamento
- Perda de carga nos canais de resfriamento

Estes permitem analisar o comportamento do sistema de canais de resfriamento, e tomar decisões quanto ao seu posicionamento.

No entanto, como não existe uma sistemática pré-estabelecida para tomar estas decisões, com base no exposto, propõe-se

analisar quatro fatores para a avaliação da eficiência da retirada de calor pelo sistema de resfriamento, quais sejam:

- a) Pontos quentes localizados: são pontos onde o resfriamento não é suficiente, ou seja, regiões distantes de canais de resfriamento e não assistidas por nenhum outro tipo de resfriamento, como pinos térmicos por exemplo.

- b) Diferencial de temperatura entre as partes (macho e fêmea) da cavidade : esta diferença faz com que surjam empenamentos, como mencionado no item 3.2.2. Ocorrerá diferenças morfológicas no decorrer da espessura da peça, gerando tensões, que se refletirão ou não em deformações.

- c) Diferença de temperatura do fluido de resfriamento entre a entrada e a saída dos canais de resfriamento: esta grandeza determina a uniformidade da retirada de calor em todas as regiões do molde. Com uma diferença de temperatura muito grande, a troca de calor entre as regiões próximas da região de entrada do canal será melhor que nas regiões mais próximas da saída do canal.

- d) Perda de carga nos canais de resfriamento : Pode gerar vazões insuficientes. Com uma perda de carga muito alta, a bomba de recalque disponível pode não gerar a pressão necessária para a vazão requerida.

Analisando os resultados e verificando o traçado de canais de resfriamento propostos, juntamente com as vazões propostas, pode-se garantir a produção de peças livre de defeitos causados por um projeto inadequado do sistema de resfriamento.

CAPÍTULO 6

ESTUDOS DE CASO ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

Neste capítulo são descritos 2 estudos de caso, cada qual com seu objetivo específico, envolvendo a utilização de um software de CAE para analisar a eficiência do sistema de resfriamento.

O software escolhido foi o Moldflow versão 9.2, módulo MF-COOL, cuja escolha se deveu ao fato de estar disponível no CIMJECT (Centro de Integração da Manufatura por Computador para Peças de Plástico Injetado), ser bastante conceituado e o mais vendido no Brasil. Foi utilizada uma cópia para computador pessoal (PC) rodando em Windows 95.

6.1 - ESTUDO DE CASO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO ANALÍTICO PROPOSTO E O MÉTODO NUMÉRICO.

Como citado no capítulo 5, para avaliar um sistema de resfriamento existem métodos numéricos e analíticos, sendo que

os métodos numéricos apresentam resultados mais confiáveis que os analíticos. Foi também neste capítulo, proposta uma metodologia de cálculo baseada no método analítico.

Deste modo o objetivo deste primeiro estudo de casos é comparar resultados, para um determinado molde, obtidos através do método analítico, com os resultados fornecidos pela simulação numérica, realizada em um software CAE, para o mesmo molde e com isso avaliar a eficiência da utilização do método analítico para a aferição do sistema de resfriamento.

Partiu-se da hipótese que os resultados fornecidos pelo software de CAE, representam mais fielmente os fenômenos de troca de calor que ocorrem no molde, durante a moldagem, devido este software ser um software comercial difundido e com boa aceitação no mercado, além de considerar a geometria da peça e do molde sem simplificações e também considerar regime transiente de troca de calor entre o molde, a peça e os canais de resfriamento.

6.1.1 - A ESCOLHA DA PEÇA

Para realizar esta comparação, foi preciso selecionar uma peça que preenchesse os requisitos de análise pelo método analítico, que lembrando, deve ser pouco profunda, com características de peça plana e sem muitos detalhes construtivos. Para tal, foi escolhida a caixa mostrada na figura 6.1, de espessura 1,5mm e dimensões 70mm x 130mm x 15mm, moldada

em DELRIN 500, um poli(oxi-metileno) da DUPONT, grau DP 309, cujas características encontram-se no banco de dados do software Moldflow.

6.1.2 - PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Para realizar este estudo de caso, procedeu-se da seguinte forma:

- a) realizou-se um levantamento de informações da peça e do molde.
- b) aplicou-se a metodologia proposta no item 5.1.
- c) realizou-se a análise no software de CAE para resfriamento do molde em questão, utilizando as informações sobre vazões e temperatura do fluido de resfriamento e posicionamento dos canais fornecidos pelo método analítico.

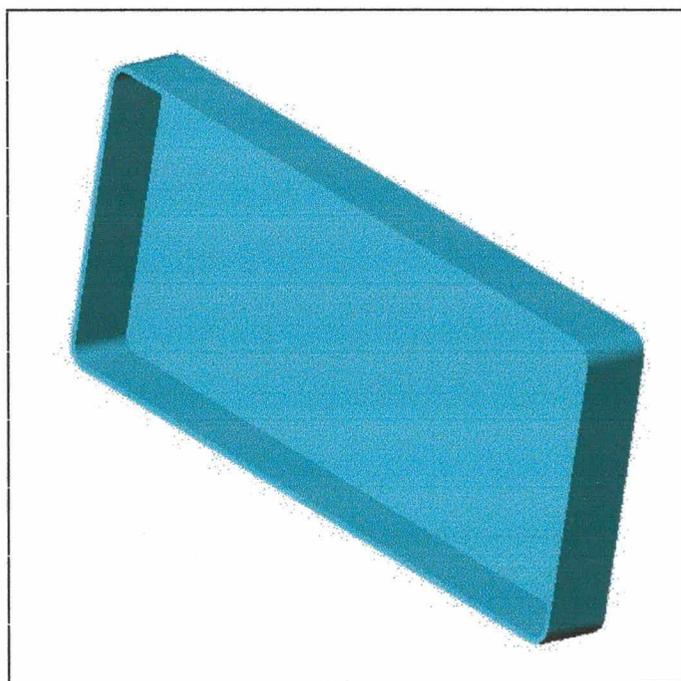


Figura 6.1 – Peça do primeiro estudo de caso.

6.1.2.1 - Levantamento de Informações da Peça e do Molde

Para aplicar a metodologia é necessário a obtenção de informações sobre as propriedades térmicas tanto do material da peça quanto do material do molde. Para obter os valores respectivos às propriedades do material da peça, consultou-se o banco de dados de materiais do software de CAE Moldflow, encontrando os seguintes valores:

- Temperatura recomendada de injeção para o material = 210°C
- Temperatura mínima para o molde = 60°C
- Condutividade térmica média = $0,1416 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$
- Calor específico = $3044 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$
- Densidade média = 1330 kg/m^3
- Diferencial de entalpia = $365,28 \text{ KJ/kg}$.

A difusividade térmica do material da peça foi fornecida por Zollner [43], como sendo de $0,04 \text{ mm}^2/\text{s}$, e o peso da peça foi obtido através de uma já existente, sendo de $35,59 \times 10^{-3} \text{ kg}$. A temperatura de extração adotada para este caso foi de 90°C .

O material utilizado na fabricação do molde foi considerado como sendo o aço AISI P20, que possui uma condutividade térmica de $37,7 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ [42], e uma permeabilidade térmica de 760 [43].

Para a água a 50°C , utilizada como fluido de resfriamento, Incropera [42] fornece os seguintes valores para as propriedades térmicas relevantes na metodologia empregada:

- Viscosidade = 528×10^{-6} N.s/m²
- Número de Prandtl = 3,42
- Condutividade térmica = 0,645 W/m.°C
- Capacidade térmica = 4,184 KJ/kg°C

6.1.2.2 - Aplicação da Metodologia

Para obter os valores necessários para a comparação, foram seguidas as etapas descritas no item 5.1, que apresentaram os resultados mostrados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados obtidos empregando a metodologia proposta no molde da peça do primeiro estudo de caso.

Etapa	Equação	Resultados	
Tempo de resfriamento	5.1	7,98 segundos	
Balanço de Energia	5.3	1629,1 W	$Q_{KS \text{ macho}} = 896 \text{ W}$ $Q_{KS \text{ fêmea}} = 733,1 \text{ W}$
Vazão de Fluido de Resfriamento	5.8	$m_{\text{macho}} = 4,28 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ $m_{\text{fêmea}} = 3,5 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$	
Diâmetro dos canais	5.10	$D_{\text{macho}} = 10,22 \text{ mm p/ Re} = 10000$ $D_{\text{fêmea}} = 8,3 \text{ mm p/ Re} = 10000$	
Comprimento dos canais	5.18	$L_{\text{macho}} = 0,85 \text{ m}$ $L_{\text{fêmea}} = 0,74 \text{ m}$	
Distribuição de Temperatura	5.19	$\Delta J_{\text{macho}} = 2,39\% \text{ ou } \Delta T_{\text{macho}} = 1,43^\circ\text{C}$ $\Delta J_{\text{fêmea}} = 2,39\% \text{ ou } \Delta T_{\text{fêmea}} = 1,43^\circ\text{C}$	

6.1.2.3 - Simulação no Software de CAE para Resfriamento

Seguindo os passos, descritos no capítulo 5 para a realização de uma simulação do sistema de resfriamento de um molde utilizando um software de CAE, modelou-se a peça, traçou-se os canais (apresentados na figura 6.2), segundo as informações obtidas pelo método analítico, e procedeu-se a simulação também utilizando as informações referidas.

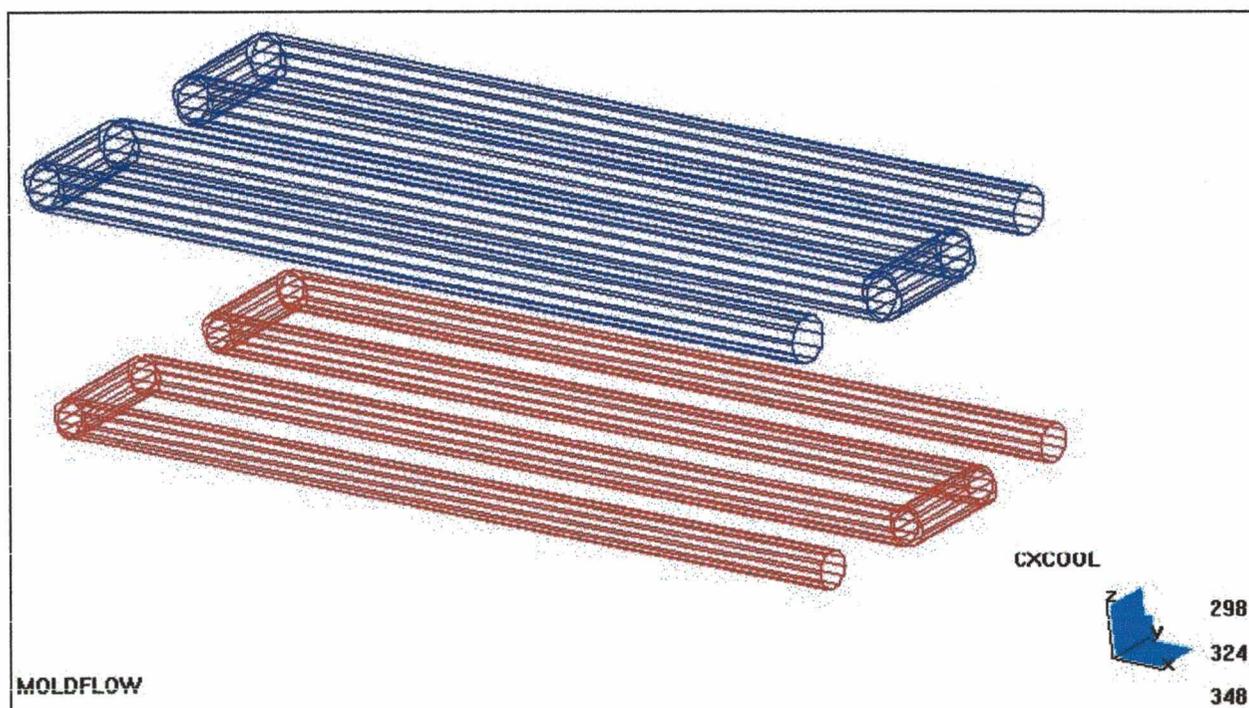


Figura 6.2 - Traçado do circuito de canais baseado nas informações do método analítico

Com as informações obtidas, tanto do método analítico quanto do método numérico, fez-se a comparação dos resultados, que são descritos no capítulo 7.

6.2 - ESTUDO DE CASO 2 - ANÁLISE DO PROJETO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM MOLDE PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.

Os resultados de uma análise de resfriamento, sugerem modificações que afetam diretamente a qualidade da peça moldada e o tempo de resfriamento. Analisando estes resultados, pode-se prever as possíveis falhas de projeto do molde, além de determinar informações úteis para o fabricante das peças plásticas, que irá utilizar este molde.

Este segundo estudo de caso tem o intuito de demonstrar o processo de otimização do sistema de resfriamento via CAE, quer seja em performance ou em custos do próprio molde. Também tem o intuito de mostrar como o sistema de resfriamento influencia na qualidade da peça, expondo possíveis defeitos devido ao posicionamento incorreto dos canais de resfriamento ou utilização de vazões, não balanceadas termicamente, do fluido de resfriamento nestes canais. Adicionalmente, analisar como a utilização de temperaturas baixas do fluido de resfriamento, e consequentemente, a temperaturas das paredes da cavidade, influenciariam o tempo de ciclo, e no que tal situação implicaria.

Portanto, este estudo de caso foi dividido em 3 fases:

- Realização da simulação de um molde com os circuitos originais do sistema de resfriamento;
- Alteração do circuito de resfriamento do molde e sua posterior simulação;

- Alteração da temperatura do fluido de resfriamento e posterior simulação do circuito de resfriamento.

6.2.1 - ESCOLHA DA PEÇA

No que diz respeito ao resfriamento, segundo a experiência em projetos de moldes, uma peça profunda, com paredes côncavas ou convexas e com áreas de difícil acesso ao sistema de resfriamento, é um típico exemplo de uma peça que pode apresentar problemas com relação ao resfriamento. A peça profunda dificulta a retirada uniforme do calor do macho, obrigando a se utilizar sistemas mais complexos de canais, como os descritos no capítulo 4. As paredes côncavas ou convexas fazem com que a distância entre os canais e a parede da peça não sejam constantes, provocando variações na temperatura das paredes. As áreas de difícil acesso podem dar origem a pontos quentes, que aumentam o tempo de ciclo e podem originar distorções.

Tendo em vista estes fatores, escolheu-se a peça apresentada na figura 6.3, um vaso, com espessura de 2 mm e diâmetro de 280mm, cujas informações de projeto do molde foram gentilmente fornecidas pela empresa MOLDE MATOS Lda., localizada na cidade de Marinha Grande, Portugal.

O vaso foi moldado em LUPULEN 5031, polietileno de alta densidade da BASF, grau BA 1801, cujas características se encontram no banco de dados do software Moldflow.

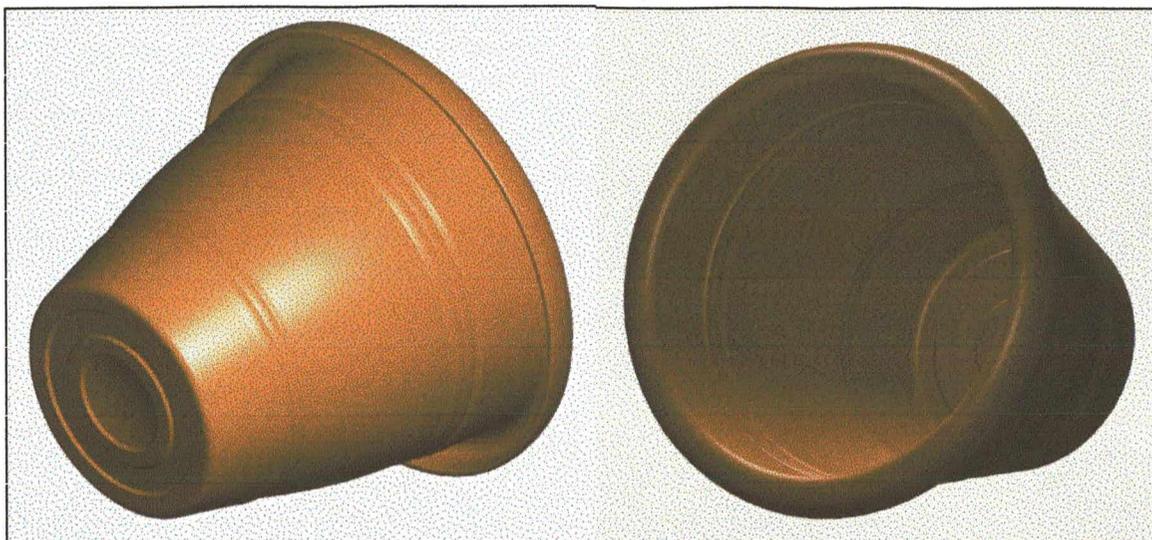


Figura 6.3 - Peça do segundo estudo de caso (Vaso).

6.2.2 - ANÁLISE DE RESFRIAMENTO PARA O MOLDE ORIGINAL

Para realização da análise de resfriamento no molde original, com o auxílio de um software CAE, seguiu-se as etapas descritas no capítulo 5.

Da etapa de modelamento e análise do preenchimento foram utilizados os seguintes parâmetros de injeção:

- Tempo de injeção = 1,7 segundos
- Temperatura de injeção = 250°C
- Temperatura do molde = 7°C

A figura 6.4-a mostra a distribuição do tempo de injeção e a figura 6.4-b, a distribuição de temperaturas após o preenchimento da cavidade.

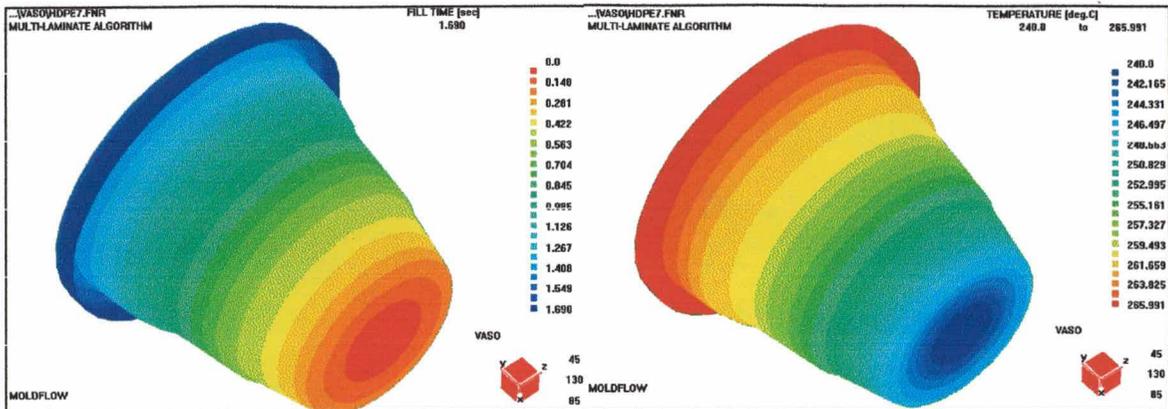


Figura 6.4 - Análise de preenchimento para a peça do estudo de caso 2.

Com relação a etapa de modelamento dos canais de resfriamento os traçados dos mesmos no molde original são mostrados separadamente na figura 6.5. Na figura 6.6 é mostrado um desenho de conjunto dos canais.

Os canais 1, 2, 3 e 4 estão localizados no lado do macho do molde. O canal 1 é responsável por retirar o calor da parte externa da borda superior da peça, os canais 2 e 3 retiram o calor do macho propriamente dito e o canal 4 retira calor do fundo da peça. Já os canais 5 e 6 encontram-se no lado da fêmea do molde, sendo o 5 responsável pelo resfriamento das paredes da peça e o 6 pelo fundo.

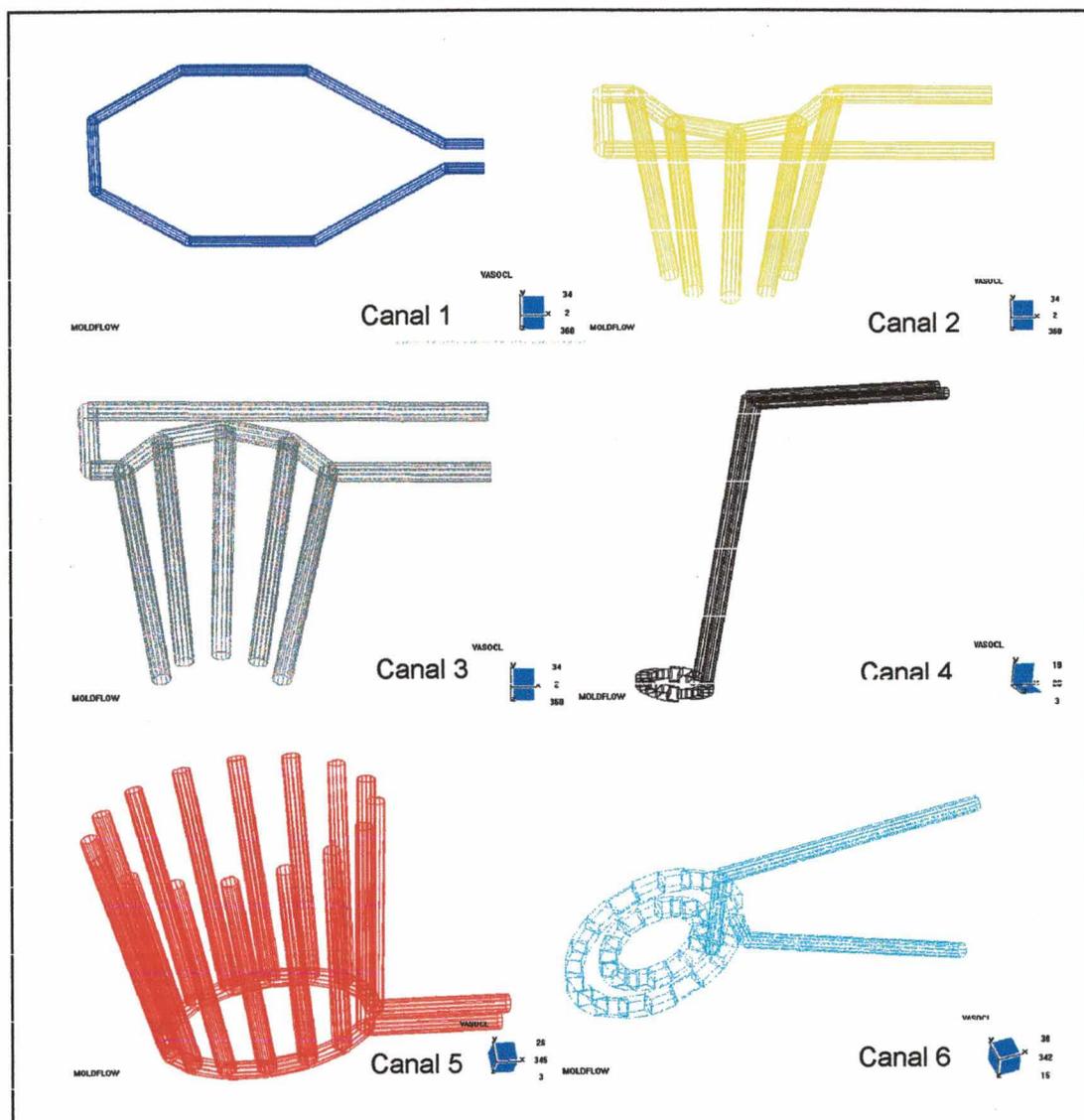


Figura 6.5 - Traçado dos canais de resfriamento do molde original do estudo de caso 2.

Sobre o aspecto construtivo, nos canais 2, 3 e 5 foram utilizados defletores, estes explicados detalhadamente no capítulo 4. Os canais 4 e 6 são oriundos de insertos torneados, onde foram abertos rasgos retangulares, dando origem aos canais representados.

Com relação aos diâmetros dos canais estes são relacionados a seguir.

- Canal 1 = 10mm
- Canal 2,3 e 5 = 17mm
- Canal 4 e 6 = 10mm (diâmetro efetivo, isto é com a mesma área da seção transversal que um canal circular com este diâmetro)



Figura 6.6 - Desenho de conjunto dos canais para o estudo de caso 2.

Com relação a simulação propriamente dita, foi necessário definir alguns parâmetros, os quais o software de CAE se refere como sendo condições de contorno, estas já descritas no capítulo 5.

Para esta simulação utilizou-se as seguintes condições de contorno:

a) Material do molde: Aço AISI P20 para todo o molde;

b) Fluido de resfriamento: Água

c) Temperatura da água: 1°C

d) As vazões utilizadas foram, para:

- Canal 1 = 15 litros por minuto;
- Canais 2 e 3 = 32 litros por minuto;
- Canais 4 e 6 = 18 litros por minuto;
- Canal 5 = 32 litros por minuto.

A etapa de análise dos resultados da simulação é apresentada e discutida no capítulo 7, levando em conta as recomendações descritas no capítulo 5.

6.2.3 - ANÁLISE DE RESFRIAMENTO PARA O MOLDE MODIFICADO

Para demonstrar a utilização dos resultados de uma simulação para otimizar a construção do molde, foi feita uma modificação no circuito original, retirando-se o canal 1 do molde realizando uma nova simulação, seguindo os mesmos passos já descritos, e comparando os resultados desta simulação com os resultados do circuito original, o que é apresentado no capítulo 7.

6.2.4 - ANÁLISE DE RESFRIAMENTO COM TEMPERATURA DO FLUIDO DE RESFRIAMENTO MAIS ELEVADA

Esta análise foi realizada com o intuito de avaliar os efeitos da elevação da temperatura do fluido de resfriamento. Para isto, utilizou-se o molde com o circuito original e utilizou-se água a 16°C, fazendo com que a temperatura média das paredes da cavidade ficasse em 20°C. As análises foram realizadas utilizando-se a mesma seqüência de etapas dos casos anteriores, os resultados foram comparados com os fornecidos pela análise do molde com água a 1°C, e também são apresentados no capítulo 7.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1

No estudo de caso 1, foram realizadas simulações do comportamento do sistema de resfriamento com base em cálculos realizados pelo método analítico proposto no capítulo 5 e apresentados no capítulo 6, com o intuito de comparar os resultados obtidos com os fornecidos por um software de CAE.

7.1.1 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram comparados segundo os seguintes critérios: tempo de resfriamento, diferença de temperatura entre a saída e a entrada dos canais de resfriamento e distribuição de temperatura nas paredes do molde, apresentados a seguir.

7.1.1.1 - Tempo de Resfriamento

A análise foi feita comparando os resultados calculados através da equação 5.1 com os obtidos na simulação via CAE, apresentados na figura 7.1.

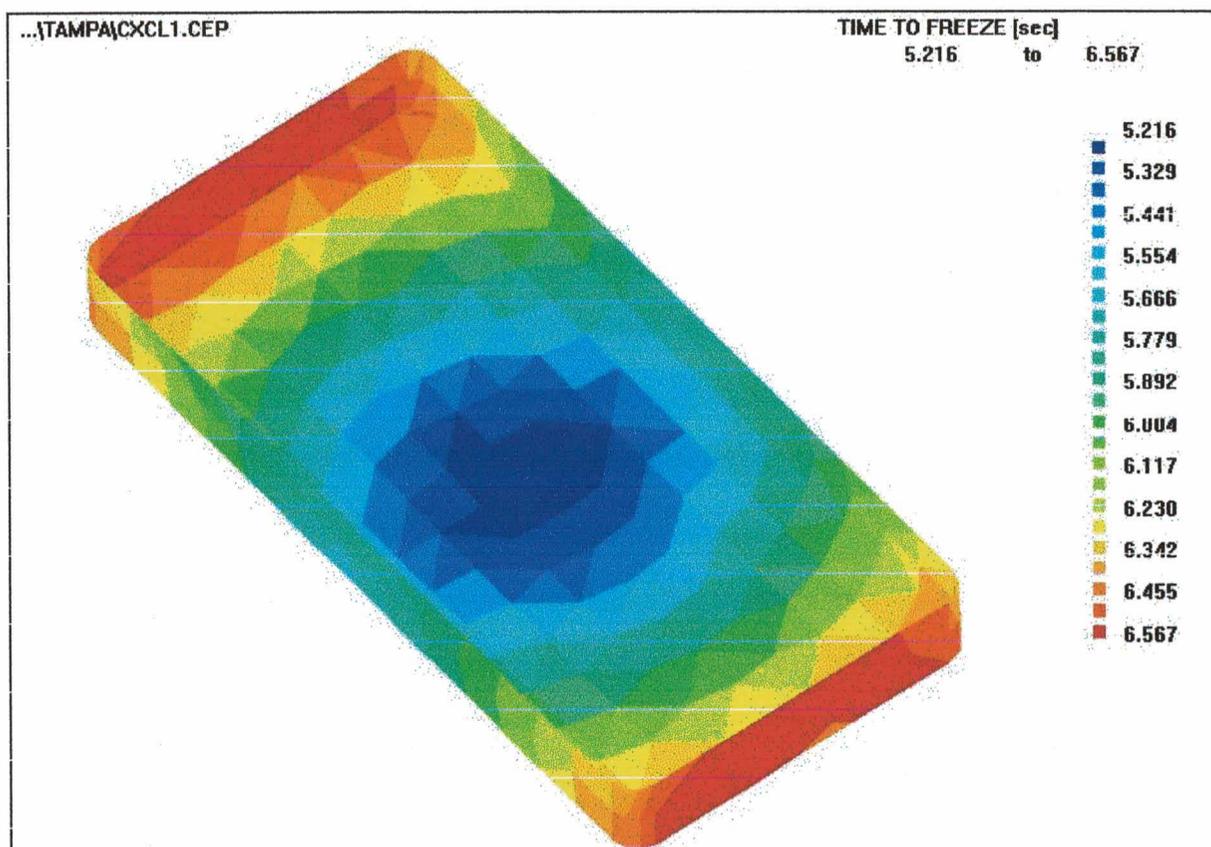


Figura 7.1 - Tempo de resfriamento para a peça do estudo de caso 1.

Segundo a equação 5.1 e a tabela 6.1, o tempo calculado de resfriamento pelo método analítico foi de 7,9 segundos, sendo que o tempo máximo fornecido pelo software de CAE foi de 6,5 segundos, dando uma diferença de 1,4 segundos, ou seja, de 21,5%. Apesar de ser uma diferença considerável em termos

absolutos, o resultado fornecido pelo método fornece uma idéia da ordem de grandeza para este valor.

7.1.1.2 - Diferença de Temperatura entre a Saída e a Entrada dos Canais de Resfriamento

Na realização da simulação pelo método analítico, foi arbitrado um número de Reynolds de 10000, pois a partir deste valor o fluxo de fluido pode ser considerado completamente turbulento [42]. Na simulação numérica, também arbitrou-se o valor do número de Reynolds como 10000, obtendo-se vazões idênticas pelos dois métodos.

Com relação à diferença de temperatura entre a saída e a entrada dos canais de resfriamento, o valor arbitrado na simulação analítica foi de 5°C. Como resultado da simulação numérica esta diferença de temperatura foi de 4,8°C no canal de resfriamento do macho, e 5,1°C no canal de resfriamento da fêmea, dando uma diferença percentual de 2% no macho e 4% na fêmea, podendo considerar bem satisfatório os resultados fornecidos pelo método analítico.

7.1.1.3 - Distribuição de Temperaturas nas Paredes do Molde

Segundo a simulação analítica, a peça teria um diferencial de temperaturas de 1,4°C no macho e 1,4°C na fêmea, como mostrado na tabela 6.1. Os resultados obtidos pela simulação numérica são apresentados nas figuras 7.2 e 7.3.

Na figura 7.2 é apresentada a distribuição de temperaturas no macho, com valores variando de $53,6^{\circ}\text{C}$ a $59,3^{\circ}\text{C}$, com um diferencial de $5,7^{\circ}\text{C}$.

Deve-se reparar que o diferencial de temperatura na parte plana da peça é de $2,4^{\circ}\text{C}$, ou seja, 1°C a mais que o encontrado pelo método analítico, o que em termos absolutos é uma diferença pequena.

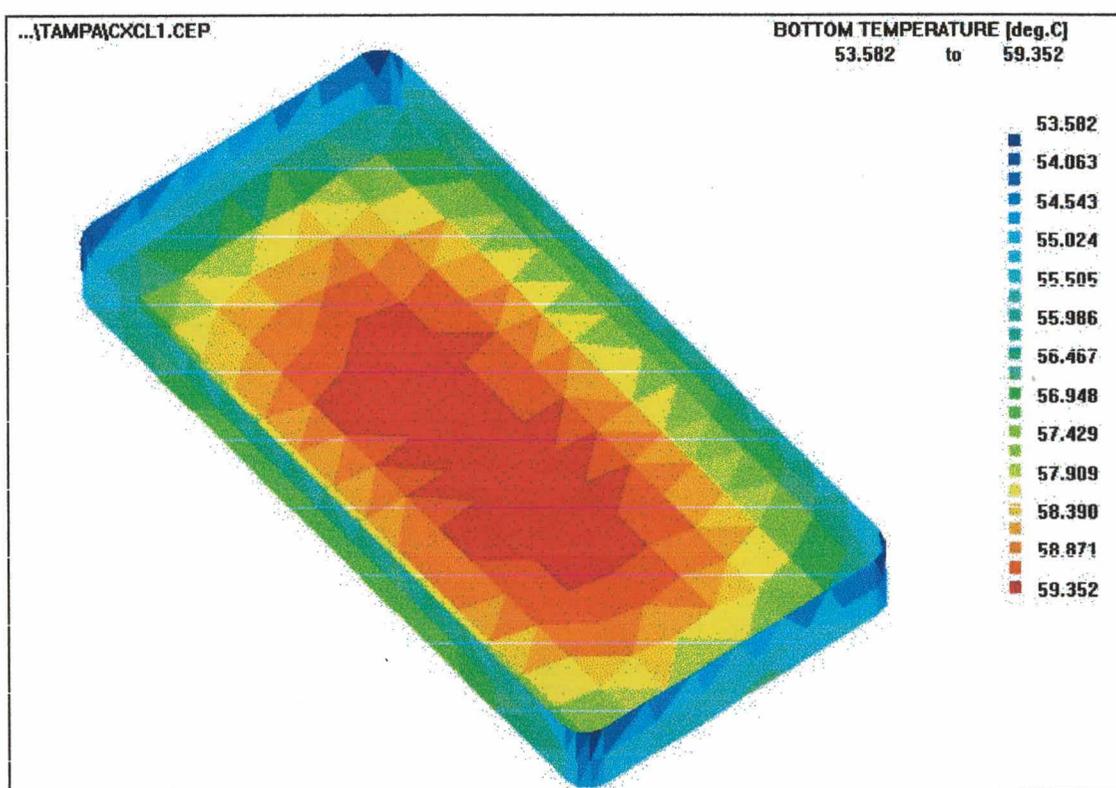


Figura 7.2 - Distribuição de temperatura nas paredes do macho.

Na figura 7.3, é apresentada a distribuição de temperaturas para a fêmea. Repetiu-se o ocorrido no macho, ou seja, o diferencial de temperatura encontra-se com valores entre $58,2^{\circ}\text{C}$ e $64,3^{\circ}\text{C}$. Na face plana, apresentou uma distribuição mais

homogênea, variando de $60,9^{\circ}\text{C}$ a $62,5^{\circ}\text{C}$, ou seja, uma diferença de $1,6^{\circ}\text{C}$, bem próximo dos $1,4^{\circ}\text{C}$ do método analítico.

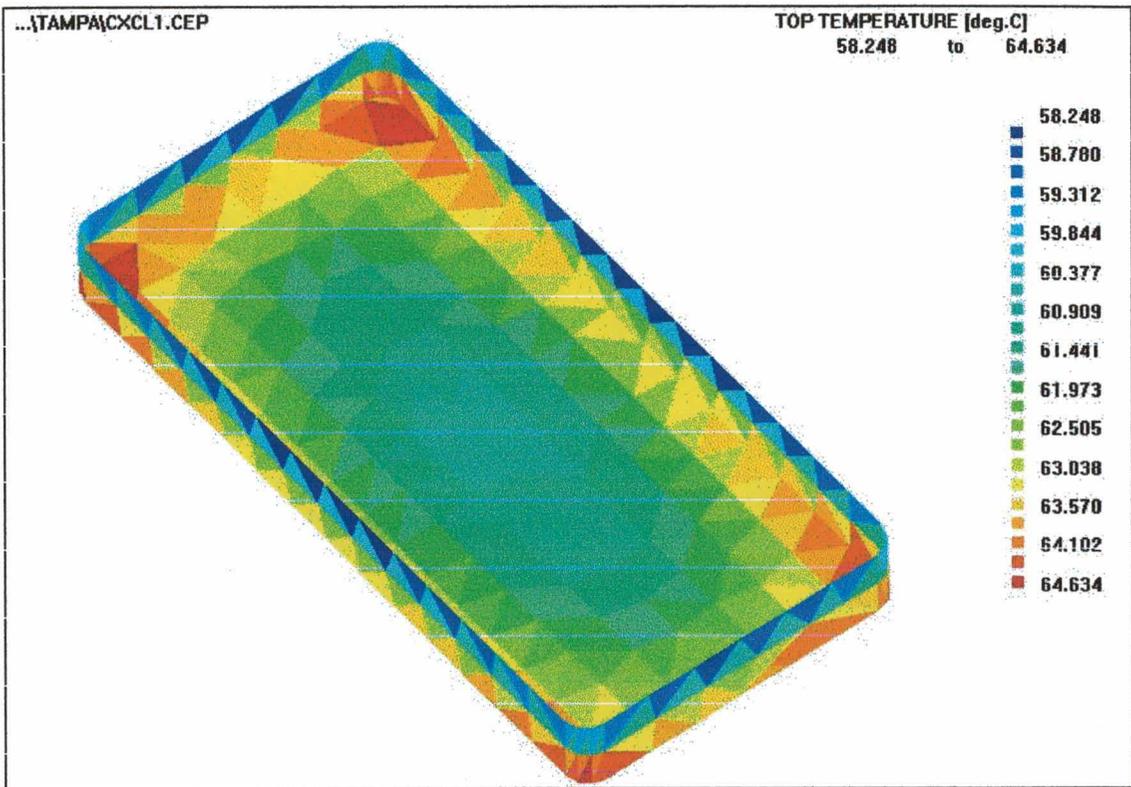


Figura 7.3 - Distribuição de temperatura nas paredes da fêmea.

A diferença de valores entre estes dois métodos pode ser explicada devido a simplificações geométricas, como por exemplo, não considerando as bordas da peça, e também ao fato de se desprezar o aquecimento do material injetado devido ao fluxo, fatores considerados no método numérico e desprezados no método analítico.

7.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2

Como já descrito no capítulo 6 este estudo de caso foi dividido em 3 fases, cujos resultados são apresentados a seguir.

7.2.1 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MOLDE ORIGINAL

A avaliação foi feita levando-se em conta os fatores apresentados no capítulo 5, ou seja:

- Pontos quentes localizados, isto é, regiões com resfriamento insuficiente.
- Diferença de temperatura entre as faces do molde.
- Diferença de temperatura do fluido refrigerante entre a entrada e a saída dos canais de resfriamento.
- Perda de carga nos canais de resfriamento.

Com base no resultado da simulação do sistema de resfriamento do molde original, apresentado na figura 7.4, analisando os fatores citados, tem-se:

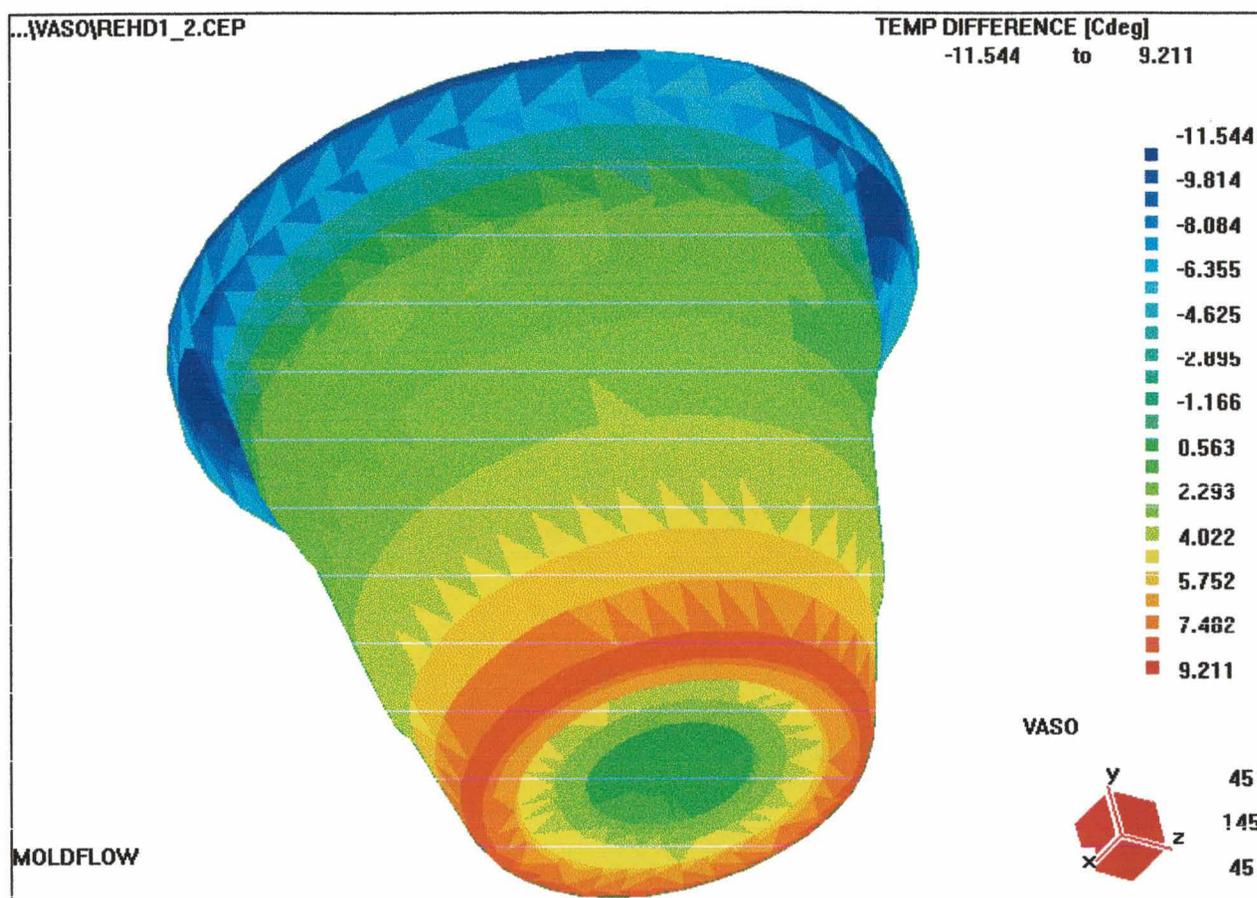


Figura 7.4 - Distribuição do diferencial de temperatura entre a fêmea e o macho do molde.

a) Quanto aos Pontos Quentes

Não houve pontos quentes significativos, que comprometessem a moldagem da peça, uma vez que a peça escolhida não apresentava regiões onde a retirada de calor fosse realmente crítica.

b) Quanto ao diferencial de temperatura

Na borda superior da peça, como se pode ver na figura 7.4, existe um diferencial de temperatura de $11,5^{\circ}\text{C}$ entre a fêmea e o macho. Lembrando dos capítulos anteriores, o diferencial recomendado é de 5°C . Como consequência disto pode surgir um empenamento devido a contração na seção transversal, já

explicado no capítulo 3, deformando a peça nesta região. Na região da borda inferior ocorre um diferencial de temperatura de $9,2^{\circ}\text{C}$ entre o macho e a fêmea, podendo causar alguma deformação pelo mesmo motivo já apresentado.

Mesmo estando acima do indicado por algumas literaturas, por se tratar de uma peça sem a necessidade de pequenas tolerâncias dimensionais é possível considerar um diferencial de temperatura de 10°C [44]. Portanto, sob esta consideração, o projeto pode ser considerado como aceitável, mesmo podendo apresentar deformações¹ que não comprometerão o uso do produto.

c) Quanto a diferença de temperatura do fluido de resfriamento entre a sua entrada no canal e sua saída.

Não houve problemas deste tipo. O maior diferencial ficou na ordem de $1,6^{\circ}\text{C}$, valor este obtido dos resultados do software de CAE Moldflow, sendo que o máximo recomendado é de 5°C .

d) Quanto às perdas de carga nos canais.

No canal 5, a perda de carga atingiu o valor de 134 KPa, como mostra a figura 7.5. Este valor não é comprometedor pois é facilmente vencido com as bombas de recalque comumente utilizadas na indústria.

¹ Estas deformações podem ser quantificadas com o auxílio de softwares de CAE para avaliação do empenamento, como o MF-WARP da Moldflow.

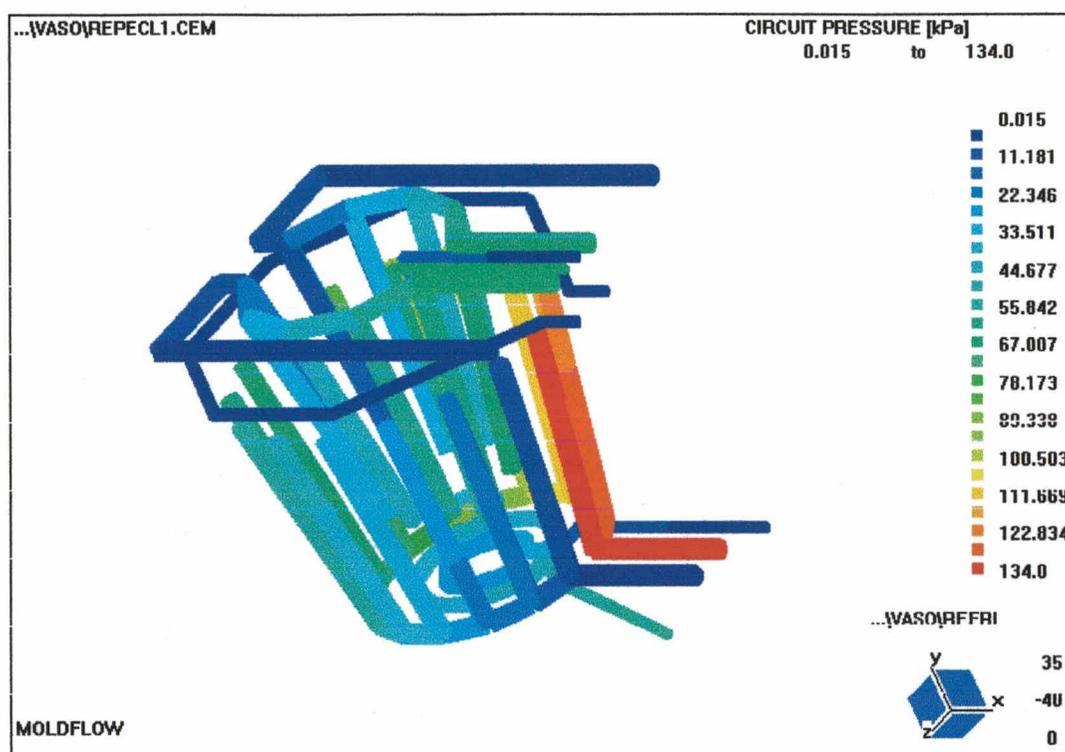


Figura 7.5 - Perda de carga nos canais de resfriamento.

7.2.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MOLDE MODIFICADO

Como proposto no capítulo 6, realizou-se uma simulação considerando o molde sem o canal 1. A distribuição da diferença de temperaturas das paredes do molde é apresentada na figura 7.6.

Analisando a distribuição de temperaturas, nota-se que o diferencial varia agora de 11,6°C até 6,78°C, contra 11,5°C até 9,2°C do molde original, ou seja, um resultado tão bom quanto o anterior.

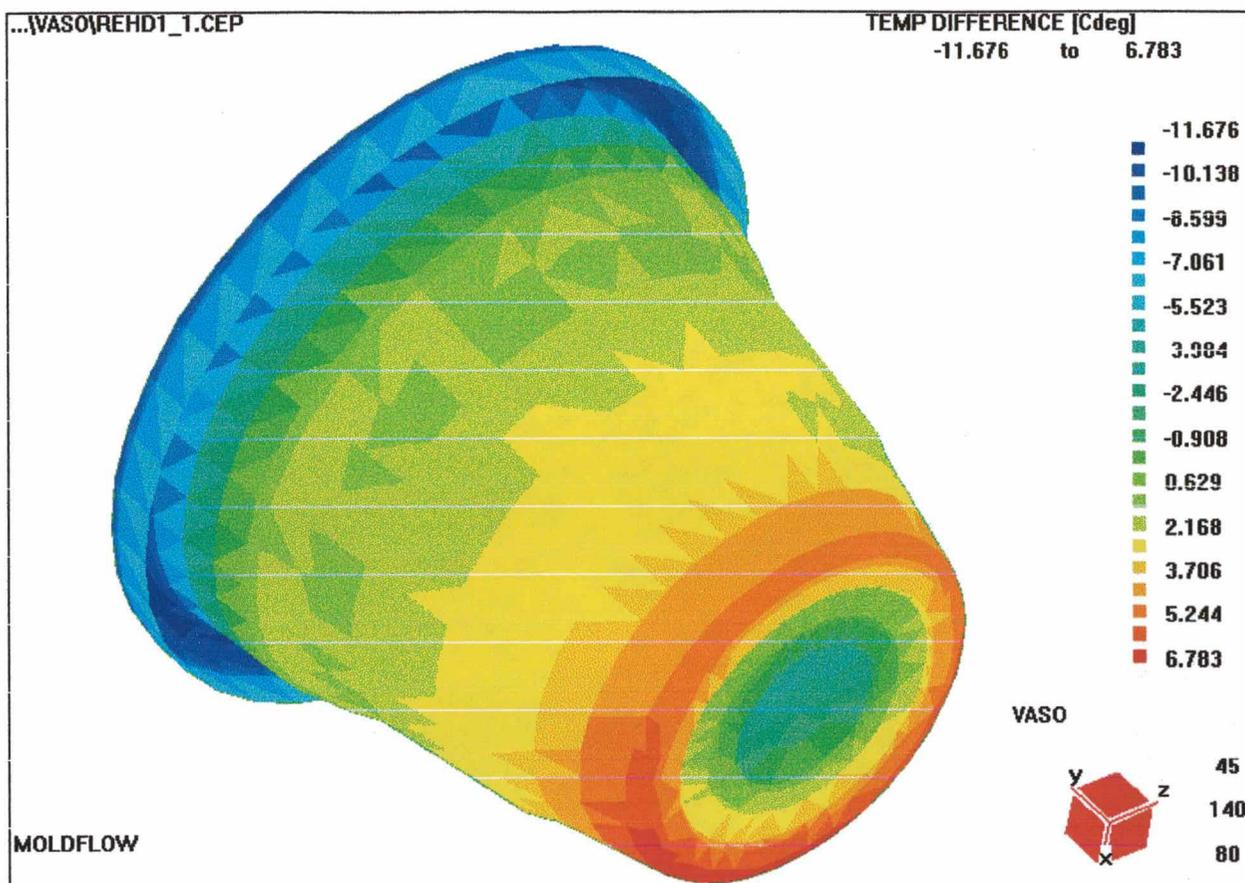


Figura 7.6 - Distribuição do diferencial de temperatura das paredes da cavidade do molde com o canal 1 desativado.

Entretanto, a eliminação do canal 1 traz como vantagens utilizar menos água gelada e poupar tempo no "set-up" do molde, por não precisar conectar algumas mangueiras extras, além de, no caso do molde se encontrar ainda em projeto, poupar tempo de usinagem, reduzindo custos e prazos de entrega para o molde acabado.

7.2.3 - ANÁLISE DE RESFRIAMENTO COM A TEMPERATURA MAIS ELEVADA DO FLUIDO DE RESFRIAMENTO

Analisando-se o molde original, com as mesmas vazões de água, mas agora utilizando água a 16°C, tem-se o tempo de

resfriamento apresentado na figura 7.7, que pode ser comparado com o tempo de resfriamento obtido com água a 1°C da figura 7.8.

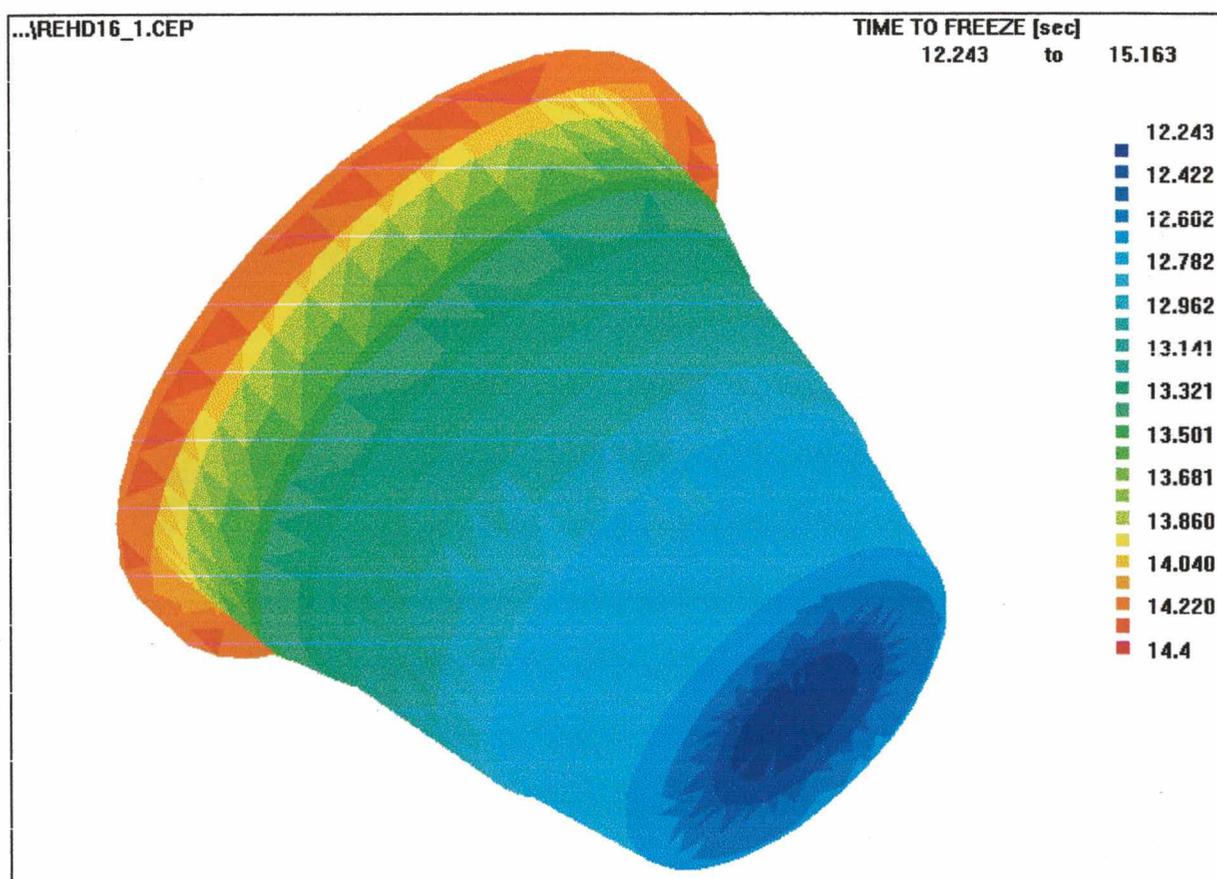


Figura 7.7 - Tempo de resfriamento com água a 16°C para a peça do estudo caso 2.

Com aumento da temperatura da água de 1°C para 16°C, o tempo de resfriamento aumentou de 13,1 segundos para 14,4 segundos, ou seja, 1,3 segundos no tempo de resfriamento, e, por conseguinte no tempo de ciclo. Um ganho de aproximadamente 5,8% no tempo total de ciclo, considerando o tempo de injeção de 1,7 segundos, o de recalque de 1 segundo e o tempo de abertura e extração sendo de 6 segundos. Ganho este que não pode ser desprezado.

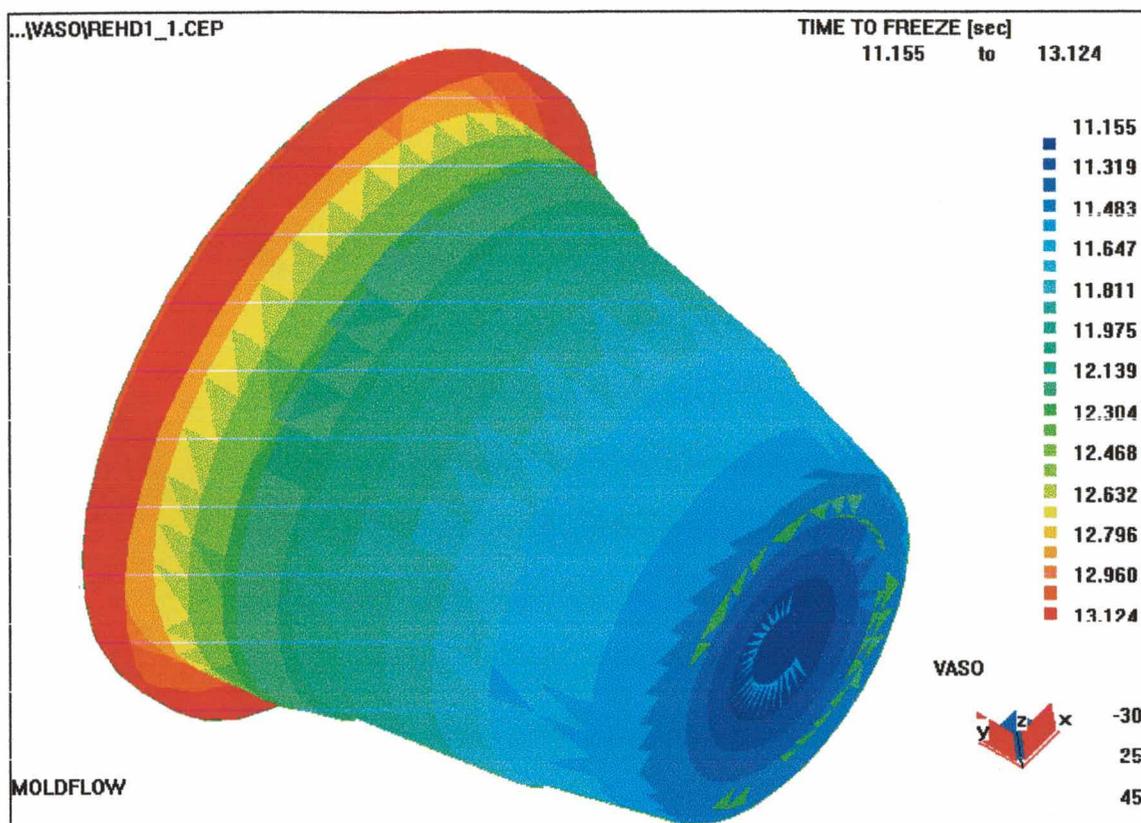


Figura 7.8 - Tempo de resfriamento com água a 1°C para a peça do estudo caso 2.

Contudo deve-se fazer uma análise da viabilidade de se utilizar água gelada (1°C), levando em conta os custos desta opção. Para fornecer água a esta temperatura, é necessária a utilização de um refrigerador ou "chiller", o qual terá a função de resfriar a água.

Gastos com compra de equipamentos, linhas de distribuição com isolamento térmico e energia para resfriar a água devem ser levados em conta.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

8.1 - CONCLUSÕES

Tendo em vista o que foi apresentado neste trabalho, pôde-se chegar as seguintes conclusões:

1. As condições de injeção não agem individualmente sobre as propriedades da peça, mas sim, para um conjunto de condições, obtêm-se características específicas. Dentre as condições de processamento consideradas no trabalho, ou seja, vazão volumétrica, temperatura de injeção e temperatura do molde, esta última é a única que depende do projeto do molde, ou seja, é fortemente dependente do traçado dos canais que constituem o sistema de resfriamento.
2. Podem ser feitos projetos bem razoáveis dos canais de resfriamento empiricamente, com base em recomendações, porém isto necessita de uma grande experiência por parte do projetista, significando que este deve possuir muito

conhecimento em projetos, adquiridos em muito tempo de atividade na área. Para não depender dos conhecimentos de apenas alguns profissionais, o uso de métodos de avaliação do traçado proposto é um hábito a ser incentivado.

3. Os métodos analíticos apesar de fornecerem resultados que permitem um ajuste mais grosseiro do traçado do circuito de resfriamento, não apresentam resultados confiáveis o suficiente para proporcionar um ajuste fino destes. Em linhas gerais, o método analítico proposto parece ter cumprido com o seu papel de mostrar ordens de grandeza, para os valores utilizados no projeto do sistema de resfriamento de moldes, compatíveis com os fornecidos pelo software de CAE.
4. Os softwares de CAE apresentam resultados que permitem avaliar e refazer o projeto do sistema de resfriamento, auxiliando o projetista sem muita experiência no projeto deste. Porém, a versão do software de CAE utilizado nos estudos de caso apresentou limitações quanto ao modelamento dos canais, não permitindo a utilização de certas geometrias que dependam de divisão do fluxo de fluido de resfriamento.
5. Os resultados das simulações são fortemente dependentes da escolha do material correto, não bastando saber somente qual material é utilizado (como polipropileno, por exemplo). As características dos materiais e, conseqüentemente, os resultados das simulações dependem do grau do material, ou

seja de suas características reológicas, térmicas, Peso molecular médio, etc.

6.2 - SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Como sugestões para novos trabalhos, pode-se citar:

1. Comparação dos resultados obtidos no software de CAE e método analítico com resultados práticos.
2. Estudo do aquecimento para polímeros termofixos.
3. Estudos sobre a influência das condições de processamento nas propriedades mecânicas e ópticas das peças moldadas
4. Um estudo mais aprofundado sobre os mecanismos de empenamento, relacionando condições de processamento e graus de deformação na peça moldada.
5. Estudo do fenômeno do resfriamento no processo de injeção de pós metálicos (PIM).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] THIENEL, P. , JEHN, P. & HOLTHOFF, B., Werkzeuge Rechnerisch Auslegen, Kunststoffe, vol. 82, pp. 301-305 (1994) 4.
- [2] WHELAN, T. & GOFF J., Injection molding of engineering thermoplastics, van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [3] MALLOY, R. A., Plastic Part Design for Injection Molding, Hanser Publishers, Munique, 1994.
- [4] MCCRUM, N. G. & BUCKLEY, C. P., Principles of Polimer Engineering. Oxford Science Publication, Oxford, 1988.
- [5] TADMOR, Z. & GOGOS C. G., Principles of Polymer Processing, John Wiley & sons, Nova York, 1979.
- [6] POUZADA, A. S., Termoplásticos para Injecção - parte 2 - Plásticos de Engenharia Amorfos. O Molde, Marinha Grande, no. 10 , setembro 90.
- [7] POUZADA, A. S., Termoplásticos para Injecção - parte 3 - Plásticos de Engenharia Semi-Cristalinos. O Molde, Marinha Grande, no.11, março 91.
- [8] ROSEN, S. L., BARNES & NOBLE, Materials for Practicing Engineers, John Wiley & sons, New York, 1971.

- [9] ROSEN, S. L., Fundamental Principles of Polimeric Materials, 2o. ed., John Wiley & sons, New York, 1993.
- [10] CALLISTER, W. D., Materials Science and Engineering. An Introduction, 3o. ed, John Wiley & sons, New York, 1994.
- [11] THRONE, J. L., Thermoforming, Hanser publisher, Munich, 1987.
- [12] STRUICK, L., Residual Stress in Polimers, John Wiley & sons, New York, 1986.
- [13] BRITO, A. M. C., Simulação do Escoamento de Termoplásticos em Placas moldadas por injeção, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães, 1995.
- [14] AUSTIN, C., Moldflow Design Principles, Moldflow Pty Ltd, Victoria, Austrália.
- [15] AUSTIN, C., Warpage Design Principles - Making Accurate Plastics Parts, Moldflow Pty Ltd, Victoria, Austrália, 1991.
- [16] HARADA, J., Moldagem por Injeção - Projetos e Princípios Básicos, Medialdêa Editora Ltda., 1991, São Paulo.
- [17] D'ÁVILA, M. A., Processo de Moldagem por Injeção de polímeros Semicristalinos - Caracterização e Simulação Assistida por Computador, Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, 1997.
- [18] DIHLMANN, C., Simulação e Análise do Preenchimento de Cavidades em Moldes para Injeção de Termoplásticos Utilizando Método Manual e tecnologia CAE/CAD, Dissertação de mestrado, UFSC, 1993.
- [19] HSIUNG, C.M., Processing Structure Property Characteristics of Slowly Crystallizing Engineering Polymers, Trip, vol 4, no. 10, Outubro 1996.
- [20] VIANA, J. C., Impact Performance of Injection moulded PP Plates, 12° Encontro anual do Sociedade de Processamento de Polímeros, Sorrento, 407-408 (1996).

- [21] CUNHA, A. M., The Impact Behaviour of Polypropilene and the Injection-Moulding Conditions. ESIS 19, Mechanical Engineering Publications, Londres, 315-325 (1995).
- [22] MENGES, G. & MOHREN P., How to Make Injection Molds, Hanser publisher, 3.ed., Munich, 1993.
- [23] MICHAELI, W. et alli, Tecnologia dos Plásticos, editora Edgard Blücher, São Paulo, 1995.
- [24] GLASTROW, H., 108 Molds Proven Design, Hanser publisher, Macmillan, 1982.
- [25] BERNHARDT, H., CAE-Computer Aided Engineering for Injection Molding, Hanser Publishers, Munich, 1985.
- [26] CURVER GROUP, Molds Standards, 1986.
- [27] ELETRULUX PLASTCENTER, Design Instructions, 1988.
- [28] GLANVILL, A. & DENTON E., Moldes de Injeção, Princípios Básicos e Projeto, editora Edgard Blucher, 2 ed., São Paulo, 1989.
- [29] KENNER GROUP, Tooling-Policies and Procedures, 1982.
- [30] ISOTERIX, Products Catalog, Northumberland, 1997.
- [31] KONA CORPORATION, Heat Pipe Technology, Gloucester, 1990.
- [32] AMPCO METAL, Save Time and Money with AMPCO alloys in the Plastic Industry
- [33] REROM, Catálogo de Produtos, 1996.
- [34] HASBRO, Design standards - Section D Water Cooling. 1988.

- [35] KRAUSS MAFFEI, Injection Moulding technology. 1990.
- [36] BLASS, A., Processamento de Polímeros, Editora da UFSC, 3.ed.- Florianópolis, 1988.
- [37] GAVIN, M & HAIN, D., How to Eliminate Warpage and Residual Stresses from Injection Molded Plastic Parts, Moldflow PTY LTD, 1992.
- [38] KANTZ, M.R. et alli, The Skin-core Morphology and Structure-Property Relationship in Injection-Molded Polypropylene, Journal of Applied Polymer Science, vol.16, pp.1249-1260 (1972).
- [39] TEIXEIRA, J.C.; TEIXEIRA, S.F. & CUNHA, A.M., Modelling the Thermal Behavior of Moulds during the Injection Moulding Cycle. Nuphymat'96, Sophia-Antipolis, junho 1996.
- [40] ROSATO, Donald V. & ROSATO, Dominick V., Injection Molding Handbook, 2o.ed., Chapman & Hall, New York, 1995.
- [41] ROSATO, Dominick V., Rosato's Plastics Encyclopedia and Dictionary, Hanser publisher, Munich.
- [42] INCROPERA, F. P. & DE WITT, D. P., Introduction to Heat Transfer, 2o.ed., John Wiley & sons, New York, 1990.
- [43] ZÖLLNER, O., Thermal Mould Design, Bayer AG, Leverkusen 1993.
- [44] REES, H., Mold Engineering, Hanser Publisher, Munich, 1995.