

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS EM
MOLDES – ESTUDO COMPARATIVO DE ALGUNS MODELOS
COMPUTACIONAIS**

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

AKIKO ROCHA NISHIMOTO

Florianópolis, Fevereiro de 2001

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS EM
MOLDES - ESTUDO COMPARATIVO DE ALGUNS MODELOS
COMPUTACIONAIS**

AKIKO ROCHA NISHIMOTO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Clovis Raimundo Maliska, Ph. D., Orientador

Prof. Júlio Cesar Passos, Dr. Sci., Coordenador do PPGEM

Banca Examinadora

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. Mec. (EMC/UFSC), Presidente

Prof. André Ogliari, Dr. Eng. Mec. (EMC/UFSC)

Profa. Rosario E. S. Bretas, Ph. D., UFSCar

AGRADECIMENTOS

Vários agradecimentos devem ser feitos neste momento tão importante, de forma que consiga registrar a imensa gratidão que tenho por aqueles que me acompanharam neste longo período.

Agradeço ao professor Clovis Raimundo Maliska pela paciência e incentivo em todos os momentos e pelo bom senso e experiência presente em todas as conversas ao longo destes anos.

À SOCIESC, a Sandro Murilo dos Santos e às outras pessoas que lá trabalham, pela oportunidade de enriquecer esta dissertação com aspectos práticos, pelo apoio e pela amizade. Da mesma forma, gostaria de agradecer ao Laboratório de Processamento de Polímeros do DEMa/UPSCAR, ao professor Joaquim de Sylos Cintra Fo por permitir que a parte experimental do trabalho fosse desenvolvida no laboratório. Ao técnico Mario D. Miranda, que nos auxiliou nesta tarefa e em especial, gostaria de agradecer a Marcelo Ueki pela ajuda inestimável no desenvolvimento deste capítulo.

Aos amigos de Florianópolis, que se dispersaram, seguindo cada um seu caminho, mas que transformaram este período em uma alegre lembrança que sempre estará comigo.

À SMARTtech e às pessoas que lá trabalham, pela compreensão e ajuda nestes momentos finais.

Ao Luciano, que me acompanhou desde o início desta jornada, por todas as cidades, com amor e paciência, me incentivando e me cobrando em momentos decisivos. Seu apoio e compreensão foram muito importantes para me manter neste caminho.

E finalmente, aos meus pais, a quem dedico este título. Deles, eu recebi muito mais do que esperava em todos os momentos da minha vida. Um dia, eles me disseram que a educação era a grande herança que poderiam me deixar. Não há forma mais sábia de se criar os filhos. Obrigada, por todo amor e dedicação que permitiram que eu chegasse até aqui.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
SIMBOLOGIA	viii
Arábicos.....	viii
Gregos.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. A Pesquisa sobre simulação em Injeção de Plásticos	5
2.2. Processo de moldagem por injeção	8
2.3. Características do Escoamento	11
2.3.1. Polímeros.....	11
2.3.2. Reologia e Propriedades dos Polímeros	13
2.3.3. O escoamento de plásticos.....	27
2.3.4. Fatores influentes no escoamento.....	29
3. Modelos Matemáticos	33
3.1. Equações governantes	33
3.2. Simplificações e Métodos Numéricos.....	33
3.2.1. Moldflow Plastics Insight.....	34
3.2.2. C-mold Advanced Solutions.....	42
3.2.3. Programa desenvolvido no SINMEC	46
4. Casos Estudados	48
4.1. Previsão da Posição do Encontro da Frente de Avanço.....	48
4.1.1. Polímero utilizado e Modelos de viscosidade	48

4.1.2 – Geometria do modelo e da peça real	50
4.1.3 - Resultados	52
4.2 – Preenchimento de um Disco com Injeção Central.....	54
4.3. Injeção de um semi-anel com diferentes espessuras.....	65
4.4 -Injeção em uma cavidade espiral.....	71
5. Conclusão	85
6. Referências Bibliográficas	88
APÊNDICE.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina injetora e componentes das unidades de fechamento e de injeção. (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1991).....	8
Figura 2 – Polímeros amorfos, semi-cristalinos, líquido-cristalinos e termofixos (MALLOY, R. A., 1994 e MORALES, A. R., 1990).....	13
Figura 3 – (a) Deformação por cisalhamento e (b) deformação por alongação.	15
Figura 4 – Curva típica de viscosidade <i>versus</i> taxa de cisalhamento de um polímero fundido e de um fluido Newtoniano.	17
Figura 5 – a) O líquido viscoso deforma continuamente sobre aplicação de carga cisalhante. b) O sólido elástico ideal deforma imediatamente sob aplicação da carga e recupera sua forma original. c) O polímero fundido deforma continuamente como o líquido mas recupera apenas parcialmente a deformação. (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994).....	18
Figura 6 – Viscosidade versus taxa de cisalhamento em escala logarítmica.....	20
Figura 7 – Curva de viscosidade criada pelo modelo Moldflow de Segunda Ordem.	24
Figura 8 – Curva PVT esquemática para polímeros (a) amorfos e (b) semi-cristalinos,	27
Figura 9 – Fluxo em chafariz (BRITO, A. M., 1995).....	29
Figura 10 – Efeito da temperatura de injeção na pressão 31	31
Figura 11 – Efeito do tempo de preenchimento na pressão e temperatura..... 32	32
Figura 12 – Sistema coordenado para a cavidade de um molde (KENNEDY, P., 1995) 36	36
Figura 13 – Camada Solidificada (KENNEDY, P., 1995)..... 38	38
Figura 14 – Canal de injeção circular 39	39
Figura 15 – Malha de elementos finitos (MALISKA, C. R., 1995)..... 41	41
Figura 16 – Diagramas de Voronoi (MALISKA, C. R., 1995)..... 46	46
Figura 17 – Viscosidade em função da Taxa de Cisalhamento para modelo de viscosidade (a) Cross-WLF usado no C-Mold e (b) de Segunda ordem do Moldflow. 49	49
Figura 18 – (a) Dimensões em mm e posição dos transdutores de pressão na peça (HIEBER, C.A. <i>et al</i> , 1983). (b) espessuras e malha utilizadas na simulação..... 51	51

Figura 19 – Comparação entre as frentes de avanço e as linhas de soldas previstas nos <i>softwares</i> Moldflow e C-Mold e em resultados experimentais.	52
Figura 20 – Pressão ao longo do tempo para o resultado experimental, para os <i>softwares</i> Moldflow e C-Mold e para o programa desenvolvido por Hieber (1983).....	53
Figura 21 – Superfícies utilizadas como bases para as malhas usadas nesta seção.....	55
Figura 22 – Temperatura em função do tempo em nós de mesmo raio, calculada no <i>software</i> Moldflow. (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.	57
Figura 23 – Isobáricas e Isotermas no final do preenchimento para (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3. Resultados obtidos no <i>software</i> Moldflow	58
Figura 24 – Temperatura em função do tempo em nós de mesmo raio, calculada no <i>software</i> C-Mold. (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.....	59
Figura 25 – Isobáricas e Isotermas no final do preenchimento para (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3. Resultados obtidos no <i>software</i> C-Mold.....	60
Figura 26 – Pressão, temperatura e temperatura ao longo do tempo para malhas 4 e 5, obtidas no <i>software</i> Moldflow.	63
Figura 27 – Pressão, temperatura e temperatura ao longo do tempo para as malhas 4 e 5, calculadas pelo C-Mold.....	64
Figura 28 – Modelo do semi-anel utilizado neste terceiro estudo.	66
Figura 29 – Curva de viscosidade do HOST ACOM M2N02.....	67
Figura 30 – Pressão em função do raio no tempo de 0.76s, para os semi-anéis de (a) 5mm, (b) 10mm e (c) 20mm.	68
Figura 31 – Pressão em função da temperatura do molde adotada na condição de contorno. .	69
Figura 32 – Máquina Injetora Arburg 370 V (NRPP/UFSAR, 2000).....	71
Figura 33 – Desenho da espiral injetada com canal de alimentação.	72
Figura 34 – Resultado do Moldflow e experimental para a condição de processo A.	74
Figura 36 – Resultado do Moldflow e experimental para a condição de processo C.....	76
Figura 37 – Disposição dos canais de refrigeração do molde.(FLORES, 1996).....	78
Figura 38 – Vazão em função do volume preenchido para a condição C.	81

SIMBOLOGIA

Arábicos

A	área
A_i, \tilde{A}	coeficientes experimentais de modelo de viscosidade
B	coeficiente experimental de modelo de viscosidade
C_i	coeficientes experimentais de modelo de viscosidade
c_v	calor específico a volume constante
c_p	calor específico a pressão constante
D	diâmetro
De	número de Deborah
D_i	coeficiente experimental de modelo de viscosidade
g	aceleração da gravidade
h	medida entre a linha de centro e camada congelada na direção z
\bar{I}	tensor unitário
k	condutividade térmica
L	comprimento da cavidade
m	massa
m	consistência
n	índice de potência
p	pressão
Q	calor
r	raio
S	fluidez
t	tempo
T	temperatura
v_x, v_y, v_z	velocidade nas direções x , y e z

x, y, z eixos coordenados

Gregos

τ tensão

$\dot{\gamma}$ taxa de cisalhamento

β coeficiente experimental de modelo de viscosidade

β coeficiente de expansão volumétrica

μ viscosidade

η função viscosidade

λ tempo de relaxação

Φ função potencial

κ compressibilidade

ρ densidade

Λ gradiente de pressão

RESUMO

O presente trabalho dedicou-se à comparação das metodologias e simplificações usadas na análise de preenchimento de moldes dos *softwares* Moldflow e C- Mold e de um programa desenvolvido no SINMEC utilizando problemas testes simples. Assim sendo, pretende-se entender melhor as metodologias numéricas e limitações desses programas decorrentes das simplificações feitas em seus códigos e contribuir para a utilização fundamentada de *softwares* comerciais amplamente usados na indústria de plásticos. Para estes testes foram estudados os seguintes casos:

- a) preenchimento de um disco circular com injeção central,
- b) previsão da frente de avanço e da posição da linha de solda de geometria retangular com furo,
- c) preenchimento de semi- anel circular com espessuras diferentes e
- d) comparação de resultados experimentais e numéricos do comprimento de fluxo em cavidade espiral.

O trabalho também discute alguns aspectos do uso desta tecnologia na indústria atualmente, como as dificuldades encontradas, os benefícios e as expectativas de desenvolvimentos nesta área.

ABSTRACT

The purpose of this work is the comparison of methodologies and simplifications used on injection molding simulation of Moldflow and C-Mold *software* and a code developed at SINMEC, using simple problems. In this way, it is possible to understand better the numerical methodologies and limitations of the *software* available on the industrial environment. The following cases were studied in this work:

- a) filling of a circular disk centered gated,
- b) prediction of flow front and weld lines for a rectangular geometry with a circular insert,
- c) filling of half of a ring with different thickness and
- d) the comparison of experimental and numerical results of the flow length of a spiral shape cavity.

This dissertation also discusses some aspects relative to the use of this technology on the plastics industry, such as the difficulties, benefits and developments on this domain.

1. Introdução

O processo de fabricação de peças através da injeção em moldes tem sido amplamente usado na produção de produtos plásticos. É um processo versátil, que permite desde a produção de pequenos componentes eletrônicos até a produção de grandes pára-choques para a indústria automotiva. Aproximadamente 32% de todo o material plástico processado no mundo é transformado através da moldagem por injeção (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994). Seu crescimento se deve em grande parte ao desenvolvimento de novos materiais plásticos e aos avanços na tecnologia do processo de injeção.

A injeção de polímeros é um processo cíclico e descontínuo que consiste na fusão do polímero através de aquecimento e injeção do material fundido em um molde. O polímero é então pressurizado na cavidade para garantir preenchimento dos detalhes. A pressão é mantida no recalque para que a contração do material seja compensada. A solidificação do material para estabilizar a forma é atingida através de resfriamento (termoplásticos) ou de reação química (termofixos). A peça é então extraída do molde, normalmente sem necessidade de operações posteriores de acabamento.

Neste processo, a confecção do molde representa uma etapa importante, influenciando diretamente na qualidade e custo do produto. O projeto de moldes para a injeção de plásticos é um processo difícil que requer conhecimentos em diversas áreas. O projetista deve ter uma grande capacidade de visualização da movimentação dos componentes do molde durante a abertura da máquina. Vários detalhes podem exigir uso de gavetas que se movimentam para permitir a extração da peça. O sistema de extração é acionado na abertura do molde, que por vezes possui uma placa flutuante que permite a separação automática da peça e dos canais de alimentação. Além desta boa noção em mecanismos, ele deve visualizar como a resina irá fluir, onde serão os pontos de encontro do fluxo e onde precisarão ser previstas saídas para o ar. Deve-se conhecer o tipo de material que será injetado, para definir quantos pontos serão necessários para a injeção da peça e as dimensões do sistema de alimentação. E, ainda, ele deve prever como será a troca térmica durante a moldagem, quando a resina aquecida ocupar a cavidade. Após o preenchimento, a peça precisa ser resfriada homoganeamente para solidificação e garantia da sua estabilidade dimensional.

Quando o molde estiver pronto e colocado na máquina injetora, as condições nas quais a peça será processada terão um efeito significativo na qualidade do produto, que engloba: seu

acabamento superficial, sua estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas e químicas finais do polímero.

Por isso, o processo de moldagem por injeção era uma espécie de arte, tão complexas eram essas relações. Porém, a partir dos anos 70, a necessidade crescente de peças de melhor qualidade provocou o interesse pelo modelamento matemático do processo de injeção.

Desde então, desenvolveu-se cada vez mais ferramentas computacionais que permitem a visualização de boa parte do processo antecipadamente. Existem programas para a simulação da movimentação de mecanismos, que alertam sobre problemas de interferência ou folga e permitem visualizar o funcionamento do molde. Alguns programas possibilitam a simulação da usinagem deste molde e auxiliam a determinação de uma estratégia de usinagem, definindo tempos, caminhos percorridos, trocas de ferramentas. Outros simulam o escoamento e compactação do polímero dentro da cavidade. Existem programas que calculam a troca térmica durante o processo, verificam a orientação das fibras, simulam qual será a contração e empenamento da peça após a injeção. E, ainda, programas que verificam se a peça terá o comportamento mecânico adequado quando estiver submetida às condições de funcionamento.

O principal objetivo de qualquer tipo de simulação é antecipar possíveis problemas para uma fase inicial do desenvolvimento de uma peça, onde a modificação do projeto ainda representa pouco investimento e nenhum atraso na data de lançamento do produto. A simulação também permite que a prática da "tentativa e erro" seja substituída pelo desenvolvimento de produtos através da aplicação dos fundamentos, teorias e modelos que representam o problema. Isto é a utilização do que aprende-se nas Ciências e Engenharia para otimizar o que é produzido, reduzir custos e aumentar qualidade. Através da simulação é possível que um profissional com pouca vivência na área de injeção, mas com uma boa fundamentação sobre os aspectos que envolvem o processo, possa desenvolver produtos de qualidade e ganhar uma experiência importante sobre a sensibilidade do processo aos fatores envolvidos, sem a necessidade de vivenciar inúmeros problemas e dificuldades.

Este trabalho trata de uma das simulações atualmente disponíveis para otimização das peças injetadas. A dissertação será desenvolvida no campo da simulação do processo de injeção de termoplásticos, fase de preenchimento da cavidade.

Os primeiros trabalhos sobre a simulação da injeção de peças plásticas foram publicados na década de 70 e hoje esta tecnologia é amplamente difundida na indústria, entretanto, a simulação nesta área encontra ainda algumas dificuldades a serem discutidas e

resolvidas. A primeira é a falta de bancos de dados completos de caracterização do material, principalmente de resinas nacionais. Qualquer modelamento requer muitos dados incluindo propriedades reológicas e térmicas numa grande faixa de taxas de deformação, temperaturas, pressões e condições de resfriamento. Os *softwares* comerciais possuem vastos bancos de dados contendo as propriedades de milhares de polímeros, porém um número muito pequeno de resinas nacionais estão incluídas. Os grandes fornecedores de polímeros caracterizam seus produtos assim que estes são produzidos em escala comercial, mas infelizmente, aqui no Brasil, isso ainda não é uma prática comum. Outro problema é a falta de um modelo reológico constitutivo seguro e único que possa ser usado em todos os estados físicos do polímero, do líquido ao sólido, pelos quais o material passa durante o processo. Existem vários modelos que são bem aceitos atualmente, na sua maioria desenvolvidos empiricamente e que apresentam algumas falhas em determinadas condições (THOMPSON *et ai*, 1998). Uma terceira dificuldade é que devido a competição comercial entre empresas que desenvolvem estes programas e sob a prerrogativa de resguardar informações que poderiam facilitar a imitação dos seus códigos, os *softwares* são fornecidos a seus usuários de forma hermética. Os manuais teóricos muitas vezes são incompletos criando um obstáculo ao entendimento da essência dos códigos, quais equações são resolvidas e suas simplificações. Os usuários, na maioria, são pessoas que trabalham na indústria, com um ritmo de produção alto. Eles checam a capacidade de predição de um código em particular, mas infelizmente, raramente os resultados são publicados por sua empresa. E então comparações entre os diferentes programas (que possuem o mesmo objetivo) não são divulgadas (ISAYEV, A. I.; 1987).

A presente dissertação tem suas atividades inseridas no projeto PRONEX, do Departamento de Engenharia Mecânica, que estuda o processo de injeção de peças plásticas e de pós-metálicos de forma integrada, ou seja, em um processo interdisciplinar na engenharia. Dentro deste contexto, uma das tarefas é a simulação dos processos de injeção de plásticos e pós-metálicos. O objetivo é dotar membros do projeto PRONEX da capacidade de responder com certa rapidez sobre detalhes da simulação de uma determinada peça real de engenharia. Duas alternativas são possíveis para atingir este objetivo. Uma delas é simplesmente fazer uso dos pacotes comerciais existentes, sem o domínio e o conhecimento da tecnologia numérica e das hipóteses presentes em um programa desta natureza. A outra é tentar desenvolver todas as ferramentas no laboratório, onde há o domínio das metodologias, e o conhecimento profundo do processo e suas limitações.

A primeira alternativa não confere ao grupo domínio e segurança do processo de simulação, mas tem o atrativo de ser rápida. A segunda guarda o domínio do processo mas é

extremamente lenta. Nesta dissertação, opta-se por uma alternativa intermediária, ou seja, aprender a fazer uso dos pacotes comerciais existentes, mas através de um processo de aprendizado que garanta o domínio das metodologias numéricas e dos modelos matemáticos embutidos no pacote e o conhecimento do processo físico que será simulado. Para isso, neste trabalho analisa-se os pacotes comerciais MoldFlow Plastics Insight 2.0 e C-Mold Advanced Solutions 99.1 e um programa que foi desenvolvido no SINMEC por Vasconcellos (1999) para simulação de injeção de plásticos. Para o aprendizado maior das reais condições de uso dos pacotes comerciais e contato com o setor de projetos e produção de moldes, parte da dissertação foi desenvolvida no Centro de Mecânica de Precisão de Joinville (CMPJ) da SOCIESC. O CMPJ possui uma ferramentaria que utiliza a simulação da injeção de plásticos para auxiliar o projeto de moldes, correção de moldes em operação que apresentam problemas na injeção das peças e otimização do processo de injeção. O contato direto com os usuários desta tecnologia permitiu a visão dos problemas enfrentados nesta área assim como entender os objetivos para os quais a simulação é usada na indústria plástica. A visão da utilização da simulação no processo de concepção e desenvolvimento de peças plásticas na indústria tornou esta dissertação de mestrado, um trabalho bastante prático.

Conforme será visto nas etapas durante a dissertação, o trabalho envolverá a solução de problemas testes de geometrias simples que permitiram à mestrandia desenvolver sua capacidade crítica sobre os modelos matemáticos usados e sobre os pacotes disponíveis.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. A Pesquisa sobre simulação em Injeção de Plásticos

Conforme Brito (1995), a primeira contribuição experimental importante na área de injeção de plásticos foi no início dos anos 50 por Spencer e Gilmore. Eles estudaram visualmente o enchimento de um molde e deduziram uma equação empírica para a determinação do tempo de enchimento. Nos anos 60 e 70, centenas de trabalhos empíricos foram publicados (KENNEDY, P., 1995) aumentando o conhecimento geral sobre o assunto. Depois de 1970, o uso de plásticos de alta performance como material viável de engenharia aumentou pela necessidade de peças mais leves e de menor custo.. O consumo total de plástico ultrapassou, em volume, o consumo de aço, cobre, alumínio e suas ligas juntos (WANG, K. K., 1994). Descobriu-se que a injeção em moldes era o processo mais eficiente para a fabricação de peças plásticas de geometria complexa com alta precisão e baixo custo. Entretanto, o projeto de moldes dependia demasiadamente da experiência anterior dos projetistas e os testes do molde passavam por muitas iterações até atingir peças com resultados satisfatórios. O modelamento matemático da moldagem por injeção foi, então, estimulado.

Nesta época muitos trabalhos pioneiros foram publicados. No começo da década de 70 surgiram os primeiros modelos de simulação de enchimento. Estes modelos consideravam o material como newtoniano e o fluxo, isotérmico. Brito (1995) também cita que uma teoria detalhada desta aproximação foi apresentada por Richardson, que se baseou na generalização de Hele-Shaw da teoria da lubrificação, utilizando modelos tipo casca que representavam moldes de parede fina (VASCONCELLOS, J. F., 1999). Kamal e Kenig (1972) apresentam resultados da simulação acoplando as equações da energia e do movimento e utilizando o modelo de viscosidade da Lei de Potências para o tratamento do fluido como não-Newtoniano. Neste trabalho eles consideram também as fases de compactação e resfriamento do material.

Em 1974, o CIMP (Cornell Injection Molding Program) foi criado com o objetivo de estabelecer uma base científica para o processo, para que os parâmetros de projeto de moldes e o controle do processo de injeção pudessem ser determinados baseados em princípios científicos e não apenas nas experiências. Os desafios iniciais eram (WANG, K. K., 1994):

Identificar e resolver problemas reológicos de suma importância para a moldagem por injeção. Avaliar e representar quantitativamente e de forma precisa as propriedades dos polímeros que eram essenciais para a simulação do processo.

Modelar e simular a dinâmica do ciclo de injeção completo, isto é, os estágios de preenchimento da cavidade, recalque e resfriamento. Um programa experimental era planejado para verificação dos modelos de simulação.

Avaliação crítica da tecnologia CAD/CAM existente, sua capacidade de atuar no projeto e fabricação de moldes com alto grau de automação.

Em 1976, Stevenson *et al* (1976), comparam os resultados da simulação do preenchimento de um disco circular com resultados experimentais. Neste trabalho as equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia são resolvidas simultaneamente e um modelo de viscosidade de três constantes é utilizado.

Em 1978, o primeiro código comercial, o MOLDFLOW, desenvolvido em Melbourne na Austrália, estava disponível no mercado. Este software permitia aos usuários determinar as condições de processo (temperatura de injeção, temperatura do molde e tempo de injeção) e balancear o fluxo nas cavidades e canais de alimentação. Apesar de aceitável para a época, o programa era muito difícil de ser usado pois a cavidade tinha que ser "planificada" para a simulação (KENNEDY, P., 1995). Ainda em 1978, Hieber e Shen (1978) publicaram o primeiro artigo sobre a simulação por elementos finitos/diferenças finitas da fase de preenchimento do processo de injeção. A análise era bidimensional baseada no escoamento de Hele-Shaw.

Em 1986, com a publicação de Wang (1986), a análise de peças de qualquer grau de complexidade tomou-se possível. No mesmo ano, V. W. Wang e K.K. Wang criaram a Advanced CAE Technology/CMOLD e seu primeiro produto, o C_FLOW, foi lançado no mercado.

Nos anos 80, surgem também as primeiras publicações sobre a utilização de malhas adaptativas aos problemas de injeção de plásticos. Trafford (1987) mostra o estudo de malhas que se adaptam à fronteira do domínio para a área da injeção de plásticos. Esta metodologia era aplicada a outras áreas da Mecânica dos Fluidos Computacional.

Estudos considerando a região do fluxo em chafariz, também foram desenvolvidos. Por exemplo, Gogos *et al* (1986) mostram a simulação de um escoamento entre placas, comparando-o com resultados experimentais obtidos no escoamento de uma resina com

pigmentos orgânicos. Outra publicação no tema é a de Friedrichs e Güçeri (1993), que trata o fluxo em chafariz como tridimensional, com a resolução da equação de Poisson e a região mais distante da frente de avanço, como bidimensional, utilizando a formulação de Hele-Shaw. Uma metodologia de malhas adaptada à fronteira e diferenças finitas foi utilizada.

Desde então, softwares têm sido desenvolvidos e comercializados para a simulação do processo de injeção. Inicialmente, esses softwares simulavam apenas a fase de preenchimento do molde em peças de geometria simples, que eram simplificadas por um modelo bidimensional. Hoje em dia, são constituídos por um pacote de programas que simulam vários outros aspectos do processo de moldagem, como o recalque, resfriamento, empenamento das peças e orientação das fibras de vidro ao processamento. A injeção assistida a gás, a co-injeção, a injeção de termofixos e borracha, a moldagem de plásticos reforçados por fibras (SRIM), são alguns processos para os quais atualmente também existem softwares comerciais de simulação. As pesquisas na área e os esforços dos centros de desenvolvimento destes programas mostram a preocupação com a obtenção de resultados cada vez mais precisos, sem esquecer de uma questão fundamental para que a simulação seja aceita no ambiente de produção: tempos razoáveis de computação. Já existem módulos comerciais que simulam o preenchimento, recalque e resfriamento do molde baseados nas equações de escoamento nas três direções. Normalmente, os softwares comerciais fazem esta simulação considerando apenas duas direções, como ver-se-á mais adiante. A simulação 3D do preenchimento ainda não é amplamente utilizada pelo tempo computacional necessário para obtenção de resultados. A Moldflow está estudando a criação de uma metodologia híbrida de cálculo, onde o domínio será dividido em elementos triangulares e tetraédricos, conforme a espessura local da peça (KENNEDY, P., 2000).

A análise: computacional do processo de injeção de termoplásticos tomou-se uma ferramenta amplamente aceita pela indústria de plásticos, e um importante auxiliar no projeto de peças e moldes (ENGELSTEIN, G., 1993) e na otimização dos processos de injeção. Os constantes avanços desses softwares de projeto têm um grande impacto no desenvolvimento de produtos. Atualmente, a otimização através da simulação tem sido uma exigência de várias empresas do ramo automotivo e eletroeletrônico para com seus fornecedores de peças plásticas e moldes. Isto porque a simulação tem sido entendida como ferramenta fundamental para redução de custos e prazos de desenvolvimento. Ela permite ainda aos projetistas criarem formas complexas que eram inatingíveis alguns anos atrás. A velocidade no desenvolvimento e modificação de produtos permitem, às empresas, a alteração de características visando conquistar novos mercados. Isso é importante, especialmente numa economia global, onde a

diferenciação dos produtos é a melhor forma para evitar a competição dos preços (TOENSMEIER P. A., 1997).

Os estudos envolvendo a tecnologia de simulação do processo de injeção de plásticos são numerosos. No departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica desta universidade, alguns trabalhos foram desenvolvidos envolvendo o tema, como as dissertações de mestrado de D'ÁVILA (D'ÁVILA, M. A.; AHRENS, C. H., 1997) e de Dihlmann (DIHLMANN, C.; FERREIRA, A. C., 1993) e a tese de doutorado de Vasconcellos (VASCONCELLOS, L. F., 1999). Vários trabalhos também podem ser encontrados em conferências da área de engenharia de plásticos, como a ANTEC (1999, 2000). Apesar do interesse na pesquisa de problemas mais complexos como rechupe, empenamento, co-injeção e injeção assistida por gás, existem evidências que o básico da modelagem do escoamento de plásticos ainda merece atenção (GADBOIS, M. R. *et al*, 1995).

2.2. Processo de moldagem por injeção

O processo de injeção permite obter peças por meio da introdução de uma quantidade dosada de material plástico, fundido em forma homogênea, nas cavidades de moldes que reproduzem, em negativo o produto desejado. A Figura 1 mostra um desenho esquemático de uma máquina injetora e destaca alguns componentes das unidades de fechamento e de injeção.

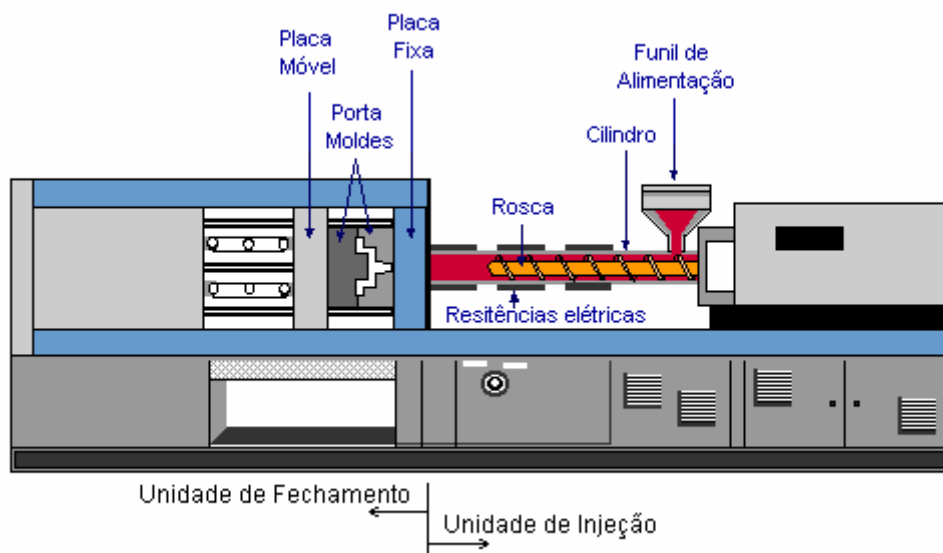


Figura 1 – Máquina injetora e componentes das unidades de fechamento e de injeção. (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1991)

As fases do processo de moldagem por injeção podem ser resumidas em [PROVENZA, F., 1991]:

1. Dosagem do material plástico granulado no cilindro de injeção

Os materiais termoplásticos se encontram normalmente sob forma granular, de tamanho e formato variável conforme o tipo de plástico.

2. Plastificação do material ou Fusão do material até a consistência de injeção

À medida que a rosca gira, os grânulos são forçados contra a parede do cilindro e fundem devido ao calor gerado por atrito e por condução das unidades de aquecimento instaladas ao longo do cilindro. Enquanto é fundido, o material é conduzido para a frente devido ao movimento de rotação e translação da rosca para trás. Isto permite a formação de um reservatório de material fundido à frente da rosca. O material deve estar total e uniformemente plastificado antes de ser injetado.

3. Injeção propriamente dita do material plástico fundido no molde fechado

Durante esta fase a rosca não tem movimento de rotação. Ela atua como um pistão e força o material fundido para dentro do molde. A força de fechamento da máquina deve ser suficiente para que a pressão do material fundido nas paredes do molde não o abra, causando a formação de rebarbas nas linhas de fechamento. O molde pode ser frio ou aquecido, sendo que a sua temperatura tem grande influência sobre as propriedades do objeto moldado, como brilho superficial, contrações, distorções, fissuras, tensões internas. Esta fase pode ser subdividida em duas: Preenchimento e Pressurização. No Preenchimento, a cavidade do molde é preenchida pelo material fundido. A pressão na cavidade aumenta e a vazão é geralmente constante. No final do Preenchimento, inicia-se a Pressurização. Nesta etapa, devido à compressibilidade do termoplástico, ainda é possível injetar material dentro da cavidade. A pressão de injeção na pressurização aumenta com maior intensidade do que no Preenchimento.

4. Recalque ou Compactação do material

Após a cavidade estar completamente preenchida, inicia-se o recalque ou compactação. Devido a baixa taxa de cisalhamento desta fase, a solidificação do material acontece com maior intensidade. Ao solidificar-se, o termoplástico se contrai. Essa contração volumétrica deve ser compensada, mantendo-se a pressão, para se evitar defeitos como bolhas, rechupes e empenamento. Para isto, a comutação do controle da unidade de injeção por vazão para controle por pressão é feita. Isto implica na injeção de mais material nas cavidades do molde, a uma pressão controlada, geralmente constante. É importante, então que o material plástico nos canais de alimentação permaneça fundido durante a solidificação das cavidades para não impedir a passagem de material para compensação da contração.

5. Resfriamento do material

A peça deve ser mantida no molde, sob pressão nula, após a solidificação da entrada da cavidade. Durante este tempo, a peça se solidificará até que a camada externa solidificada seja espessa o suficiente para suportar a força dos extratores e para manter a forma da peça.

6. Extração da peça

Após a peça estar suficientemente sólida, o molde é aberto e a mesma é extraída. Esta extração pode ser feita por ação da gravidade ou por mecanismos extratores projetados para tal fim.

Atualmente, os *softwares* existentes foram desenvolvidos para simular as fases de injeção propriamente dita, recalque e resfriamento da peça, incluindo o efeito destas fases na deformação da peça após a extração. O processo como um todo ainda possui muitas variáveis que influenciam na qualidade da peça.

Na fase de plastificação do material, o polímero é transformado do estado sólido para pastoso, sob a influência de diversos fatores tais como temperatura ao longo do cilindro, velocidade de rotação da rosca, perfil da rosca, tempo de residência no cilindro, entre outros. Estes fatores podem modificar as características do polímero e até mesmo degradar a matéria prima.

Na fase de extração, é comum a utilização de pinos extratores. Dependendo da posição dos pinos, da velocidade com que eles empurram a peça e do momento no qual eles são acionados, este mecanismo pode influenciar na deformação da peça pronta e causar marcas superficiais.

Neste trabalho, analisar-se-á a simulação do Preenchimento da cavidade na fase de injeção. O domínio desta simulação é a partir do bico de injeção da máquina injetora. Ela inclui normalmente a cavidade e para análises mais completas, pode-se modelar também a bucha e canais de alimentação.

2.3. Características do Escoamento

2.3.1. Polímeros

Polímeros são materiais geralmente orgânicos sintéticos, formados por monômeros. Os monômeros reagem entre si por reações de polimerização formando moléculas maiores, chamadas polímeros ou macromoléculas. Sua característica é a repetição de sua unidade básica ou monômero. Normalmente, quanto maior o grau de polimerização, ou seja, a quantidade de vezes que a unidade básica se repete, melhores as propriedades físicas do produto. Os polímeros de elevado peso molecular, são portanto desejados nos materiais plásticos. Os polímeros são classificados em termoplásticos e termofixos (MALLOY, R. A., 1994).

Termoplásticos são moléculas de elevado peso molecular que fundem quando aquecidas e voltam a solidificar quando resfriadas. Na teoria, o processamento desses materiais ocorre apenas com mudanças físicas, podendo-se reciclá-los. Porém, pelo menos alguma pequena mudança química (oxidação, degradação térmica) ocorre durante o processo. Com isso as propriedades dos materiais reciclados não serão exatamente as mesmas da do polímero virgem. Os termoplásticos são classificados em amorfos, semi-cristalinos e líquido-cristalinos.

Os termoplásticos amorfos são moléculas poliméricas sem uma configuração particular. Quando são aquecidos a estrutura molecular se torna mais maleável, até finalmente fluir.

Enquanto fundidos, o material é conformado e então resfriado para adquirir novamente rigidez. Como não existem interfaces cristalinas para refletir a luz, este material é opticamente

transparente. Alguns exemplos são o poliestireno (PS), o policarbonato (PC) e o polimetil metacrilato (PMMA).

Nos termoplásticos semi-cristalinos, as moléculas formam arranjos ordenados. Essas regiões ordenadas são cristais que se formam durante o resfriamento do material fundido. Com o aquecimento, os cristais continuam intactos até o material atingir a temperatura de fusão cristalina. Quando fundidos esses materiais têm uma configuração molecular amorfa ou aleatória. São chamados semi-cristalinos por apresentarem também regiões amorfas quando sólidos. Via de regra, aumentando-se a taxa de resfriamento do material, diminui-se também o grau de cristalinidade. Polímeros como o polietileno (PE), polipropileno (PP) e as poliamidas (PA) ou náilons, são exemplos de semi-cristalinos.

Os termoplásticos líquido-cristalinos possuem cadeias ordenadas no estado sólido e no estado líquido, também. Isso confere a esses materiais baixa viscosidade quando fundidos, pequena contração no molde, rigidez, resistência química, resistência ao escoamento e estabilidade dimensional.

Polímeros termofixos reagem quimicamente ou curam durante o processamento, quando ocorre uma interligação de cadeias moleculares adjacentes, formando um reticulado tridimensional. Este processo é irreversível e portanto os termofixos não podem ser fundidos novamente, dificultando a reciclagem. A interligação das cadeias garantem ótimas propriedades como resistência ao escoamento, estabilidade dimensional e resistência química. Contudo as limitações do material restringem a maioria das suas aplicações. Exemplos destes materiais são as resinas fenólicas e as epoxídicas, poliésteres não-saturados e vários elastômeros.

A Figura 2 mostra esquematicamente as diferenças entre estes tipos de polímeros

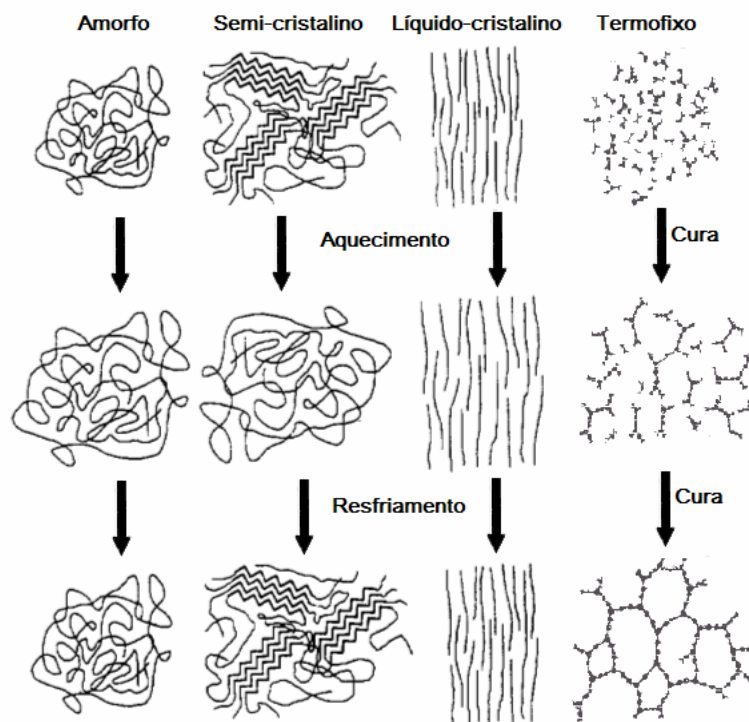


Figura 2 – Polímeros amorfos, semi-cristalinos, líquido-cristalinos e termofixos (MALLOY, R. A., 1994 e MORALES, A. R., 1990)

Para se modificar e adequar as propriedades de um polímero para a utilização do produto final ou para facilitar o seu processamento, é comum a utilização de aditivos. Por exemplo, aditivos com boa condutividade elétrica podem ser adicionados para melhorar esta propriedade do polímero, normalmente isolante. Agentes anti-estáticos podem ser colocados para atrair umidade, minimizando a eletricidade estática nos produtos prontos.

Quando a carga possui uma elevada razão de aspecto, isto é, a razão entre o seu comprimento máximo e mínimo é grande, ela é chamada de fibra. As fibras são usadas principalmente como reforço mecânico, já que se várias fibras estão orientadas na mesma direção, a resistência nesta direção é bem maior e a contração será menor. Por isso, é importante prever como estas fibras se orientam ao longo do fluxo, pois estas propriedades serão bem diferentes na direção transversal as mesmas. A simulação de materiais carregados não será abordada neste trabalho.

2.3.2. Reologia e Propriedades dos Polímeros

Nesta seção serão descritos alguns aspectos importantes sobre o comportamento dos polímeros. Tratar-se-á de maneira básica a reologia dos polímeros e descrever-se-á também algumas propriedades importantes para a simulação do escoamento. O conhecimento do comportamento do polímero é fundamental para o desenvolvimento e entendimento da

simulação numérica do processo. Recentemente, uma publicação em português foi lançada por Bretas e D'Ávila (2000), reunindo as propriedades reológicas, sua aplicação no processo e equações que descrevem o escoamento em uma única obra. Esta referência mostra a importância das pessoas envolvidas no processo de moldagem conhecerem as equações que governam a injeção de plásticos e das pessoas envolvidas na simulação deste processo, conhecerem sobre a reologia dos polímeros.

A reologia é o estudo do escoamento e da deformação dos fluidos. Neste trabalho descrever-se-á os aspectos relativos ao escoamento do polímero fundido na cavidade do molde. O estudo das características reológicas do polímero é importante pois ajuda no entendimento de defeitos na injeção e conseqüentemente ajuda na solução destes problemas. Ela permite conhecer as relações qualitativas e quantitativas entre fatores como propriedades do material e variáveis do processo de injeção como temperatura e pressão. Por isso, é fundamental na definição do material mais adequado para determinado projeto. Nesta seção, tratar-se-á de três características principais do polímero estudadas pela reologia: a viscosidade, a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

Considere um polímero fluido. Várias forças atuam sobre ele: forças convectivas (do movimento), gravitacionais e relativas à interação entre as moléculas, e estarão relacionadas à tensão gerada num elemento de área do fluido. Sabendo que tanto a força como a área são grandezas vetoriais, ao se associar o vetor força a uma direção, pode-se definir o tensor tensão, $\bar{\tau}$ como

$$\vec{F} = \hat{n} \cdot \bar{\tau} \quad (1)$$

onde \vec{F} é o vetor força atuando sobre uma superfície cujo vetor unitário normal é \vec{n} (BRETAS, R. E. S., D'ÁVILA, M. A., 2000).

Em coordenadas cartesianas, o tensor tensão pode ser representado por

$$\bar{\tau} = \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

As componentes onde o índice $i=j$, são as tensões normais e atuam perpendicularmente a face do elemento de fluido. As tensões de cisalhamento são as componentes onde $i \neq j$ e atuam paralelamente a cada face do elemento de fluido.

A deformação no elemento de fluido ocorrerá, então, quando houver mudança de forma. Ela poderá acontecer por cisalhamento, quando uma superfície se desloca em relação a outra paralela e por alongação quando duas superfícies paralelas do elemento se distanciam uma da outra, como mostrado na Figura 3.

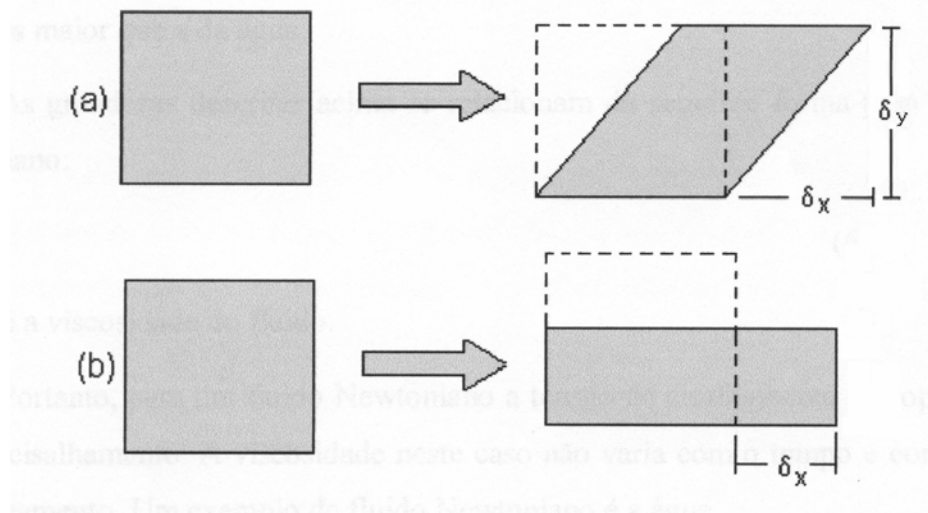


Figura 3 – (a) Deformação por cisalhamento e (b) deformação por alongação.

A deformação por cisalhamento pode ser definida em uma direção como

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta_x}{\delta_y} \quad (3)$$

onde, δ_y é a altura do elemento de fluido e δ_x é o deslocamento da superfície superior do elemento no eixo x .

A taxa de deformação ou taxa de cisalhamento em uma direção, então, é definida por

$$\dot{\gamma} = \frac{\delta\gamma_{xy}}{\delta t} \quad (4)$$

Neste caso, a taxa de deformação está claramente associada ao gradiente de velocidades na direção y . Como o vetor velocidades possui três componentes, o gradiente de velocidades para os três eixos cartesianos possui nove componentes. Assim, o tensor taxa de cisalhamento é definido por

$$\dot{\gamma} = \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} & 2 \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} & 2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A viscosidade do fluido é uma propriedade do polímero e é proporcional à resistência que ele apresenta para escoar. Os polímeros possuem uma viscosidade 10^5 a 10^7 vezes maior que a da água.

As grandezas descritas acima se relacionam da seguinte forma para um fluido Newtoniano:

$$\bar{\tau} = \mu \bar{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

onde, μ é a viscosidade do fluido.

Portanto, para um fluido Newtoniano a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de cisalhamento. A viscosidade neste caso não varia com o tempo e com a tensão de cisalhamento, ou seja, é chamada de viscosidade Newtoniana. Um exemplo de fluido Newtoniano é a água.

O polímero fundido não apresenta este comportamento e por isso é chamado de não-Newtoniano. Apenas a taxas de cisalhamento muito baixas ou muito altas a viscosidade se torna independente desta taxa. Pequenas taxas de cisalhamento podem ocorrer no meio de uma cavidade de parede espessa. Altas taxas podem ocorrer em pontos de estrangulamento no molde, como pontos de injeção do tipo submarino, e causam a degradação do polímero.

Na maioria dos polímeros a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, como mostra o gráfico da Figura 4. Este efeito é conhecido como "*Shear-Thinning Behaviour*" e é bastante útil para o processamento dos polímeros. Se dobrar-se a pressão para empurrar água ao longo de um tubo aberto, a vazão irá dobrar. Se o mesmo for feito com um polímero a vazão poderá ser de 2 a 15 vezes maior, dependendo do material (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994). Para altas taxas de cisalhamento, este efeito é predominante em relação a variação da viscosidade com a temperatura.

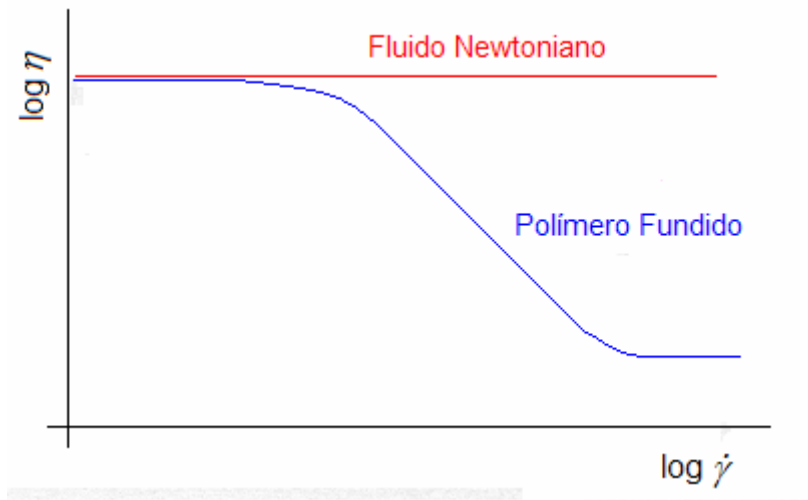


Figura 4 – Curva típica de viscosidade *versus* taxa de cisalhamento de um polímero fundido e de um fluido Newtoniano.

Desta característica, deriva-se uma relação amplamente usada na engenharia, por sua simplicidade e boa representação na predição da relação entre vazões e quedas de pressão em escoamentos internos de vários materiais não-Newtonianos (THOMPSON, R. L., *et al*, 1998), a equação do Fluido Newtoniano Generalizado (GNF),

$$\bar{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (7)$$

onde $\eta(\dot{\gamma})$ é a função viscosidade.

Os polímeros ainda apresentam efeitos viscoelásticos. Estes efeitos são assim chamados pois combinam o comportamento de sólidos elásticos (como molas) com líquidos viscosos. Se for aplicada uma tensão de cisalhamento sobre o polímero, ele deformará continuamente ao longo do tempo como um líquido. Ao se remover a tensão aplicada, devido ao entrelaçamento das moléculas, as cadeias tendem a voltar ao estado de equilíbrio, de forma similar aos sólidos. Porém esta recuperação não é instantânea. A Figura 5 mostra de forma esquemática este conceito:

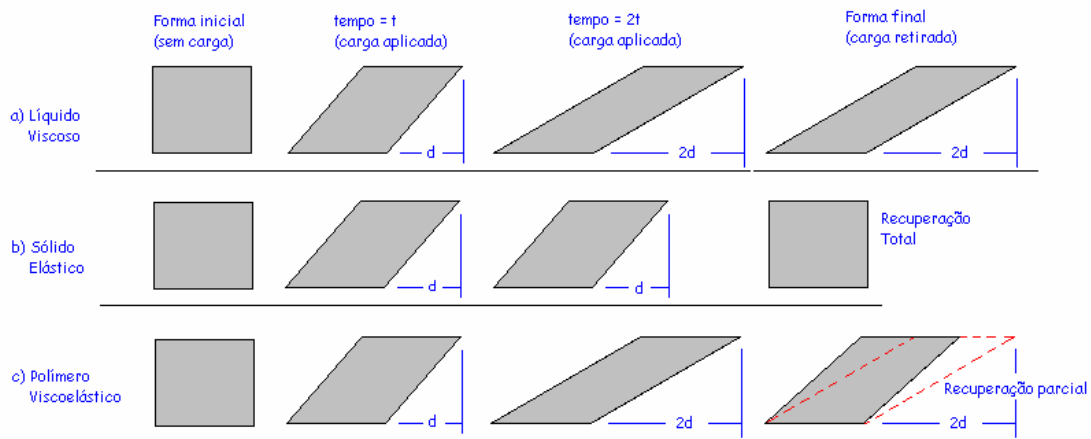


Figura 5 – a) O líquido viscoso deforma continuamente sobre aplicação de carga cisalhante. b) O sólido elástico ideal deforma imediatamente sob aplicação da carga e recupera sua forma original. c) O polímero fundido deforma continuamente como o líquido mas recupera apenas parcialmente a deformação. (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994).

Esta dependência com o tempo da resposta do material a aplicação de tensão, pode ser convenientemente medida pela constante λ chamada de tempo de relaxamento. O número de Deborah, De , para facilitar o entendimento da resposta temporal deste tipo de substância, pode ser definido como:

$$De = \frac{\lambda}{t_{\text{exp}}} \quad (8)$$

onde t_{exp} é o tempo de duração do experimento.

O número de Deborah é portanto a razão entre dois tempos: o tempo necessário para a movimentação das cadeias, o tempo de relaxamento, e o tempo fornecido para que elas ocorram (TADMOR, Z., GOGOS, C. G., 1979). Assim tem-se três condições:

1. $De \rightarrow 0$: a substância se comporta como sólido
2. $De \rightarrow \infty$: substância se comporta como um líquido
3. Para valores entre os dois extremos, o material é viscoelástico.

Um outro comportamento que é observado em substâncias viscoelásticas fluindo em geometrias complexas é a diminuição da viscosidade em regiões onde o escoamento cisalhante é dominante e o aumento da viscosidade em regiões onde o escoamento é

extensional. Este efeito não consegue ser previsto pela equação de GNF, se a função viscosidade for baseada no efeito "*Shear-thinning*" (THOMPSON, R. L., *et al*, 1998).

A Equação de Fluido Newtoniano Generalizado, Eq. (7) é uma expressão genérica para uma família de equações de origem empírica, semi-empírica e molecular, que foram desenvolvidas para quantificarem o comportamento não-Newtoniano dos fluidos. Estas equações são chamadas de equações constitutivas para fluidos não-Newtonianos, e expressam a dependência da função viscosidade com a taxa de cisalhamento aplicada (ou resultante). São chamadas constitutivas porque a resposta a este estímulo é dependente da constituição da substância, isto é, determinada pelas forças interatômicas e intermoleculares. Como o conhecimento da forma que isto exatamente influencia no comportamento das macromoléculas ainda não foi totalmente determinado, as equações constitutivas são na sua maioria empíricas.

Conforme definido anteriormente na Eq. (6), para um fluido Newtoniano a equação constitutiva é

$$\bar{\tau} = \mu \dot{\gamma} \quad (6)$$

onde μ é a viscosidade do fluido Newtoniano e é constante.

Algumas das equações constitutivas mais usadas para definir o escoamento de polímeros são mostradas a seguir:

1. Lei de Potências

Este modelo é um modelo empírico, baseado na observação da queda de $\eta(\dot{\gamma})$ quando $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ (TADMOR, Z., GOGOS, C. G., 1979), esquematizada na Figura 6:



Figura 6 – Viscosidade versus taxa de cisalhamento em escala logarítmica.

A observação da curva sugere a equação:

$$\eta(\dot{\gamma}) = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

onde, m ($N.s^n/m^2$) e o número adimensional n são parâmetros normalmente chamados de consistência e índice de potência, respectivamente. Quando $n = 1$, a equação (9) equivale a equação para um Fluido Newtoniano, sendo que a viscosidade é uma constante.

Assim, a equação constitutiva de Lei de Potências é

$$\bar{\tau} = m \dot{\gamma}^{n-1} \bar{\gamma} = -m \left[\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\gamma}}{\dot{\gamma}} \right)} \right]^{n-1} \bar{\gamma} \quad (10)$$

Algumas considerações podem ser feitas a respeito deste modelo (TADMOR, Z., GOGOS, C. G., 1979):

- ele não prevê o comportamento viscoelástico do fluido como o relaxamento da tensão;
- é incapaz de prever a viscosidade à taxa de cisalhamento zero;
- o limite superior do platô Newtoniano é dependente do peso molecular e da temperatura do polímero. Com isto, a transição entre a região Newtoniana e a de Lei de Potências é aguda para polímeros monodispersos e suave para polímeros polidispersos.

- a tangente da curva de viscosidade neste caso não é constante. O índice n diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Portanto, este modelo é exato apenas para uma faixa de taxas de cisalhamento.

Apesar destas limitações, é um modelo bastante usado e apresenta bons resultados até mesmo em escoamentos transientes.

2. Viscosidade Cross-(exp)

Este modelo, de 5 constantes leva em consideração os efeitos da temperatura, da taxa de cisalhamento e da pressão sobre a viscosidade.

A equação do modelo é

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_o(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_o(T) \times \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{(1-n)}}$$

$$T > T_{trans}, \quad \eta_o(T, p) = B \times \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \times \exp(\beta \times p) \quad (11)$$

$$T < T_{trans}, \quad \eta_o(T, p) = \infty$$

Conforme discutido anteriormente, a maioria dos polímeros exibe dois regimes de comportamento de fluxo: o Newtoniano e um segundo, a altas taxas de cisalhamento, onde a viscosidade cai com o aumento do cisalhamento. A fase Newtoniana ocorre a baixas taxas de cisalhamento e a relação tensão/taxa de cisalhamento é linear.

No modelo Cross-exp, a transição entre os dois regimes é caracterizada pelo parâmetro τ^* , que representa a tensão cisalhante na qual a mudança de comportamento ocorre.

O valor de $(1-n)$, onde n é o coeficiente da lei de potência deste modelo, representa a inclinação da curva na segunda fase. As outras constantes são usadas para determinar a viscosidade a um cisalhamento zero, η_o . O parâmetro β , caracteriza a dependência de η_o com a pressão e o parâmetro B fixa o nível de η_o .

O parâmetro T_b , caracteriza a sensibilidade de η_o à temperatura. T_b depende da temperatura, especialmente próximo a T_g . No entanto na fase de preenchimento a temperatura normalmente é bem maior que T_g , e por isso, esse modelo é adequado a fase de preenchimento. Como ele é considerado neste caso como constante, este modelo é uma aproximação pobre para o

comportamento do polímero em situações de grandes variações de temperatura. Para a fase de preenchimento ele é considerado adequado já que as mudanças na temperatura não são muito grandes. Porém outro modelo deve ser usado para a simulação da fase de recalque e resfriamento (HIEBER C.A., WANG, K. K., 1990).

3. Viscosidade Carreau-(exp)

Este modelo também possui 5 constantes e leva em consideração a influência da temperatura, da taxa de cisalhamento e da pressão na viscosidade do fluido. Apresenta a mesma limitação do modelo Cross-exp, por considerar T_b constante.

A equação deste modelo é

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_o(T, p)}{\left\{ 1 + \left[\frac{\eta_o(T) \times \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^2 \right\}^{\frac{(1-n)}{2}}}$$

$$T > T_{trans}, \quad \eta_o(T, p) = B \times \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \times \exp(\beta \times p) \quad (12)$$

$$T < T_{trans}, \quad \eta_o(T, p) = \infty$$

Tanto a Eq. (11) como a Eq. (12) tem comportamento Newtoniano quando $\eta_o \times \dot{\gamma} / \tau^* \ll 1$ e de lei de potências quando $\eta_o \times \dot{\gamma} / \tau^* \gg 1$. Observa-se, no entanto, que a transição entre estes dois comportamentos é mais aguda no modelo Carreau-exp, onde o aumento de duas casas decimais em $\dot{\gamma}$ pode servir para a transição completa entre os limites do comportamento Newtoniano para o da lei da potências. No caso de polímeros comerciais, que geralmente possuem uma distribuição do peso molecular dispersa, a transição entre esses limites tende a ser menos aguda do que em polímeros monodispersos e portanto melhor representados pelo modelo Cross-exp (HIEBER, C.A., WANG, K. K., 1990),

4. Viscosidade Cross-WLF

Este é um modelo de 7 constantes que leva em consideração os efeitos da temperatura, da taxa de cisalhamento e da pressão sobre a viscosidade em uma vasta faixa de temperaturas.

A equação deste modelo é

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_o(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_o(T) \times \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{(1-n)}}$$

$$T > \tilde{T}, \quad \eta_o(T, p) = D_1 \times \exp \left\{ \frac{-[A_1(T - \tilde{T})]}{[A_2 + (T - \tilde{T})]} \right\} \times \exp(\beta \times p) \quad (13)$$

$$T < \tilde{T}, \quad \eta_o(T, p) = \infty$$

onde

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \times p$$

$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \times p$$

e n , τ^* , D_1 , D_2 , D_3 , A_1 e \tilde{A}_2 são constantes do modelo.

O modelo aborda o comportamento de variação da viscosidade com o cisalhamento (*Shear Thinning*) da mesma forma que o modelo Cross-exp, porém a viscosidade a cisalhamento zero, η_o , é representada por um modelo mais extensivo baseado na função WLF (TADMOR, Z., GOGOS, C. G., 1979). A sensibilidade de η_o em relação à temperatura e à pressão é melhor representada.

Este modelo é o modelo padrão utilizado pelo *software* C-Mold Advanced Solutions (C-MOLD REFERENCE MANUAL, 1996).

5. Modelo Moldflow de Segunda Ordem:

Este modelo de 6 constantes é dado por

$$T \geq T_{no\ flow}, \quad \ln \eta = C_1 + C_2 \ln \dot{\gamma} + C_3 T + C_4 (\ln \dot{\gamma})^2 + C_5 (\ln \dot{\gamma})T + C_6 T^2 \quad (14)$$

$$T \leq T_{no\ flow}, \quad \eta = \infty$$

Onde C_n são constantes e $T_{no\ flow}$ é a temperatura na qual o polímero pára de fluir e é calculada experimentalmente.

A temperatura de “no flow” é um conceito usado pela Moldflow e por outros programas de simulação (KENNEDY, P., 1995) para evitar a extrapolação excessiva dos dados de viscosidade no cálculo da espessura de camada congelada e na indicação de parada de fluxo (*short shot*) durante o preenchimento e recalque. Ela é obtida experimentalmente,

através de um reômetro modificado que monitora a temperatura e carga na qual uma amostra de polímero é resfriada e extrudada até que o fluxo do polímero cesse.

Este modelo permite captar o comportamento do polímero com relação aos seguintes aspectos (PATEL, S., 1996):

- a convergência das curvas de mesma taxa de cisalhamento com o aumento da temperatura;
- a convergência das isotérmicas com o aumento da taxa de cisalhamento;
- o aumento da taxa na qual a viscosidade diminui com a taxa de cisalhamento e
- a diminuição na taxa na qual a viscosidade diminui com a diminuição da temperatura.

Estes aspectos podem ser observados em uma curva típica traçada por este modelo na Figura 7.

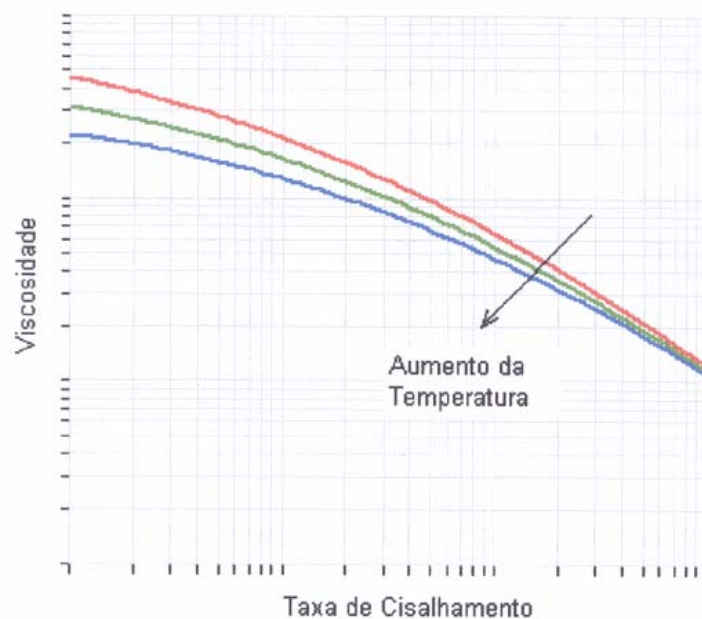


Figura 7 – Curva de viscosidade criada pelo modelo Moldflow de Segunda Ordem.

Alguns outros aspectos também devem ser considerados. Este modelo pode prever o aumento da viscosidade ($\partial\eta/\partial\dot{\gamma} > 0$) a baixas taxas de cisalhamento (HIEBER, C. A., WANG, K. K., 1990). Deve-se tomar bastante cuidado na alimentação dos dados experimentais para que o limite apropriado seja estabelecido a baixas taxas de cisalhamento e prevenindo assim este efeito (PATEL, S., 1996).

Este modelo é o modelo padrão utilizado pelo *software* Moldflow Plastics Insight (MOLDFLOW ON LINE HELP, 2000).

6. Modelo da matriz de dados:

Este modelo consiste na interpolação linear entre dados experimentais (viscosidade, temperatura e taxa de cisalhamento) do polímero. A vantagem deste modelo é a possibilidade de representar materiais cujos outros modelos de viscosidade não representam bem o seu comportamento, como o cristal líquido (LCP). É importante, entretanto, que os dados sejam medidos em uma ampla faixa de condições, ou os resultados serão imprecisos. Como a interpolação é linear, este modelo não permite extrapolações dos dados como os outros modelos citados.

Além da viscosidade, da tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento, outras propriedades do polímero são importantes para a simulação do escoamento.

O calor específico determina a quantidade de calor necessária para a fusão do material e conseqüentemente, a quantidade de calor que deve ser extraída do molde para o resfriamento da peça. É usado para calcular a queda de temperatura devido a condução através das paredes do molde e para calcular o aumento de temperatura devido ao aquecimento viscoso. O calor específico pode ser medido a volume constante, c_v , ou a pressão constante, c_p , sendo o último mais usado e definido por

$$c_p = \frac{1}{m} \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} \Big|_{\text{pressão cte}} \quad (15)$$

onde ΔQ é a variação de energia, correspondente à variação de temperatura, ΔT de uma massa de material m . O calor específico dos plásticos é 2-5 vezes maior que o de metais.

A condutividade térmica, k , dos materiais também é importante. Ela é dependente da temperatura, do grau de cristalinidade e do nível de orientação. Para polímeros amorfos, a condutividade térmica varia entre 0,13 a 0,26 W/mK, é constante acima da temperatura de transição vítrea, T_g e diminui linearmente quando a temperatura é mais baixa. A tangente desta curva abaixo de T_g é de aproximadamente 0,04 W/mK para quase todos os polímeros amorfos puros. Para os materiais semi- cristalinos, a condutividade térmica é maior e aumenta abruptamente quando a temperatura é menor do que a temperatura de cristalização, T_c . A fase cristalina possui uma alta condutividade.

Ela é a constante de proporcionalidade da relação

$$q''_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (16)$$

Nos bancos de dados de material dos *softwares* comerciais, esta propriedade aparece para muitos polímeros como constante.

Outras duas propriedades são importantes na simulação da injeção de polímeros: os coeficientes de expansão e de compressão. β é o coeficiente de expansão de volume e é definido como

$$\beta = \frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \quad (17)$$

onde \hat{V} é o volume específico e β é definido à pressão constante.

A compressibilidade isotérmica, κ é definida como

$$\kappa = -\frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial p} \right)_T \quad (18)$$

onde o sinal negativo indica a diminuição do volume com o aumento da pressão.

Estes coeficientes são obtidos através das curvas Pressão-Volume-Temperatura (PVT) do material. A curva PVT do material é um dado essencial para a análise de recalque, mas também tem grande importância na fase de preenchimento do molde. Esta curva é obtida experimentalmente, mantendo-se um dos parâmetros constante (P, V ou T), variando-se o outro e medindo o terceiro. Na Figura 8, pode-se ver de forma esquemática a curva PVT de um polímero amorfo (a) e de um semi-cristalino (b).

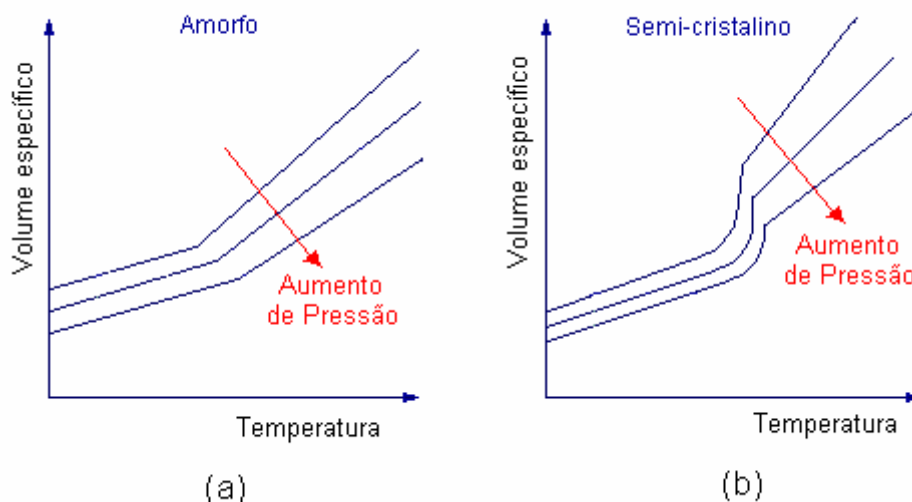


Figura 8 – Curva PVT esquemática para polímeros (a) amorfos e (b) semi-cristalinos,

Para os polímeros amorfos, a inflexão na curva acontece na Temperatura de Transição Vítrea, T_g . Abaixo desta temperatura, as cadeias do polímero são rígidas e acima são flexíveis, o que lhes confere um aspecto de borracha. Pode-se notar, na Figura 8.b que no polímero semi-cristalino há uma mudança brusca de volume. Esta diminuição no volume específico com o resfriamento deve-se à cristalização. A taxa na qual o polímero é resfriado influencia no grau de cristalinidade obtido. O *software* C-Mold leva em consideração essa taxa de resfriamento na caracterização dos materiais de seu banco de dados (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994). Este aspecto é importante no processamento de polímeros de engenharia. Muitas vezes, com a intenção de se aumentar a produtividade, injeta-se polímeros semi-cristalinos com moldes resfriados a temperaturas mais baixas que às recomendadas pelos fornecedores da matéria prima. Com isso, o polímero ao tocar a parede do molde, apresenta um rápido resfriamento que não permite a cristalização da parede externa da peça. A camada superficial amorfa formada terá, portanto, resistência mecânica abaixo do esperado, por exemplo.

2.3.3. O escoamento de plásticos

Os termoplásticos fundidos apresentam um comportamento viscoelástico, isto é, combinam o comportamento de um líquido viscoso e de um sólido elástico, conforme já discutido na seção 3.2. A componente viscosa traduz a resistência que o material oferece ao

fluxo e é o resultado de duas componentes: uma associada ao fluxo cisalhante e outra ao fluxo extensional. A viscosidade cisalhante e a viscosidade extensional descrevem esse comportamento. A componente elástica manifesta-se na capacidade do polímero recuperar parcialmente a deformação induzida pelo fluxo (BRITO, A. M., 1995).

No escoamento do termoplástico atuam campos de tensões normais e cisalhantes. O efeito das tensões normais é o alongamento das moléculas enquanto as tensões cisalhantes provocam a sua rotação. Contudo, num polímero fundido esta distinção torna-se pouco clara pois o enovelamento molecular inibe a rotação livre das moléculas (BRITO, A. M., 1995). Experimentalmente, observa-se apenas o efeito do alinhamento ou orientação molecular. Durante o preenchimento do molde o escoamento cisalhante é predominante. O fluxo extensional, torna-se significativo quando o material passa por variações geométricas do molde ou na frente do escoamento em que ocorre o fluxo em chafariz (*fountain flow*).

O fluxo em chafariz, como cita Brito (BRITO, A. M., 1995), foi proposto por Tadmor e verificado experimentalmente por Schmidt. Trata-se de um modelo de avanço da frente do material fundido. Ele ocorre imediatamente antes da frente de avanço e está confinado a uma distância pequena, aproximadamente igual à espessura do canal de fluxo (BRITO, A. M., 1995, SUBBIAH, S. A., 1990). Este fluxo consiste na transformação do escoamento cisalhante em uma combinação do escoamento cisalhante e extensional, à medida que o fluido quente do centro move-se em direção às paredes do molde, se solidificando (Figura 9). Os efeitos deste fluxo na pressão são pequenos. Há controvérsias a respeito de sua importância no estudo de termoplásticos. Wijngaarden *et al.* (KENNEDY, P., 1995) encontrou grandes erros ao desprezar os termos convectivos na direção da espessura da cavidade, todavia, vários pesquisadores ignoram seu efeito. O fluxo em chafariz influencia, certamente, na orientação molecular e das fibras, pois quando o fluido encontra a parede fria do molde, ele solidifica rapidamente mantendo a orientação. Estes efeitos são relevantes para a análise de termofixos devido a reação de cura.

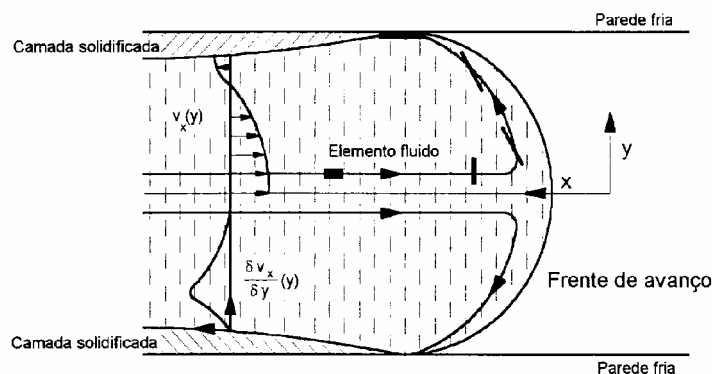


Figura 9 – Fluxo em chafariz (BRITO, A. M., 1995).

Outro aspecto importante no preenchimento de moldes é a formação de uma camada solidificada (*frozen layer*) junto as paredes do molde que também pode ser vista na Figura 9. Esta camada tem um efeito isolante além de reduzir a área de fluxo do material.

2.3.4. Fatores influentes no escoamento

Nesta seção, serão apresentados alguns fatores que influenciam a maneira como o polímero preenche a cavidade. A forma qualitativa desta influência pode ser aprendida na prática, observando o processo de injeção. A simulação procura quantificar estas relações.

Tratar-se-á aqui de três fatores que influenciam na pressão de injeção da peça. Estes efeitos serão assim mostrados pois na simulação a temperatura do molde, do polímero e o tempo de injeção são usualmente condições de contorno do problema e a pressão de injeção um dos resultados.

Na prática, a máquina injetora não trabalha desta forma. Para se injetar uma peça deve-se ajustar as temperaturas. A temperatura do molde é obtida através de canais de resfriamento por onde passa um fluido refrigerante como água ou óleo. A temperatura e vazão do fluido, a disposição dos canais em relação a cavidade, o comprimento destes canais e as propriedades dos materiais envolvidos (polímero, fluido refrigerante e material do molde) são fatores importantes no projeto para que o molde atinja a temperatura desejada de forma homogênea. É possível nos *softwares* atuais, realizar inicialmente uma análise do resfriamento para verificar a troca térmica no molde e então usar os resultados como condição de contorno para a simulação de preenchimento.

A temperatura de polímero é ajustada na prática, normalmente através de resistências elétricas distribuídas ao longo do cilindro de injeção. Os sensores de temperatura encontram-se geralmente nestas resistências e são usados portanto para o controle de temperatura do cilindro. O polímero ganha temperatura por condução e por aquecimento devido ao atrito gerado pela rosca em rotação. Como existem dois mecanismos responsáveis pelo aquecimento do polímero e na maioria das máquinas de produção encontradas na indústria de transformação não existem sensores para medida direta da temperatura do polímero, faz-se normalmente uma estimativa da temperatura da resina.

Na máquina injetora a forma de se iniciar o processo de injeção difere da forma de iniciar a “injeção virtual” da peça. No computador, o tempo ou a vazão são condições de contorno e a pressão um resultado. Por exemplo, se fixado um tempo de injeção, o *software* variará a vazão para que a cavidade seja preenchida no tempo desejado e calculará a pressão necessária para atingir este objetivo. Na máquina, o operador ajustará o limite de pressão de injeção, o tempo de injeção e a velocidade de deslocamento transversal da rosca, além de outros parâmetros não considerados na simulação. Isto significa que a máquina irá deslocar a rosca à velocidade determinada e durante o tempo ajustado, mesmo que a vazão durante este tempo não seja suficiente para o preenchimento completo da peça. De forma similar, se a pressão ajustada não for suficiente, a peça não será preenchida.

A simulação auxilia, portanto, na previsão de quais combinações destes parâmetros levará a uma peça de qualidade, com produtividade.

1. Temperatura do polímero:

Com o aumento da temperatura de injeção, a pressão necessária para o preenchimento da cavidade diminui rapidamente, pois a viscosidade do material é menor. A altas temperaturas menores variações de pressão são associadas as mesmas variações de temperatura, pois existe uma temperatura em que o material atinge uma viscosidade mínima. Neste ponto o material está próximo da degradação. Os níveis de tensão (devido a diminuição da viscosidade) também diminuem com o aumento de temperatura do polímero fundido consequentemente induzindo uma menor orientação no material. A Figura 10 mostra este efeito com uma curva temperatura *versus* pressão.

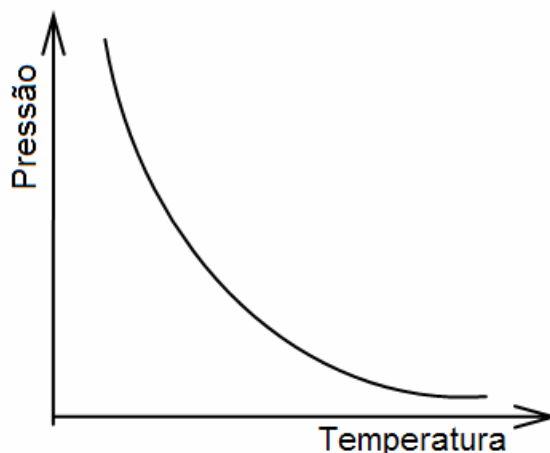


Figura 10 – Efeito da temperatura de injeção na pressão

2. Temperatura do molde

O aumento na temperatura do molde tem efeitos similares porém mais suaves que os da temperatura de injeção. O efeito no tempo de resfriamento, contudo, é mais acentuado quando aplicada a mesma variação. O maior benefício encontrado aumentando-se a temperatura do molde, é que menores taxas de injeção podem ser aplicadas sem que o material esfrie demais e solidifique antes que o molde seja preenchido. Contudo, não se tem publicado muitos dados a respeito dessa dependência, talvez por a temperatura do molde ser considerado uma variável de segunda ordem.(BRITO, A. M., 1995)

3. Tempo de preenchimento

O efeito do tempo de preenchimento da peça gera efeitos antagônicos na pressão de injeção. Quando submetido a altas vazões, o polímero apresenta altas tensões de cisalhamento e a pressão requerida para preencher a cavidade, devido a esse fator, torna-se maior. Porém, a taxa de cisalhamento também é aumentada e com isso, o aquecimento viscoso, devido ao atrito entre as moléculas, também é maior. Com o aumento da temperatura interna do polímero, sua viscosidade diminui, o que diminui a resistência do material e consequentemente a pressão requerida. No caso de tempos maiores de preenchimento, a baixa vazão na entrada requer uma menor pressão, porém há mais tempo para troca de calor entre o polímero e o molde e com o resfriamento há o aumento da viscosidade. Além do aumento de viscosidade, a camada congelada se torna mais espessa obstruindo o fluxo e exigindo mais

pressão para o preenchimento total da peça. O tempo de preenchimento que resulta na menor pressão de injeção, portanto, é resultante da quantificação destes fenômenos. Se um gráfico do tempo de injeção versus pressão requerida for traçado, obter-se-á uma curva similar a da Figura 11. A forma desta curva depende bastante do polímero utilizado, assim como da geometria da cavidade.

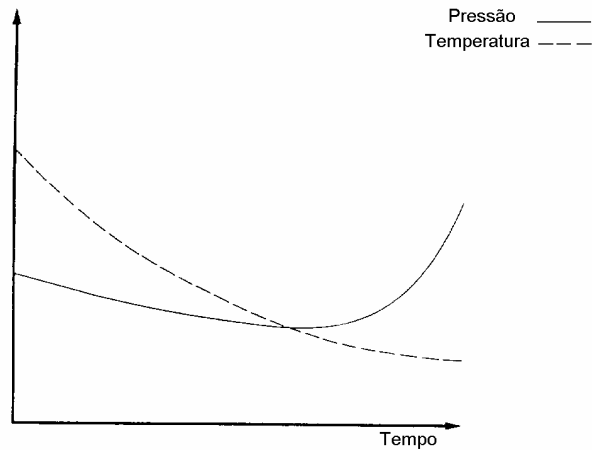


Figura 11 – Efeito do tempo de preenchimento na pressão e temperatura.

3. Modelos Matemáticos

3.1. Equações governantes

A seguir, serão apresentadas as equações governantes para o escoamento de fluidos (KENNEDY, P., 1995). Essas equações são aplicáveis ao escoamento de polímeros fundidos e são obtidas através dos princípios de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia.

Conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0 \quad (19)$$

Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = \rho \vec{g} + [\nabla \cdot (-p \bar{I} + \bar{\tau})] - [\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})] \quad (20)$$

Conservação da Energia:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot \vec{v} + [(-p \bar{I} + \bar{\tau}) : (\nabla \vec{v})] + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (21)$$

Essas equações são gerais e se aplicam a qualquer tipo de escoamento de fluidos. A tecnologia computacional disponível atualmente não permite a sua solução em domínios complicados como as cavidades de um molde para injeção. Algumas simplificações são então efetuadas ao serem usadas na simulação de injeção (preenchimento) de plásticos.

3.2. Simplificações e Métodos Numéricos

Nesta seção, as simplificações, considerações e métodos numéricos do Moldflow Plastics Insight, C-Mold Advanced Solutions e do *software* desenvolvido por Vasconcellos

(1999) são expostos segundo bibliografia recomendada pelos próprios desenvolvedores dos respectivos programas.

3.2.1. Moldflow Plastics Insight

O Moldflow Plastics Insight é um *software* desenvolvido pela Moldflow Corporation para a análise de escoamento, compactação, resfriamento, empenamento, orientação de fibras, análise estrutural de termoplásticos injetados. Este *software* visa auxiliar na:

- Determinação das condições ótimas de processo, tais como, tempo de injeção e recalque, temperatura do polímero e do molde, tempo de recalque e de resfriamento, pressão de injeção e perfil de velocidade de avanço da rosca.
- Minimização da espessura das paredes da peça, analisada em relação a injetabilidade da peça,
- Previsão de problemas de processo como linhas de solda, aprisionamentos de ar, degradação da matéria prima, rechupes e empenamentos,
- Determinação da força de fechamento necessária da máquina,
- Determinação das melhores configurações do molde, isto é, sistemas de refrigeração, posição dos pontos de injeção, balanceamento de canais de alimentação.

As considerações feitas na elaboração do *software* Moldflow, para a análise da fase de preenchimento do molde, feita pelo módulo MPI/FLOW serão mostradas a seguir (KENNEDY, P., 1995).

➤ Fluido Incompressível

Esta consideração significa que a densidade é constante, portanto pela Eq. (19), isso implica em:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (22)$$

➤ Fluido Newtoniano Generalizado

Isto implica que os efeitos viscoelásticos são desconsiderados. O tensor tensão $\bar{\tau}$ é, portanto representado por:

$$\bar{\tau} = \eta(\dot{\gamma})\bar{\dot{\gamma}} \quad (23)$$

Os modelos de viscosidade utilizados pelo programa são o de Lei de Potências, o Moldflow de Segunda Ordem e o Modelo de Matriz de Dados, já descritos na seção 2.3.2.

➤ Condutividade Térmica Constante

Essa consideração é feita devido a dificuldade de encontrar dados sobre a variação da condutividade térmica, k , do polímero com a temperatura. Com isso o termo da equação de conservação de energia, Eq. (21) que contém k reduz-se a:

$$\nabla \cdot (k\nabla T) = k\nabla^2 T \quad (24)$$

Com essas considerações as equações de conservação, de (19) a (21) podem ser escritas da seguinte forma,

$$(\nabla \cdot \bar{v}) = 0 \quad (25)$$

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t}}_{(i)} = \underbrace{\rho \bar{g}}_{(ii)} - \underbrace{\nabla p}_{(iii)} + \underbrace{[\nabla \cdot \eta \bar{\dot{\gamma}}]}_{(iv)} - \underbrace{\rho [\bar{v} \cdot \nabla \bar{v}]}_{(v)} \quad (26)$$

$$\underbrace{\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T \right)}_{(i)} = \underbrace{\beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla p \right)}_{(ii)} + \underbrace{\eta \dot{\gamma}^2}_{(iii)} + \underbrace{k \nabla^2 T}_{(iv)} \quad (27)$$

Os termos das equações foram identificados para facilitar a explicação do significado físico de cada um deles.

Na equação da continuidade, Eq. (25), o único termo representa a conservação de massa.

Na equação do movimento, Eq. (26), o termo (i) representa a taxa de variação da quantidade de movimento, o termo (ii) representa as forças relativas à gravidade, o termo (iii) mostra o gradiente de pressão, o termo (iv) representa as forças viscosas e o termo (v) as forças inerciais.

Na equação da energia, Eq. (27), o termo (i) mostra a taxa total de variação de energia e a energia devida à convecção, o termo (ii) representa a taxa de variação de energia devida à compressão/expansão do fluido, o termo (iii) é a taxa de geração de energia devida a dissipação viscosa ou aquecimento pelo cisalhamento e o termo (iv), a variação de energia devida à condução.

➤ Análise Dimensional

Mesmo com as considerações feitas acima, a solução das equações (25) a (27) ainda é muito complicada. É possível fazer outras simplificações referentes a geometria dos moldes para injeção.

Normalmente, as peças plásticas são finas, com espessuras da ordem de 10^{-3} m. A razão entre a espessura da peça e seu comprimento é normalmente muito menor do que um. Portanto, o escoamento na cavidade é similar ao escoamento em um canal estreito. A Figura 12, mostra uma cavidade de geometria simples com os eixos coordenados.

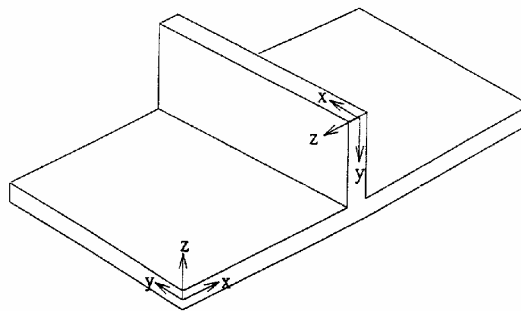


Figura 12 – Sistema coordenado para a cavidade de um molde (KENNEDY, P., 1995)

Utilizando este fato e valores típicos do processo de injeção, faz-se uma análise dimensional das equações. Cada variável relevante na forma adimensional é substituída nas equações e sua ordem de grandeza é estimada. Com isso os termos que apresentam pouca influência são desprezados. Essa análise é mostrada em detalhes em (KENNEDY, P., 1995).

Na equação da continuidade, Eq. (25), todos os termos possuem a mesma ordem de grandeza e portanto não pode ser mais simplificada.

Como uma equação vetorial, a equação do movimento, Eq. (26) pode ser expressa em três equações cartesianas para as coordenadas x , y e z . Fazendo isto, observar-se-á que os

termos de gradiente de pressão (*iii*) e os de forças viscosas (*iv*) provenientes das derivadas na direção z são dominantes.

E na equação da energia, Eq. (27), a parcela $v_z \partial T / \partial z$ do termo (*i*) é desprezada, ignorando assim a convecção na direção da espessura. Essa aproximação despreza os efeitos do fluxo em chafariz na frente de fluxo. Os termos relativos a expansão/compressão (*ii*) e a condução (*iv*) nas direções x e y também têm magnitude pequena e são desprezados.

Após essas aproximações as Eq. (25) a (27) ficam:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (30)$$

Nas equações do movimento, Eq.(29), a pressão é apenas função de x e y . Portanto é conveniente integrá-las através da espessura para encontrar expressões para v_x e v_y .

Deve-se notar que na moldagem por injeção há material na fase líquida fluindo entre uma camada solidificada (*frozen layer*) aderida as paredes da cavidade. O Moldflow usa o conceito de temperatura de não escoamento (*no-flow temperature*) para distinguir as fases líquida e sólida. Essa é a temperatura na qual o material pode ser considerado sólido e é determinada experimentalmente.

A Figura 13 mostra a camada solidificada e algumas notações que serão usadas. Note que a espessura da camada não é simétrica.

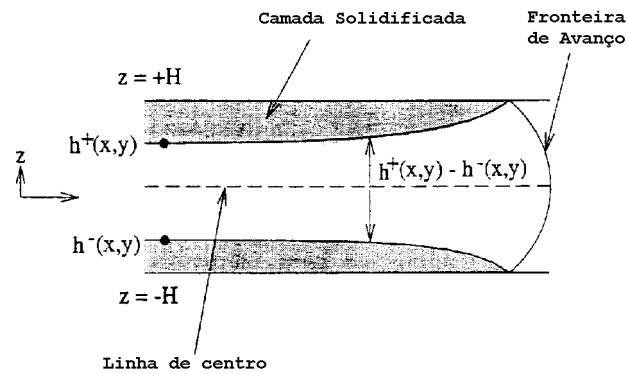


Figura 13 – Camada Solidificada (KENNEDY, P., 1995)

As equações (29) nas direções x e y são então integradas em z de $-h$ até z . A condição de não deslizamento é aplicada na interface da camada com o material fundido. Encontra-se as velocidades médias. Integrando a equação da continuidade entre $-H$ e $+H$, utilizando as velocidades médias, obtém-se uma equação para pressão que combina a equação do movimento e da continuidade.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (31)$$

onde S_2 é chamada de fluidez. O índice 2 indica o escoamento bidimensional.

Com essas considerações, o escoamento analisado pode ser classificado como um escoamento de Hele-Shaw. Este escoamento é utilizado em quase todos os modelos computacionais para análise de preenchimento de cavidades de moldes para plásticos (BRITO, A. M., 1995, C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994, SUBBIAH, S. A., 1990 e VASCONCELLOS, J. F., 1999).

Considerando o fluxo simétrico em relação a linha de centro da cavidade, a fluidez é dada por:

$$S_2 = \int_0^h \frac{z'^2}{\eta} dz' \quad (32)$$

Essa simplificação implica que a camada solidificada é também simétrica. Isso não é válido em alguns casos, como perto do canal de injeção e em cantos do molde. Nesses exemplos o efeito é local, induzindo a um erro global pequeno. Variações grandes de temperatura ao longo da espessura são encontradas em moldes reais devido a baixa

condutividade dos plásticos. Isso induz uma significativa assimetria e novamente um erro é gerado.

Para os canais de injeção, são feitas as mesmas considerações a respeito do material. As equações encontradas, (25) a (27), são transformadas para coordenadas cilíndricas e simplificadas assumindo-se uma geometria de seção circular, mostrada na Figura 14. Os campos de temperatura e velocidade são considerados simétricos em relação ao eixo longitudinal do canal. Uma análise dimensional é usada para determinar as magnitudes dos termos da equação da quantidade de movimento e da energia.

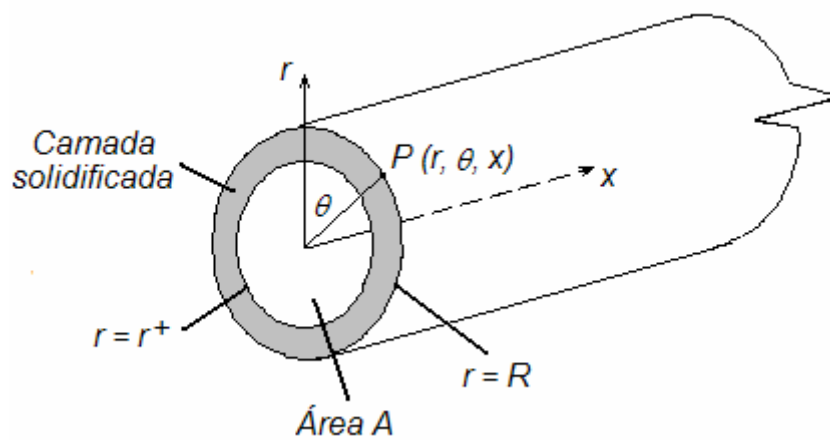


Figura 14 – Canal de injeção circular

As equações simplificadas são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (34)$$

Na equação da energia, a convecção na direção radial foi desprezada. A equação do movimento foi integrada duas vezes em relação a r , para se encontrar a velocidade na direção x , v_x . Uma velocidade média, $\overline{v_x}$, é definida. Ela é a vazão total através da seção transversal do canal dividida pela área. Usando-se essa velocidade na integração da equação da continuidade, obtém-se uma equação para a pressão.

Um resumo das equações simplificadas utilizadas no *software* Moldflow é apresentado a seguir:

Equação da Pressão para a cavidade

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (35)$$

onde

$$S_2 = \int_0^h \frac{z'^2}{\eta} dz' \quad (36)$$

Equação da Energia para a cavidade

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (37)$$

Equação da Pressão para canais de injeção circulares

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (38)$$

Equação da Energia para Canais de Injeção Circulares

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (39)$$

As condições de contorno para a pressão são:

- O gradiente de pressão normal a superfície em uma fronteira impermeável é zero. Essas fronteiras são as paredes e inserções no molde.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (40)$$

- Na entrada da cavidade a vazão e a pressão são conhecidas. Normalmente os programas de análise de fluxo usam a vazão na fase de preenchimento.
- Como a maioria dos moldes possui saídas de ar aprisionado no preenchimento, a pressão na frente de fluxo é considerada zero.

As condições para a equação da energia são:

- O perfil de temperatura ao longo da espessura da cavidade é prescrito para o ponto de injeção.
- A temperatura é prescrita em todas as fronteiras do molde. Uma temperatura diferente pode ser prescrita para cada fronteira.

Para resolver numericamente as equações da pressão descrita nesse modelo matemático, o Moldflow utiliza o método de elementos finitos com elementos triangulares, como os mostrados na Figura 15. Neste método as derivadas são aproximadas para cada elemento, criando-se equações algébricas aproximadas. Essas equações são reunidas para todo o domínio e um sistema de equações é gerado. Este sistema é então resolvido por um método iterativo e os valores das variáveis nos nós são determinados (KENNEDY, P., 1995).

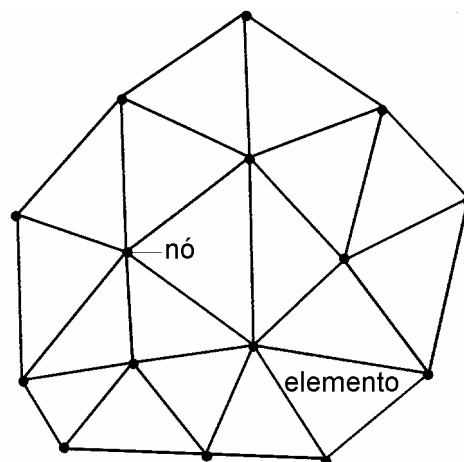


Figura 15 – Malha de elementos finitos (MALISKA, C. R., 1995)

Para resolver a equação da energia, é utilizado o método das diferenças finitas. A equação é discretizada utilizando a expansão da série de Taylor para as aproximações das derivadas (MALISKA, C. R., 1995). Os termos convectivos e os viscosos são tratados de forma explícita. Isto é, esses termos são avaliados no tempo anterior e tratados como termos fonte (KENNEDY, P., 1995). As derivadas espaciais são aproximadas por um esquema de diferenças centrais de segunda ordem. As equações discretizadas são resolvidas de forma explícita ou implícita dependendo do avanço no tempo desejado. Quando resolvidas explicitamente, as derivadas espaciais são avaliadas no tempo anterior. Quando resolvidas implicitamente, no tempo atual.

A frente de avanço é determinada usando um método de volumes de controle. Neste método para cada nó, um volume é associado. Estes volumes são polígonos obtidos pela união das medianas dos lados dos elementos triangulares com seus centróides. Depois de resolver a equação de pressão, a vazão em cada nó é conhecida e a frente de avanço pode ser calculada. Como o incremento no tempo é conhecido, pode-se testar se o nó está ou não cheio de fluido. Quando o nó está cheio, a frente avança.

Para determinar a parada da frente de fluxo, o Moldflow verifica a temperatura do polímero. Se a temperatura do polímero cair abaixo da temperatura de não escoamento (*no flow*), a frente não mais avançará.

3.2.2. C-mold Advanced Solutions

O C-Mold Advanced Solutions 98.7 é um *software* comercial para simulação da injeção de termoplásticos que era desenvolvido e comercializado pela Advanced CAE Technology. A partir de abril de 2000, a Moldflow adquiriu a Advanced CAE Technology, e passou a desenvolver e comercializar os produtos C-Mold, que oferece ao usuário os mesmos recursos descritos no item anterior para o Moldflow, e ainda a simulação de outros processos de transformação como a co-injeção e o encapsulamento de *chips*. As hipóteses feitas por esse *software* serão descritas a seguir (HIEBER, C. A., SHEN, S. F., 1978).

Para o processo de injeção, o número de Reynolds é tipicamente pequeno devido a grande viscosidade do polímero. Por isso, a aproximação para o escoamento lento onde os efeitos inerciais são desprezados é utilizado. Como as cavidades são tipicamente finas, as forças dinâmicas na direção da espessura são de pequena ordem, e então a análise de Hele-Shaw, utilizada no *software* Moldflow também é utilizada. A simulação do escoamento

conforme apresentada nas equações governantes, seção 4.1. é complicada, pelos efeitos não-newtonianos do fluido e pelo acoplamento com o campo de temperatura. Sob as mesmas prerrogativas já citadas: fina espessura das cavidades, escoamento dominado pelo cisalhamento e a viscosidade dependente da temperatura e da taxa de cisalhamento, o modelo de Hele-Shaw foi considerado adequado para a dinâmica do fluxo pelos desenvolvedores do C-Mold.

As equações (25) a (27) são também usadas neste *software*.

Na equação (25), a conservação da massa, as velocidades v_x e v_y são velocidades médias, \bar{v}_x e \bar{v}_y dadas por

$$\bar{v}_x = \int_{-b}^b v_x dz / 2b \quad , \quad \bar{v}_y = \int_{-b}^b v_y dz / 2b \quad (41)$$

onde $2b$ é a espessura da cavidade. Essas velocidades são usadas no avanço da frente e no cálculo da vazão volumétrica.

Dadas as definições

$$\Lambda_x \equiv -\frac{\partial p}{\partial x} \quad , \quad \Lambda_y \equiv -\frac{\partial p}{\partial y} \quad , \quad \Lambda \equiv |\nabla p| = (\Lambda_x^2 + \Lambda_y^2)^{1/2} \quad (42)$$

E usando as condições de contorno fornecidas a seguir pela Eq. (49) , as Eqs. (26), ficam

$$v_x = \Lambda_x \int_z^b \frac{\tilde{z} d\tilde{z}}{\eta} \quad , \quad v_y = \Lambda_y \int_z^b \frac{\tilde{z} d\tilde{z}}{\eta} \quad (43)$$

E a taxa de cisalhamento que é dada por

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(\partial v_x / \partial z)^2 + (\partial v_y / \partial z)^2} \quad (44)$$

fica definida como

$$\dot{\gamma} = \Lambda z / \eta \quad (45)$$

E a partir de (31), pode-se dizer que

$$\bar{v}_x = \frac{S}{b} \Lambda_x \quad , \quad \bar{v}_y = \frac{S}{b} \Lambda_y \quad (46)$$

onde

$$S \equiv \int_z^b \frac{z^2 dz}{\eta} \quad (47)$$

Combinando as Eqs. (25) e (46), encontra-se

$$\nabla \cdot (S \nabla p) \equiv \nabla S \cdot \nabla p + S \nabla^2 p = 0 \quad (48)$$

O problema, então se reduz a resolução da equação da energia e da equação (48), com as seguintes condições de contorno:

$$v_x = v_y = 0 \text{ em } z = b; \quad \frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial v_y}{\partial z} \text{ em } z = 0 \quad (49)$$

$$T = T_c \text{ em } z = b; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ em } z = 0 \quad (50)$$

Inicialmente a velocidade e temperatura eram consideradas simétricas em z . Nas versões mais novas do *software*, este aspecto foi reformulado e as integrais são feitas de $-b$ até b . Considera-se que o molde mantém-se a temperatura do refrigerante durante o preenchimento.

O *software* ainda considera uma queda de pressão maior quando houver uma diminuição brusca do diâmetro dos canais. O algoritmo implementa um modelo definido internamente quando a variação de diâmetro maior que duas vezes o diâmetro anterior. Este modelo se sobrepõe ao modelo padrão. A perda de pressão, ΔP , é definida então em função da nova perda, ΔP_e e da tensão de cisalhamento, τ_w , como

$$\Delta P = \Delta P_e + \left(\frac{4L}{D} \right) \times \tau_w \quad (51)$$

A seguinte correlação é adotada para a definição de ΔP_e ,

$$\Delta P_e = C_1 \times (\tau_w)^{C_2} \quad (52)$$

onde C_1 e C_2 são constantes do material obtidas experimentalmente através do fluxo do material em capilares de diferentes razões L/D (C-MOLD REFERENCE MANUAL, 1996).

Portanto, neste modelo a tensão de cisalhamento não é proporcional a queda de pressão nos casos de mudança abrupta de diâmetros.

Os modelos de viscosidade mais comumente usados pelo CMold são (C-MOLD REFERENCE MANUAL, 1996) a Viscosidade Cross-(exp), a Viscosidade Carreau-WLF e a Viscosidade Cross-WLF, descritos na seção 2.3.2. O programa usa automaticamente o modelo disponível de maior número de constantes, no caso o Cross-WLF. O *software* dispõe ainda de outros modelos como a Viscosidade Carreau-(exp), o de Primeira (Lei de Potências) e o de Segunda Ordem do Moldflow e modelo da Lei de Potência Exponencial.

A condutividade térmica e o calor específico do polímero para a análise de preenchimento são considerados constantes. Para as análises de recalque e resfriamento, se existirem dados experimentais da variação destas propriedades com a temperatura o C-Mold irá considerar esta variação e aproximará estes dados a modelos matemáticos (C-MOLD REFERENCE MANUAL, 1996).

A temperatura de transição, T_{trans} , é usada pelo C-MOLD como a temperatura de congelamento do polímero para cálculo nas análises de empenamento. Essa temperatura corresponde a temperatura de transição vítrea, T_g , para polímeros amorfos e a temperatura de cristalização, T_c , para os polímeros semi-cristalinos. Teoricamente, os valores da temperatura de transição determinada pela curva pvT, calor específico, condutividade térmica e pela viscosidade deveriam ser idênticos. Porém, os valores típicos dessa transição não são tão próximos devidos as limitações das técnicas de medição. Os testes convencionais de pvT são baseados em medições no equilíbrio ou numa taxa de resfriamento bem lenta. As propriedades físicas dos materiais semi-cristalinos (como PET, PBT, Náilon, etc) dependem do grau de cristalização. Durante a injeção, a cristalização do material depende de vários parâmetros de processo, principalmente a taxa de resfriamento. A partir da versão 98.7, para materiais semi-cristalinos, a C-MOLD desenvolveu a técnica para medir os dados pvT em condições de resfriamento rápido semelhante as encontradas no processo de injeção.

A temperatura de transição é uma propriedade física do polímero e é diferente da temperatura de não escoamento (*no flow*). Segundo o C-MOLD REFERENCE MANUAL (1996), o uso da temperatura de não escoamento, que é geralmente mais alta que a temperatura de transição, leva a valores superestimados de tensão residual e de pressão em casos de preenchimento e recalque lentos de peça finas. No C-Mold, a parada da frente de fluxo (*short shot*) é calculada baseado na pressão e vazão na injeção. Inicialmente, define-se o limite de pressão de injeção disponível. Durante a análise de preenchimento, o algoritmo verificará se esta pressão é excedida. Se isto acontecer, a pressão passará a ser a condição de

contorno, fixada no máximo determinado e a vazão irá variar até que diminua abaixo de 1% da vazão nominal (C-MOLD REFERENCE MANUAL, 1996).

3.2.3. Programa desenvolvido no SINMEC

O programa desenvolvido no SINMEC por Vasconcellos (MALISKA, C. R., VASCONCELLOS, J. F., 1998 e VASCONCELLOS, J. F., 1999), resolve a equação da pressão para a cavidade descrita no item anterior, Eq. (26), sem as simplificações que resultaram a Eq. (29), utilizando o método de volumes finitos. Esta técnica consiste em subdividir o domínio físico em pequenos volumes. Nesses volumes é feita a integração das equações diferenciais que governam o problema. Desta forma obtém-se um conjunto de equações lineares, cuja solução fornecerá os valores das variáveis no centro dos volumes. Os volumes utilizados neste trabalho são os diagramas de Voronoi, que formam uma malha não-estruturada. Esta malha foi escolhida para eliminar as limitações quanto a geometria que são encontradas nas malhas estruturadas, normalmente usadas neste método. Além disso, os diagramas de Voronoi facilitam a realização dos balanços de conservação sobre os volumes. Isso se deve a perpendicularidade das linhas que ligam os pontos vizinhos com a face entre eles, como pode ser visto na Figura 16. Assim, as derivadas normais são facilmente avaliadas.

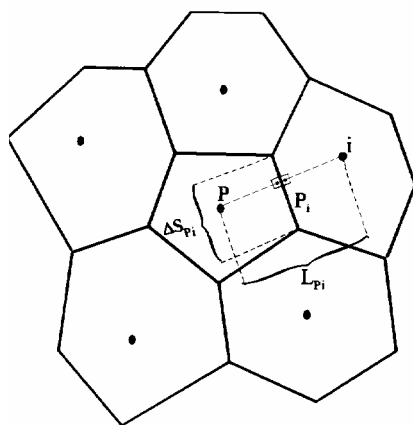


Figura 16 – Diagramas de Voronoi (MALISKA, C. R., 1995)

O conhecimento da metodologia utilizada e o acesso ao código computacional promovem a possibilidade de modificação de modelos, simplificações e alterações nas rotinas de cálculo. Com isso, é possível a simulação do escoamento de materiais diferentes, como o pó metálico, por exemplo, objeto de pesquisas do PRONEX, e o estudo de simplificações que forneçam resultados mais próximos dos reais.

Para fluidos Newtonianos o programa já foi validado, apresentando bons resultados para geometrias bidimensionais simplesmente conexas. Os fluidos não-Newtonianos também serão simulados utilizando como modelo de viscosidade, o Modelo Cross-WLF. A parte térmica ainda está sendo implementada, portanto a equação da energia não foi acoplada e o problema resolvido é considerado isotérmico.

4. Casos Estudados

Neste capítulo, alguns estudos de caso serão apresentados para mostrar a utilização destes programas na previsão de resultados em geometrias simples. O objetivo é discutir a consistência dos resultados com base na comparação dos resultados obtidos.

4.1. Previsão da Posição do Encontro da Frente de Avanço

O caso estudado para a verificação do padrão de preenchimento da cavidade foi o de uma peça retangular contendo furo circular de espessura de parede variável, conforme mostra a Figura 18. Para esta peça, Hieber (HIEBER, C. A. *et al*, 1983) realizou um estudo experimental e verificou também a eficácia de um programa de simulação de fluxo desenvolvido em sua pesquisa (HIEBER, C. A. *et al*, 1983). Portanto, utilizando os dados experimentais obtidos neste trabalho, pôde-se verificar os resultados fornecidos pelo Moldflow e pelo C-Mold para o padrão de preenchimento da peça e posição de encontro de fluxo.

4.1.1. Polímero utilizado e Modelos de viscosidade

A injeção da peça foi feita utilizando-se um Poliestireno fornecido pela Dow Chemical, com nome comercial Styron 678. As propriedades deste material estão presentes no banco de dados da Moldflow e da C-Mold. Na tabela 1, as propriedades térmicas são mostradas e em seguida mostrar-se-á os Modelos de Viscosidade.

Tabela 1: Propriedades Térmicas do Styron 678.

Propriedade	Moldflow	C-Mold
Condutividade Térmica (W/m °C)	0.138	0.150
Calor Específico (J/kg °C)	1811	2100
Temperatura de “no flow” (°C)	130.0	-

No banco de dados da Moldflow o material está descrito pelo modelo de viscosidade de Segunda Ordem e no C-Mold utilizando o modelo de viscosidade Cross WLF. Os gráficos da Figura 17 mostram as curvas de viscosidade caracterizadas pelos dois modelos.

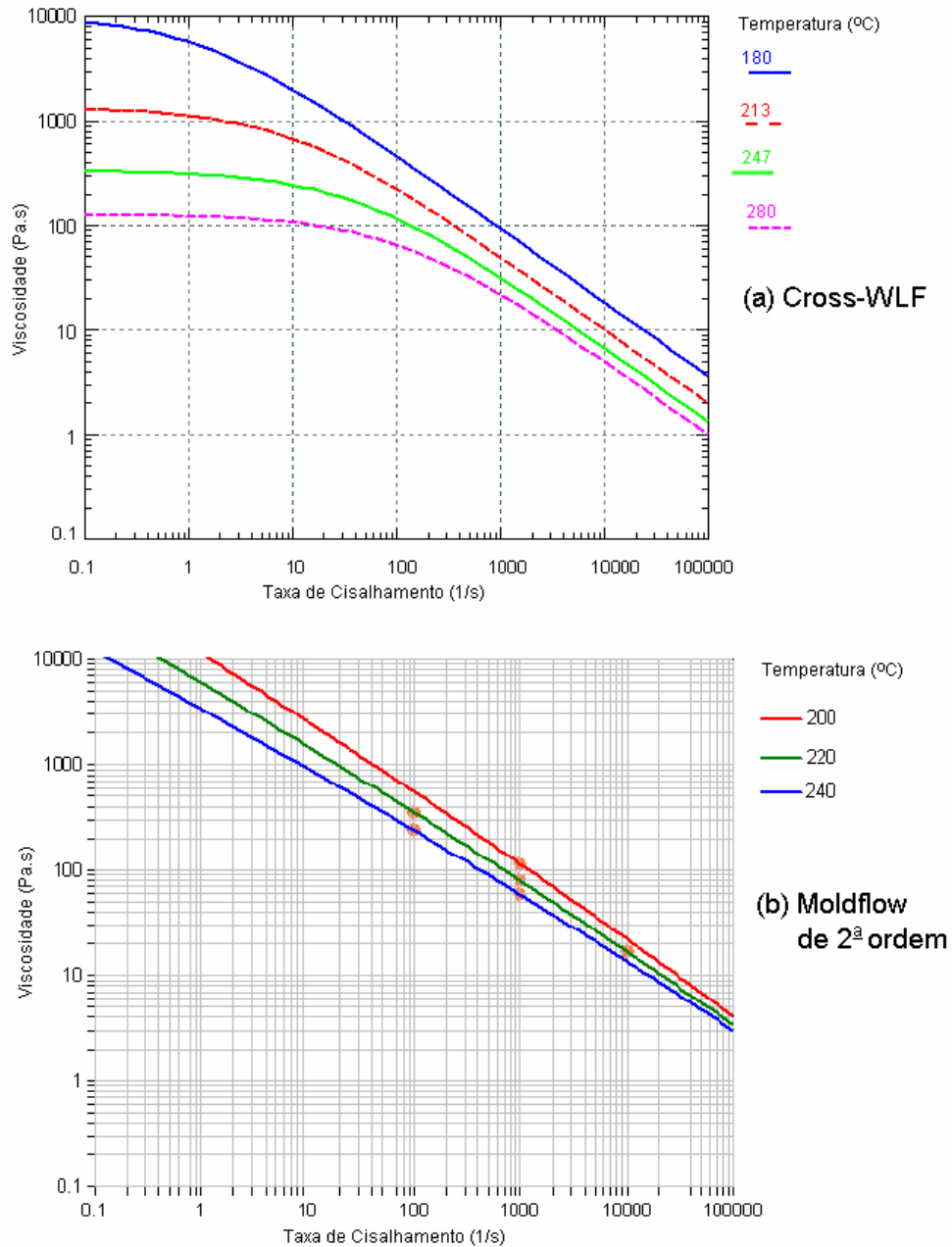


Figura 17 – Viscosidade em função da Taxa de Cisalhamento para modelo de viscosidade (a) Cross-WLF usado no C-Mold e (b) de Segunda ordem do Moldflow.

Nota-se que o modelo Cross-WLF consegue captar o platô Newtoniano a baixas taxas de cisalhamento e que o modelo de Segunda Ordem não mostra esta região onde a viscosidade não varia com a taxa de cisalhamento. Mesmo na região após o platô Newtoniano, observa-se diferenças entre os valores de viscosidade dos dois programas. No modelo de Segunda Ordem do Moldflow, os valores são maiores que no Cross-WLF.

4.1.2 – Geometria do modelo e da peça real

Na peça real há uma entrada de 12.7mm de espessura ao longo da entrada lateral da peça. Este artifício, provavelmente, foi utilizado por Hieber para facilitar o modelamento matemático, considerando o início do preenchimento após o preenchimento completo deste “canal”. A espessura da parede da peça não é constante sendo maior na parte superior do produto. Na simulação feita neste trabalho, a região do canal foi modelada. Este não é o modelo apropriado para o modelo matemático usado nos *softwares* comerciais, pois trata-se de um espessura grande em comparação ao comprimento nominal (normalmente recomenda-se $L/d < 4$) e a aproximação de Hele-Shaw não é, portanto, adequada. A seguir, na Figura 18(a), vê-se o desenho e as dimensões do produto e na Figura 18(b) vê-se a malha usada nas simulações e a aproximação para a espessura variável. Para a espessura foi necessário “fatiar” o domínio e aproximar a variação de espessura para faixa de valores médios da região. A malha gerada no software Moldflow possui em torno de 1490 elementos triangulares e 5 elementos bidimensionais que descrevem o canal circular de entrada e foi usada para ambos os estudos.

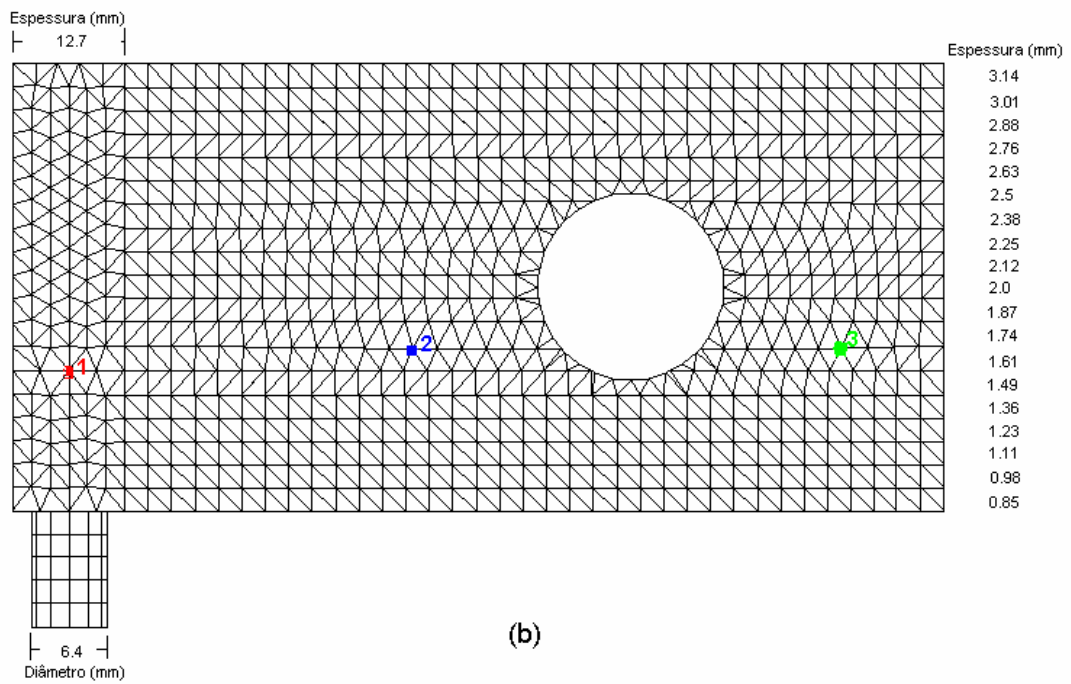
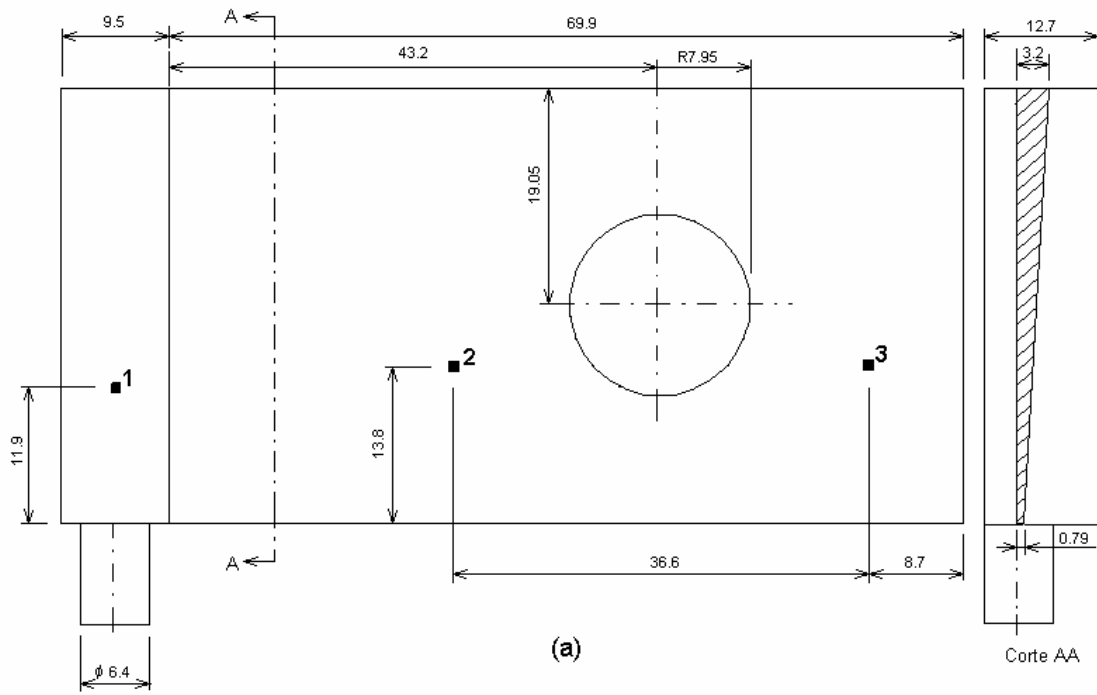


Figura 18 – (a) Dimensões em mm e posição dos transdutores de pressão na peça (HIEBER, C.A. *et al*, 1983). (b) espessuras e malha utilizadas na simulação.

4.1.3 - Resultados

A figura 19 mostra que a previsão de ambos os *softwares* comparado ao resultado experimental. Os resultados numéricos sobrestimam a velocidade da frente de avanço, mas conseguem captar razoavelmente a posição da linha de solda.

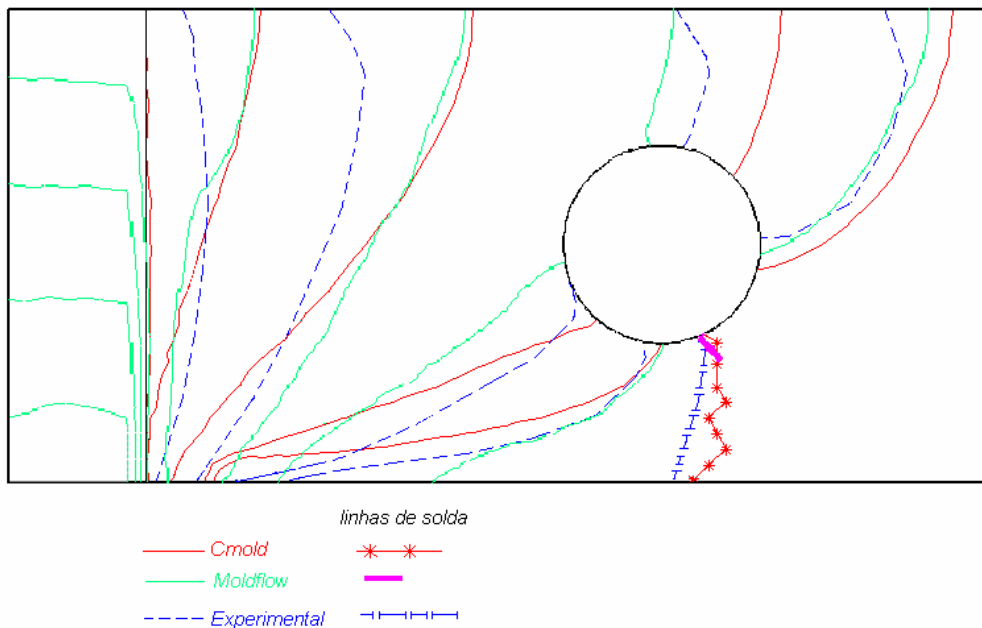


Figura 19 – Comparação entre as frentes de avanço e as linhas de soldas previstas nos *softwares* Moldflow e C-Mold e em resultados experimentais.

Uma possível causa deste avanço maior da frente em relação ao fluxo real é a não consideração da troca de calor entre as paredes laterais da peça. Com isso, a viscosidade do material calculada é mais baixa que na realidade e consequentemente a velocidade da frente é maior. No trabalho de Hieber (1983) este efeito também foi observado.

O *software* C-Mold prevê uma leve hesitação do fluxo (grande redução na velocidade da frente) um pouco depois da entrada e certamente as linhas de solda estariam marcadas neste local se a malha usada fosse mais refinada. A diferença na previsão do avanço da frente nesta região nos dois *softwares*, pode estar relacionada a abordagem diferente de parada no escoamento. O Moldflow usa o conceito de temperatura *no flow* e o C-Mold calcula a viscosidade até que ela diminua a vazão consideravelmente. Estas diferenças foram exploradas na seção 4.2. Como o material escoava preferencialmente ao longo do canal de 12.7

mm, a vazão na região inferior da cavidade cai bastante. Sendo este o critério usado para determinar a parada do fluxo, o programa pára a frente nesta região. Na posição final de encontro de fluxo, o *software* Moldflow necessita de uma malha mais refinada para marcar toda a extensão da linha de solda formada. As linhas de solda nos dois *softwares* são inseridas nos contornos dos elementos, portanto quanto mais refinada a malha, melhor este resultado será apresentado.

Portanto, este é um cuidado que os usuários dos *softwares* que pretendem obter um resultado evidenciado da posição de linhas de solda deve ter. A malha deve ser refinada nestas regiões e os resultados devem ser confrontados com as isocrônicas, que mostram a frente de avanço.

Através das medidas dadas pelos transdutores de pressão, pôde-se comparar o resultado de pressão ao longo do tempo para um determinado nó da malha. O gráfico da Figura 20 mostra os valores obtidos.

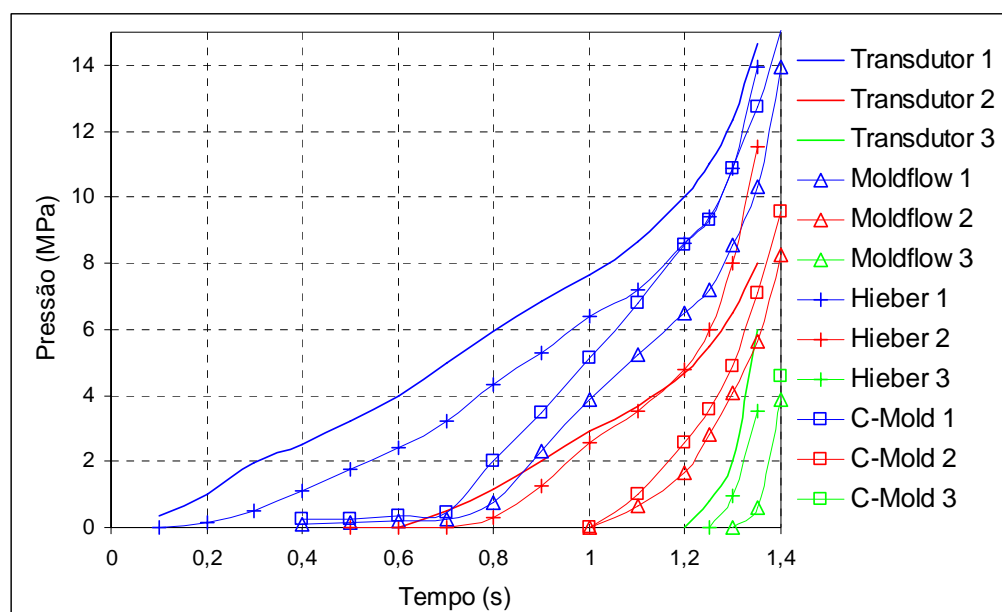


Figura 20 – Pressão ao longo do tempo para o resultado experimental, para os *softwares* Moldflow e C-Mold e para o programa desenvolvido por Hieber (1983).

Nota-se que os resultados de pressão calculados pelos simuladores foram inferiores para todos os transdutores ao longo do tempo. Apesar disto, a forma acentuada com que a pressão aumenta ao final do preenchimento é razoavelmente captada e a pressão no final do preenchimento para o transdutor 1 é bem próxima ao resultado experimental.

O erro pode estar associado aos efeitos tridimensionais desconsiderados na formulação. No caso do transdutor 1, ele está disposto em uma região de grande espessura onde a parede lateral é larga, sendo portanto uma grande área de troca de calor que pode influenciar no cálculo da viscosidade e conseqüentemente na pressão necessária para o preenchimento da cavidade. Como esta região é espessa, a componente da velocidade na direção da espessura da peça passa a ser importante e não poderia ser desprezada. Conseqüentemente, estes fatores podem estar gerando erros no cálculo da pressão. Nota-se que no início do preenchimento, para o transdutor 1, os dois *softwares* comerciais calculam uma pressão quase nula, enquanto o transdutor de pressão registra um aumento gradativo. Em 0.7s, as curvas do Moldflow e C-Mold mostram uma inflexão acentuada e depois prevêm uma variação similar ao resultado experimental. O momento da inflexão, 0.7s, corresponde ao final do preenchimento do canal de 12.7 mm. Portanto, isto vem reforçar a hipótese de que os efeitos tridimensionais desconsiderados neste caso causaram as diferenças nos resultados. Estes erros podem ter se propagado ao longo do tempo até o final do preenchimento para um mesmo nó e por toda a cavidade afetando os resultados dos nós representativos dos outros transdutores de pressão.

Os resultados obtidos por Hieber (1983) em seu *software* foram mais próximos dos resultados experimentais, mas também captaram valores de pressão menores que os experimentais. Seu algoritmo é baseado na resolução da Eq. (28), usando o método de elementos finitos e na resolução da equação da energia por diferenças finitas ao longo da espessura da cavidade. O modelo de viscosidade usado foi a Lei de Potências. A consideração da entrada paralela do fluxo na cavidade, pode ter minimizado os possíveis erros da desconsideração dos efeitos tridimensionais.

A comparação de resultados numéricos com resultados experimentais é delicada, pois várias são as variáveis do processo que não podem ser controladas e corre-se o risco da resolução de problemas distintos. Como, os resultados foram obtidos por outro pesquisador, é difícil identificar possíveis fatores que possam ter contribuído para as diferenças encontradas. Na seção 5.4, discutir-se-á mais sobre aspectos importantes da experimentação.

4.2 – Preenchimento de um Disco com Injeção Central

Nesta seção apresentar-se-á os resultados da simulação do preenchimento de um disco com injeção central. Estas simulações foram feitas nos *softwares* C-Mold e Moldflow. O

objetivo principal deste estudo foi verificar a simetria nos resultados fornecidos. Por isso, a injeção de um disco com a geometria simples, simétrica em relação ao eixo central e condições de contorno também simétricas, foi adotada. Espera-se, portanto, que as isocrônicas, isobáricas e isotermas calculadas sejam círculos concêntricos, isto é, a solução seja a mesma para qualquer ponto de mesmo raio.

Alguns aspectos que diferem os resultados fornecidos pelos dois *softwares* devem ser explicados. O resultado de temperatura mostrado pelo Moldflow é um resultado nodal, refere-se à temperatura da frente de avanço e é a média ao longo da espessura. No C-Mold, o resultado de temperatura é fornecido para cada elemento, é referente a temperatura no final do preenchimento e é uma média ponderada com a velocidade ao longo da espessura.

O disco possui 100mm de diâmetro e espessura constante de 1mm. Cinco malhas diferentes foram utilizadas, todas elas geradas pelo gerador de malha do *software* C-Mold. Para geração da malha, o *software* baseia-se nas superfícies e pontos usados para definir o círculo, criando nós ao longo dos limites das superfícies e nos pontos definidos. Na Figura 21, as geometrias usadas são mostradas.

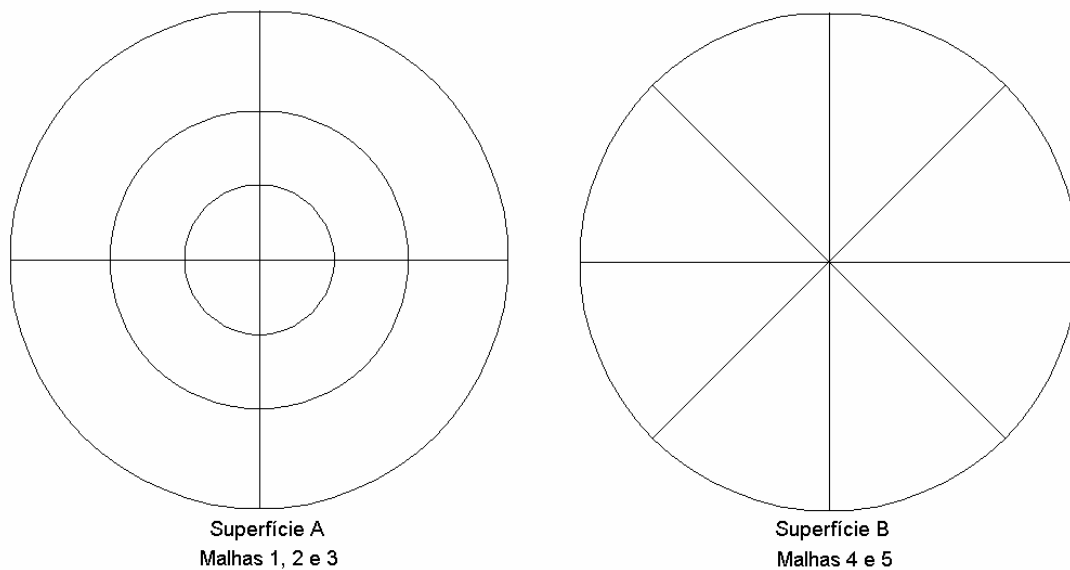


Figura 21 – Superfícies utilizadas como bases para as malhas usadas nesta seção.

As malhas 1, 2 e 3 possuem respectivamente, 880, 1750 e 3638 elementos. As superfícies geradas nesta malha, permitem a comparação de elementos e nós em um mesmo raio.

Para essas malhas, o polímero usado foi um ABS da BASF, cujo nome comercial é TERLURAN 867M. Para cada *software* foi utilizado o seu modelo padrão de viscosidade, isto é, para o Moldflow, o Modelo de Segunda Ordem e para o C-Mold o modelo Cross-WLF.

As condições de contorno usadas foram:

Tempo de preenchimento = 1.5s,

Temperatura do molde = 25 °C e

Temperatura de Polímero = 270 °C .

Na Figura 22, pode-se ver os resultados do *software* Moldflow nos gráficos de temperatura ao longo do tempo em nós de mesmo raio para as malhas 1, 2 e 3. Na Figura 23, são apresentadas as isobáricas e isotermas do mesmo *software*, no final do preenchimento, para as mesmas malhas. E nas Figuras 24 e 25, em seguida, estão os resultados apresentados para as mesmas malhas, mesmo material e mesmas condições de contorno, porém gerados através do *software* C-Mold. As legendas estão apresentadas em inglês, pois as Figuras foram extraídas do pós-processamento de cada *software*, e preferiu-se manter suas características.

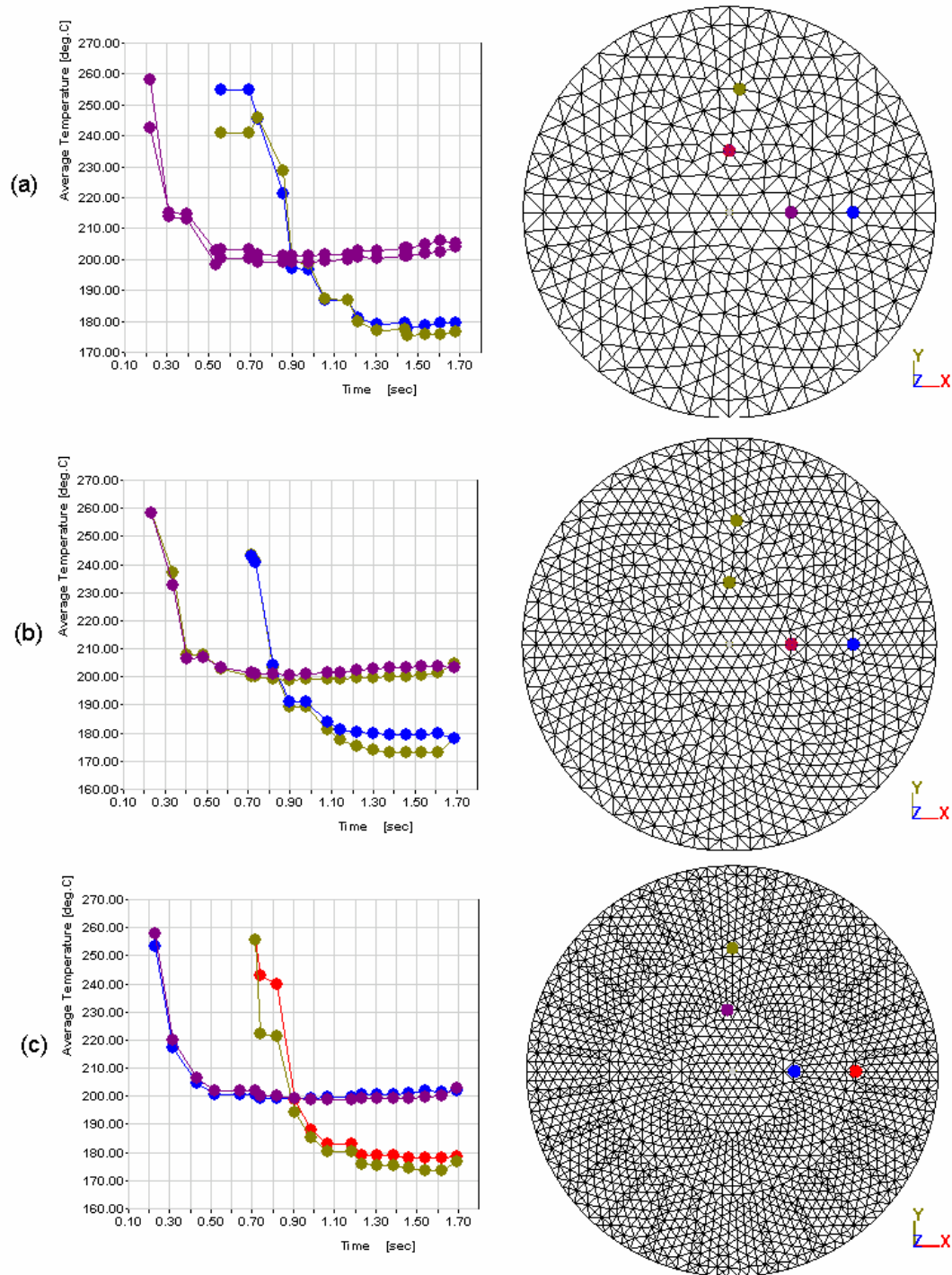


Figura 22 – Temperatura em função do tempo em nós de mesmo raio, calculada no *software* Moldflow. (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.

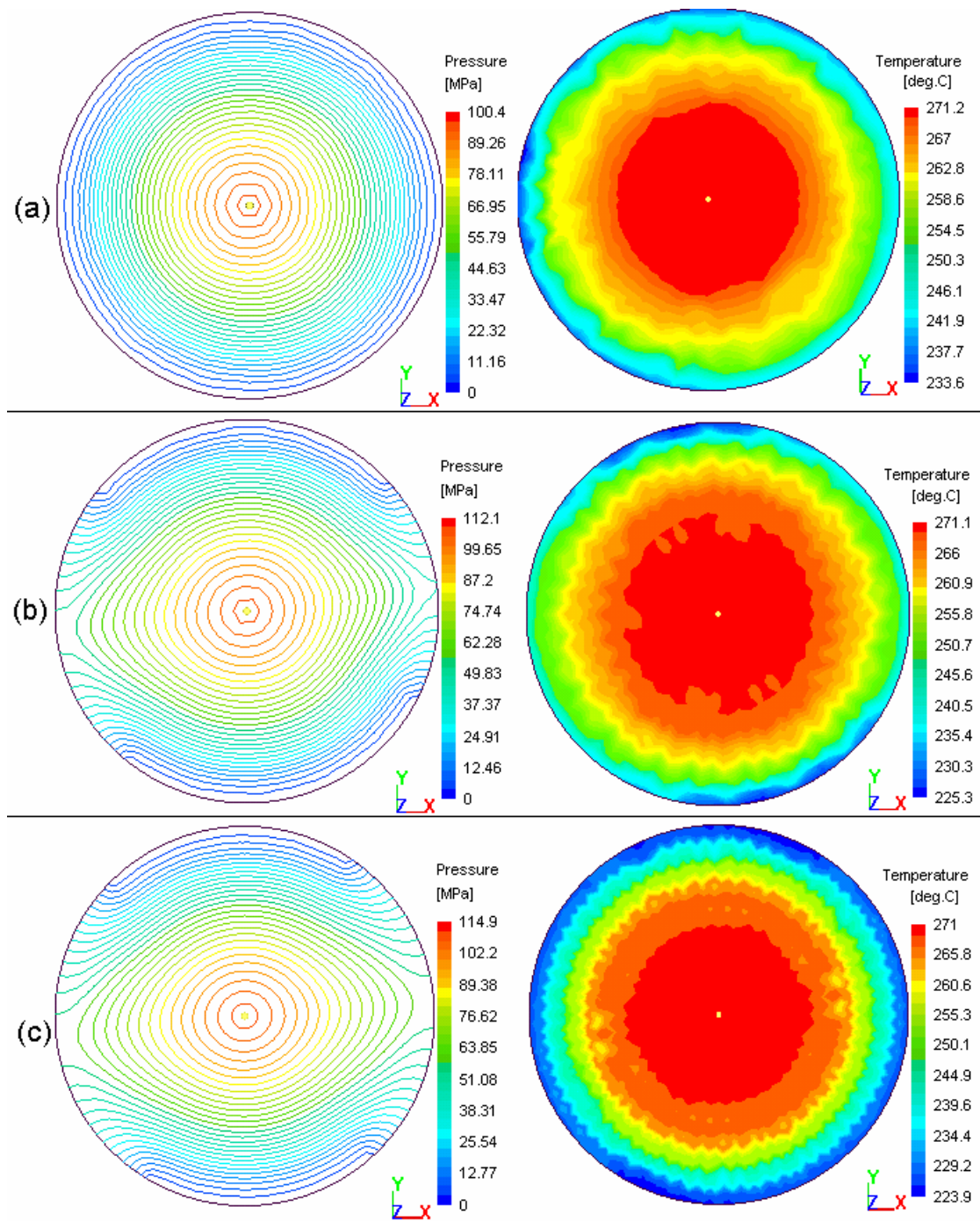


Figura 23 – Isobáricas e Isotermas no final do preenchimento para (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3. Resultados obtidos no *software* Moldflow

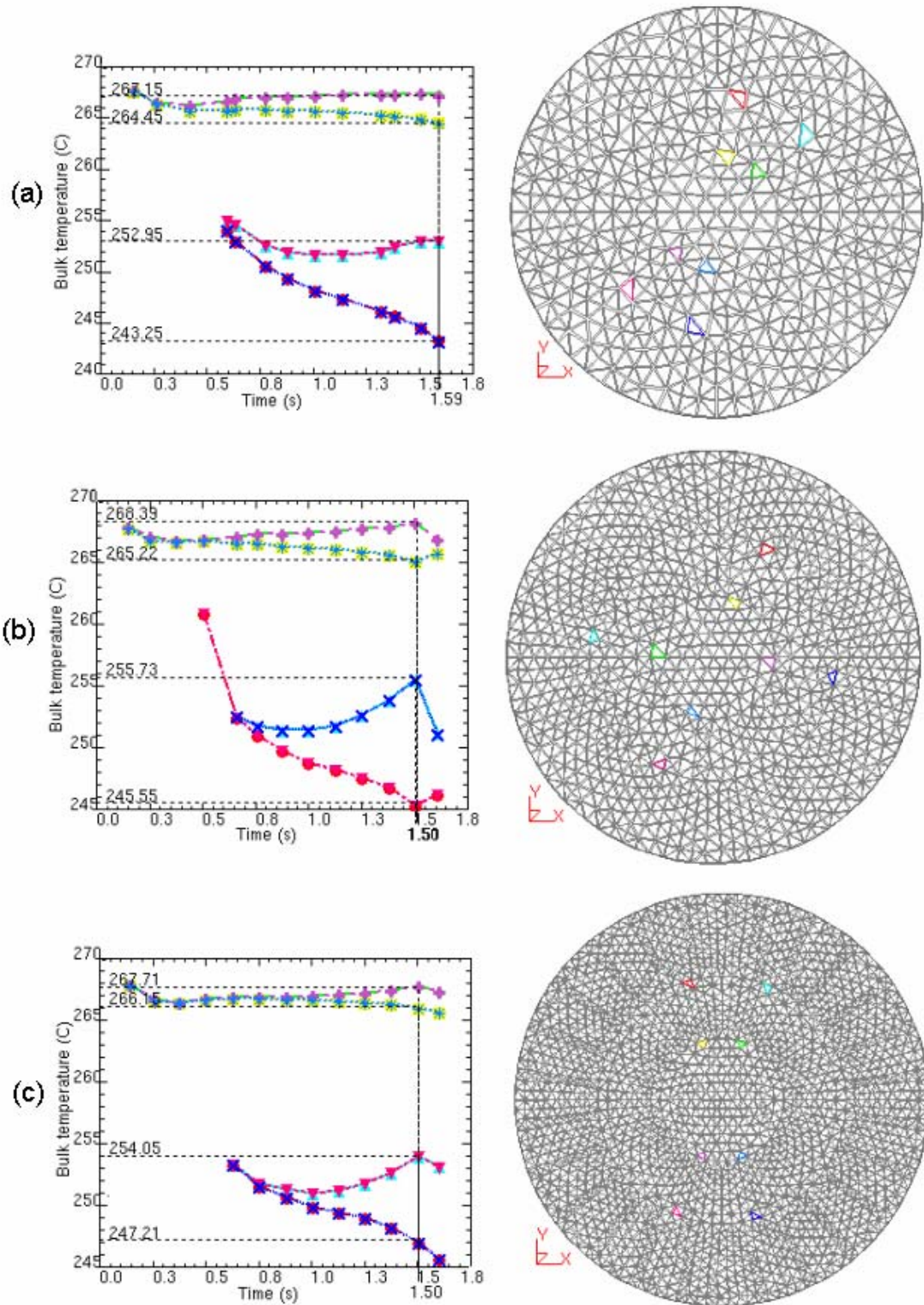


Figura 24 – Temperatura em função do tempo em nós de mesmo raio, calculada no *software* C-Mold. (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.

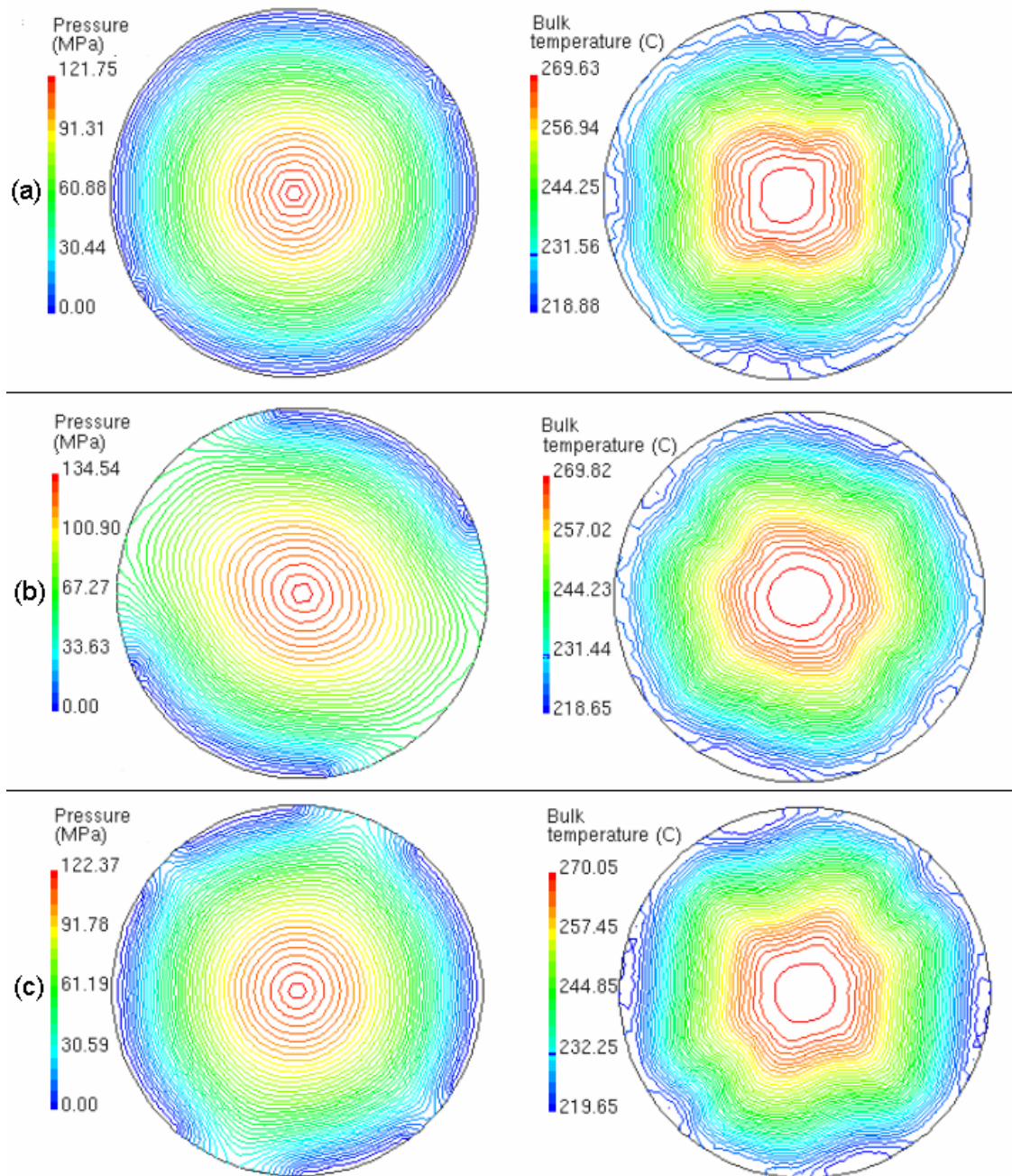


Figura 25 – Isobáricas e Isotermas no final do preenchimento para (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3. Resultados obtidos no *software* C-Mold.

Pode-se verificar que existe uma assimetria no resultado da temperatura e pressão em ambos os programas. Os nós escolhidos nas Figuras 19 e 21, mostram as maiores diferenças de temperatura ao longo do raio.

Este erro é mais evidenciado no *software* C-Mold. Com o refino da malha, não foi observado uma diminuição sistemática do erro, como era esperado. A maior diferença de

temperatura passou de 9.7°C para 10.18°C e então para 6.84°C com o aumento do número de elementos.

Outro aspecto interessante, é a não preocupação com a simetria dos resultados. Mesmo com a presença de erros no algoritmo, o problema é um problema completamente simétrico. Portanto, qualquer erro gerado deveria se propagar de forma simétrica, o que não se verifica neste caso.

Nota-se também, que as isobáricas são mais fortemente afetadas pelas diferenças no campo de temperatura quando a malha é mais fina.

Inicialmente, a assimetria nos resultados parecia um erro devido a alguma difusão numérica presente no algoritmo. Porém, normalmente estes erros deveriam diminuir com o refinamento da malha. Como, neste caso, a diferença nos resultados não mostrou esta tendência para o *software* C-Mold, principalmente, surge a dúvida se este erro não estaria incorporado à essência do *software*. Outra possibilidade, seria a geração de erros sistemáticos no pós processamento.

Peças plásticas, principalmente aquelas que são simuladas na indústria, possuem geometrias complexas e raramente simétricas. Isto justifica o fato do gerador de malha não possuir esta condição para criação da malha. Contudo, a simetria no resultado, independente da malha gerada, é importante para o usuário do *software* que procure resultados muito precisos, pois em uma geometria complexa, não poderá avaliar o erro causado por esta falha. Para aplicação dos resultados nos projetos de moldes e peças, este erro é irrelevante, pois o principal objetivo da fase de preenchimento é a verificação da frente de avanço que mostrou-se simétrica.

Para verificar a influência da malha no campo de temperaturas, realizou-se análises usando as malhas 4 e 5 com 1800 e 3600 elementos. Elas foram geradas a partir da superfície B (Figura 21), para que tivessem simetria entre as superfícies. Com isso, a malha criada tem 8 regiões simétricas, isto é, os elementos são idênticos entre os “gomos”. Os resultados obtidos estão mostrados nas Figuras 23 e 24, para os *softwares* Moldflow e C-Mold, respectivamente.

Neste teste foi utilizado um ABS da Daicel, um material com a viscosidade mais dependente da temperatura do que o TERLURAN 867M. As condições de processo foram tempo de preenchimento = 1s, temperatura do molde = 25°C e temperatura de polímero = 260°C. Os resultados estão nas Figuras 26 e 27.

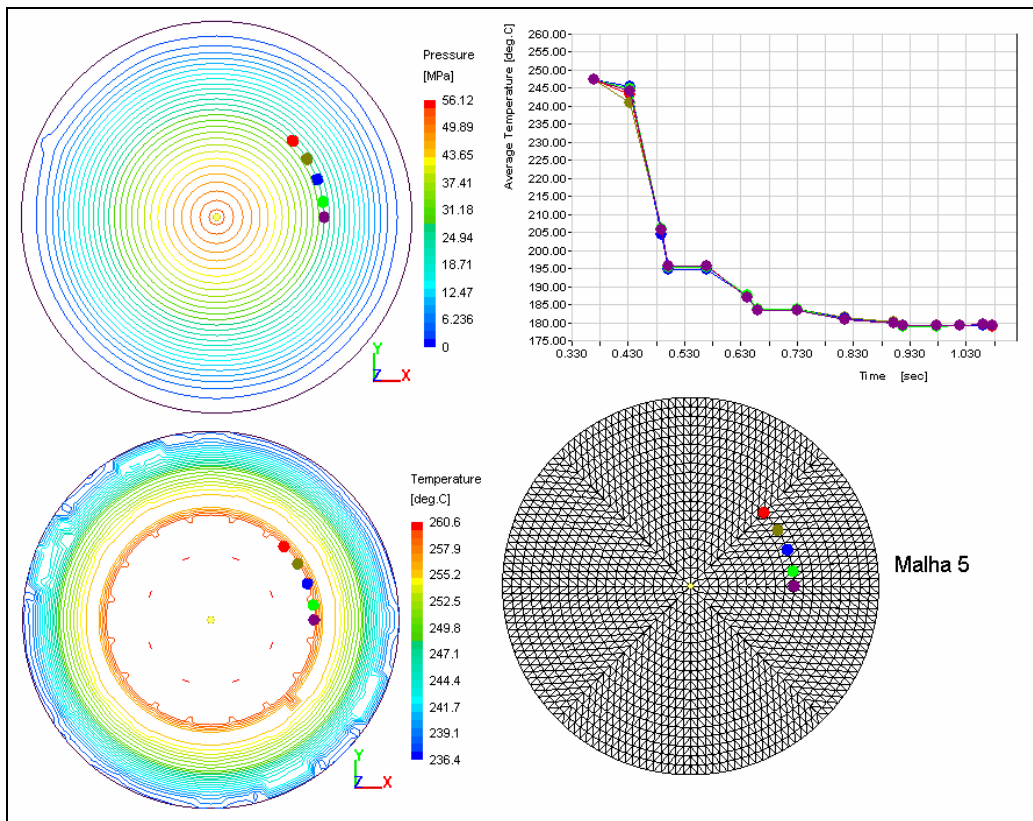
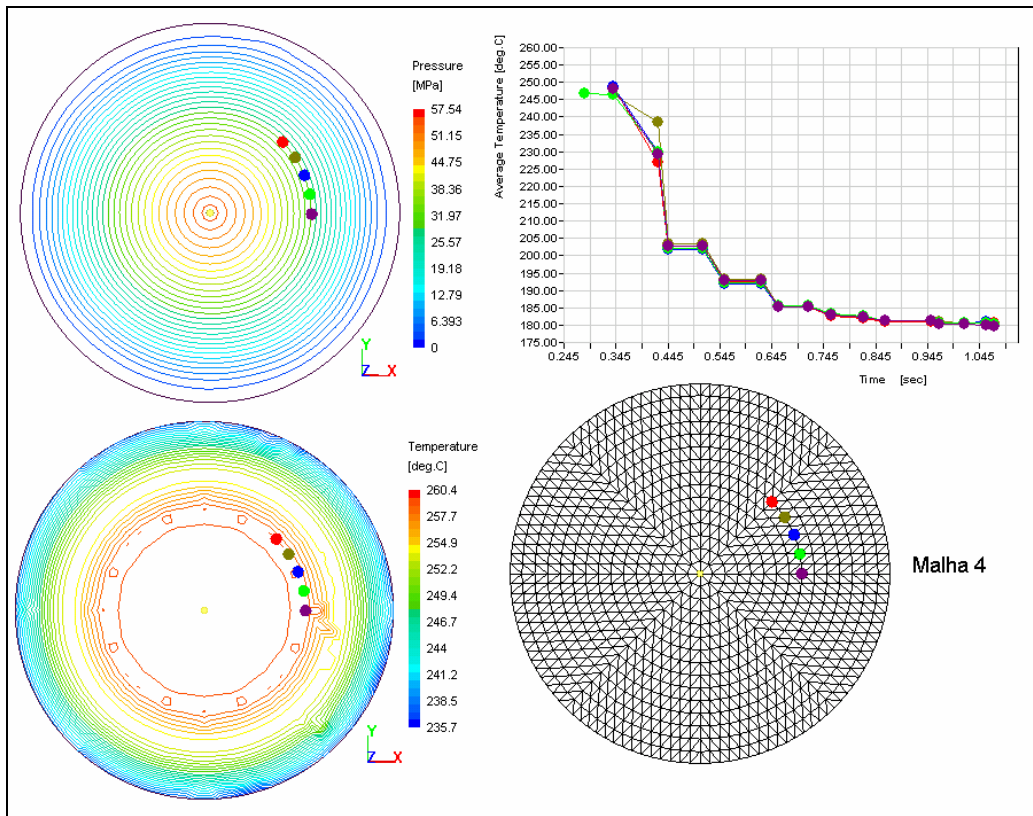


Figura 26 – Pressão, temperatura e temperatura ao longo do tempo para malhas 4 e 5, obtidas no *software* Moldflow.

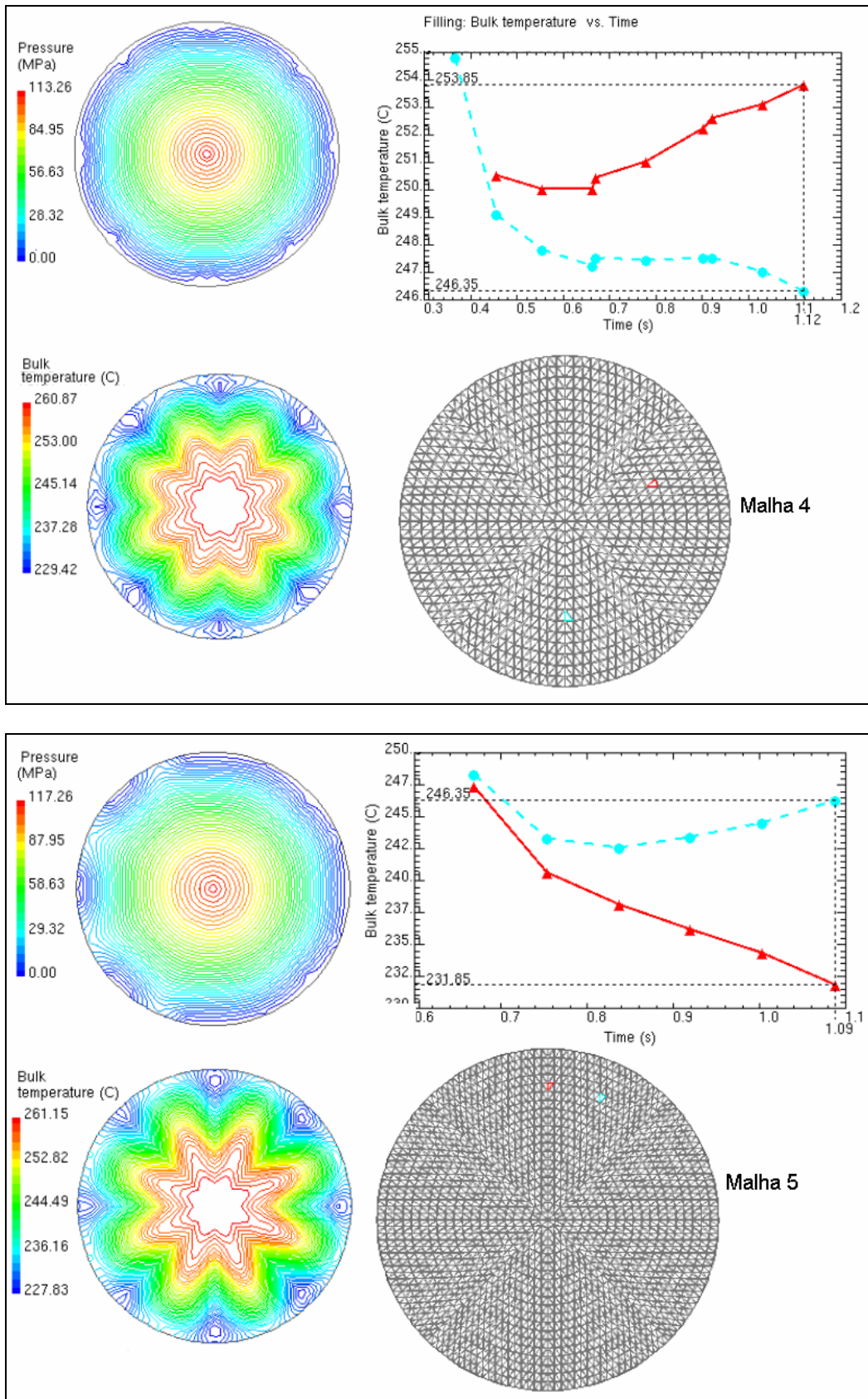


Figura 27 – Pressão, temperatura e temperatura ao longo do tempo para as malhas 4 e 5, calculadas pelo C-Mold.

Com a utilização desta malha simétrica em oitavos do círculo, pôde-se observar como o algoritmo do C-Mold é fortemente dependente da malha, mesmo quando esta é bastante refinada, existindo inclusive um aumento do erro com o refino da malha. Na malha mais fina, a diferença de temperatura entre dois pontos de mesmo raio chega a 14.5°C. O Moldflow mostra-se menos dependente da malha.

Não foi possível precisar as causas destas assimetrias pois os algoritmos do *software* são protegidos e não foi possível obter informações mais detalhadas sobre sua implementação. Esta é uma grande dificuldade no estudo de *softwares* comerciais, pois muitas vezes não há informações detalhadas disponíveis sobre a forma como as equações são resolvidas.

4.3. Injeção de um semi-anel com diferentes espessuras

Nesta seção os resultados obtidos em três simuladores distintos são comparados. Dois deles, pacotes comerciais amplamente usados no meio industrial, o Moldflow e o C-Mold, que utilizam a simplificação de Hele-Shaw. O terceiro, um programa desenvolvido no SINMEC por Vasconcellos (1999), que utiliza as equações completas na resolução do problema.

A geometria utilizada como modelo é a metade de um anel com raio externo de 100 mm e raio interno de 25 mm, mostrada na Figura 28. Diferentes espessuras foram atribuídas ao modelo em casca: 5 mm, 10 mm e 20 mm.

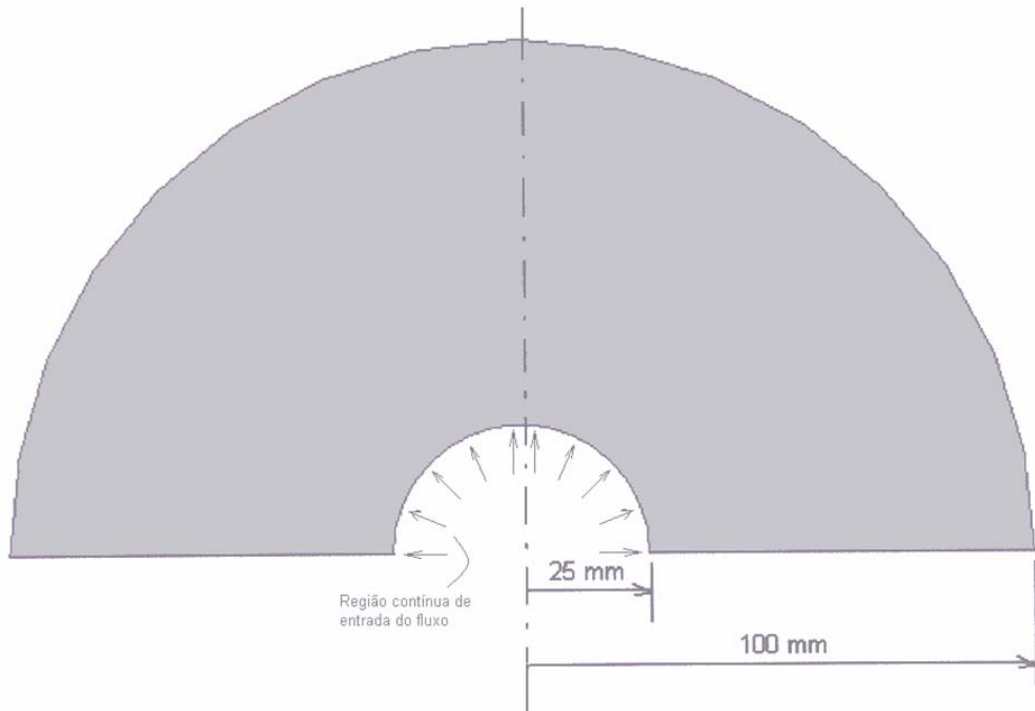


Figura 28 – Modelo do semi-anel utilizado neste terceiro estudo.

O polímero utilizado foi o polipropileno da Hoechst, HOSTACOM M2 NO2. Este material foi escolhido porque o programa de Vasconcellos, por se tratar de um programa acadêmico interessado no estudo dos métodos de avanço de frente, não resolve a equação da energia. A viscosidade deste material varia muito pouco com a temperatura e portanto esta diferença entre os programas poderá ser minimizada. O modelo de viscosidade utilizado nos três programas foi o modelo Cross- WLF. A curva de viscosidade deste material está mostrada na Figura 29.

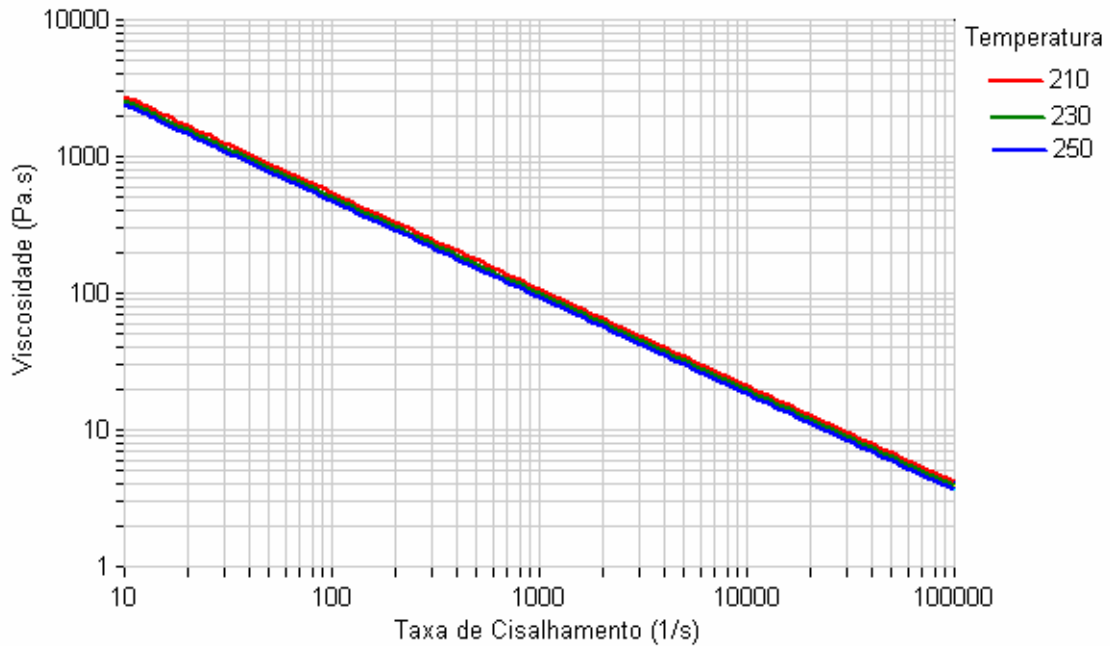


Figura 29 – Curva de viscosidade do HOST ACOM M2N02

As condições de contorno utilizadas na simulação foram:

-tempo de injeção = 1s

-temperatura do molde = 1000 C,

-temperatura do polímero = 2400 C e

-entrada do material por todos os nós do círculo interno.

No caso do *software* de Vasconcellos, a condição de contorno prescrita é a velocidade de entrada, que foi fixada em 0.17 cm/s para obter o preenchimento da cavidade em aproximadamente um segundo.

Os resultados obtidos para a pressão de injeção ao longo do raio nos três programas são apresentados na Figura 30.

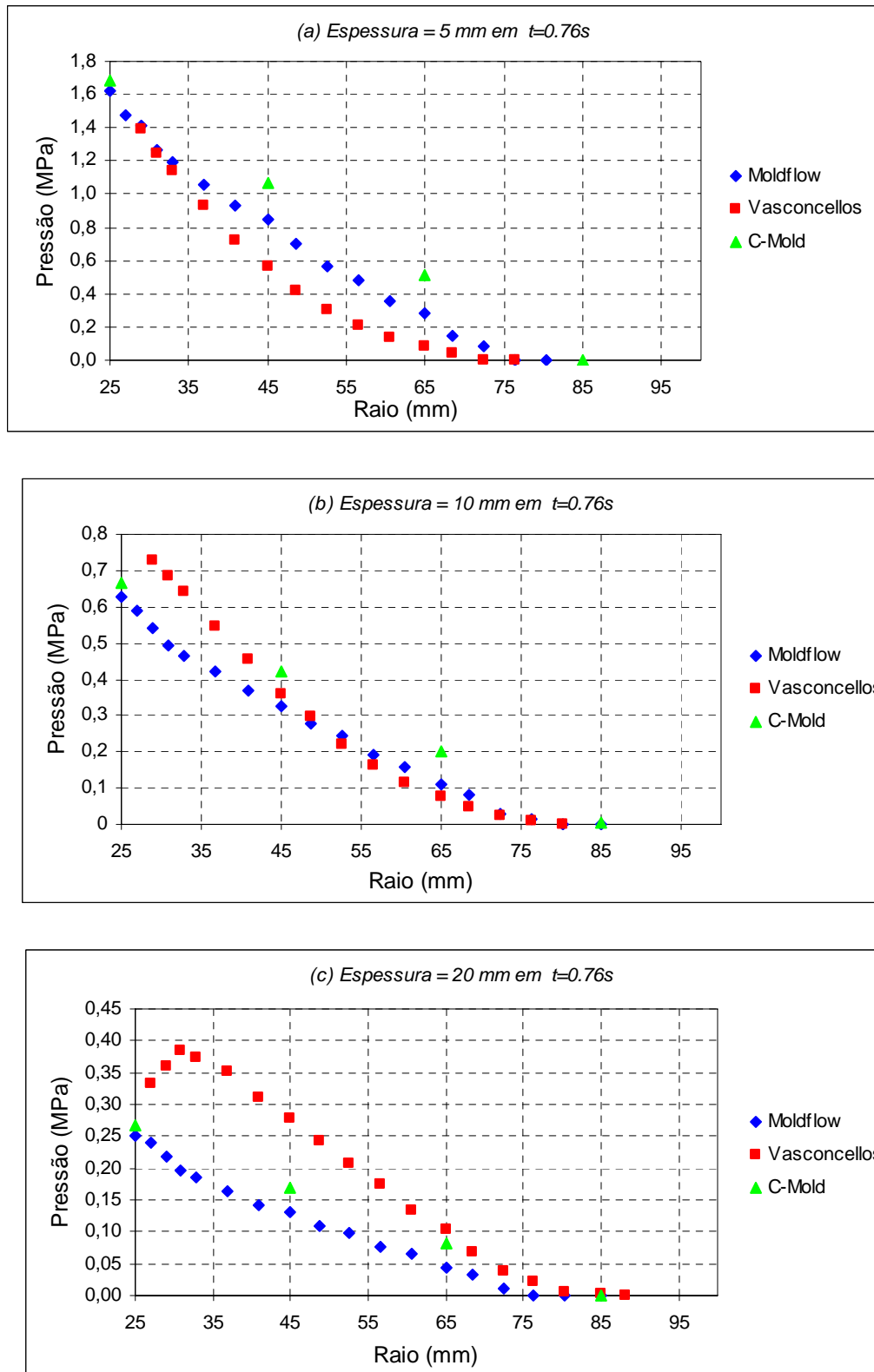


Figura 30 – Pressão em função do raio no tempo de 0.76s, para os semi-anéis de (a) 5mm, (b) 10mm e (c) 20mm.

Os dois *softwares* comerciais apresentaram resultados similares, sendo que o Moldflow apresentou em todos os casos uma pressão um pouco menor que o software C-Mold. Nos dois softwares, a condição de contorno prescrita de tempo de injeção, é apenas uma indicação da vazão desejada para o preenchimento da peça. Internamente, os *softwares* calculam uma vazão nominal, através do volume da peça e do tempo informado. Esta vazão varia ao longo do preenchimento, à medida que a frente do polímero avança. Acredita-se que isto ocorre, porque esta vazão é sempre recalculada para atingir o objetivo do tempo de injeção selecionado. Com isso, há pequenas variações no tempo final de preenchimento dos dois softwares. O Moldflow preencheu esta cavidade em 1.002s e o C-mold em 1.02s. Esta diferença pode ter ocasionado a diferença nos resultados. A simetria ao longo de posições de mesmo raio foi verificada neste caso e é muito boa para ambos os softwares, não apresentando portanto resultados similares aos discutidos na seção 4.2. O efeito da assimetria pode ter sido minimizado pela entrada do polímero em vários pontos.

Para a cavidade de 5 mm, o resultado de Vasconcellos mostra uma pressão menor que às apresentadas pelo C-Mold e Moldflow. Esta diferença poderia estar relacionada ao fato do programa de Vasconcellos não considerar a transferência de calor. Para verificar se a pressão variaria com a variação de temperatura, simulações com diferentes temperaturas de molde foram feitas no Moldflow. Como pode-se notar no gráfico da Figura 31, a temperatura não influenciou nos valores da pressão de injeção.

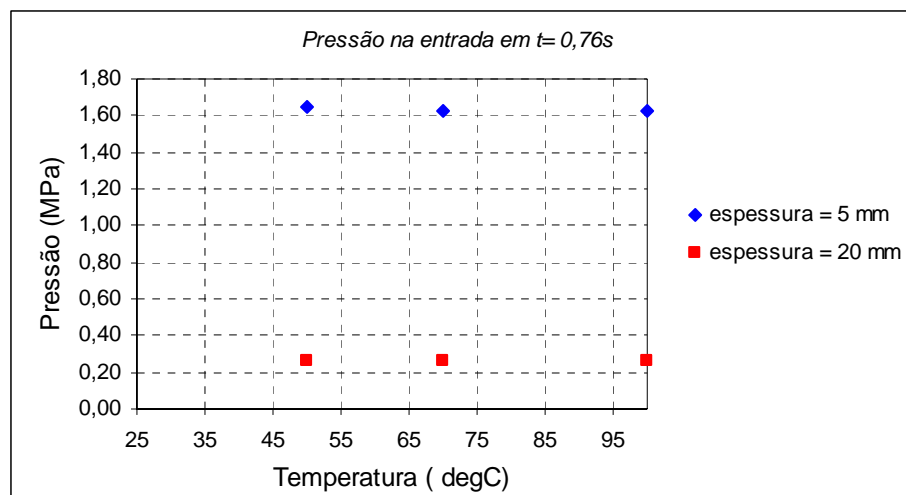


Figura 31 – Pressão em função da temperatura do molde adotada na condição de contorno.

O modelo com menor espessura, é típico para utilização das simplificações propostas na metodologia do C-Mold e Moldflow, pois a razão entre o caminho percorrido pelo material e

a espessura é de 15. Por isso, acredita-se que as diferenças no caso da espessura igual a 5 mm, não se devem a influência de fatores tridimensionais.

Uma outra diferença entre o programa de Vasconcellos e os pacotes comerciais é que, no primeiro o resultado de pressão é a pressão na linha de simetria do problema, isto é, na metade da espessura do modelo. No caso dos softwares comerciais, a pressão é a média das pressões ao longo da espessura. Esta diferença no pós-processamento pode ser um dos fatores da diferença dos resultados.

No modelo de 20 mm de espessura, o programa de Vasconcellos apresenta um resultado inesperado no início da cavidade, um pico na curva de pressão. Visto que este efeito não aparece nos casos anteriores, ele pode ter sido causado pela consideração das equações completas. No entanto, não parece correto, visto que a pressão de injeção será sempre maior em um ponto mais próximo da entrada.

O programa de Vasconcellos apresentou uma oscilação na função viscosidade, discutida em sua tese de doutorado (VASCONCELLOS, J. F., 1999). A função viscosidade, próxima a linha de centro, onde o resultado de pressão apresentado é fornecido, apresenta uma grande oscilação para um problema com geometria semelhante à analisada neste capítulo. Esta oscilação foi mais forte no problema com maior espessura. Na linha média da espessura do modelo, o gradiente das velocidades u e v em relação a z são nulos. Com isso, $\dot{\gamma} = 0$ e a viscosidade nesta linha de simetria é aproximadamente $1,5 \times 10^8$. Uma pequena variação de $\dot{\gamma}$, levará a uma queda enorme no valor da viscosidade. Esta grande variação pode levar a um erro numérico no cálculo das velocidades, conseqüentemente no cálculo da taxa de cisalhamento que afetará o valor da viscosidade. Valores incorretos da viscosidade certamente irão influenciar no valor da pressão nesta região.

O modelo com 10 mm foi o que apresentou os resultados mais semelhantes entre os três programas. Não se pode dizer se os efeitos discutidos anteriormente tiveram menor influência, ou se a soma deles permitiu resultados mais similares.

O objetivo deste capítulo é a discussão das diferenças entre os programas. Não havendo infelizmente, um quarto resultado experimental que pudesse ser utilizado para julgamento, não foi possível identificar qual dos resultados representa melhor a realidade.

4.4 -Injeção em uma cavidade espiral

O comprimento de fluxo é um parâmetro importante para comparação de resultados obtidos com modelos matemáticos de previsão de injeção e resultados experimentais. Neste trabalho a injeção de uma cavidade em espiral de seção trapezoidal foi injetada para diversas situações e os resultados do comprimento de fluxo obtidos foram comparados com aqueles obtidos com o *software* comercial Moldflow. A injeção das peças foi realizada no Laboratório de Processamento de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, com o auxílio do doutorando Marcelo M. Ueki e do técnico Mário Donizete Miranda para regulagem e operação da máquina injetora.

A máquina utilizada foi a Arburg 370V, de força de fechamento de 80 t mostrada na Figura 32.



Figura 32 – Máquina Injetora Arburg 370 V (NRPP/UFSAR, 2000).

A cavidade injetada é uma espiral de seção transversal constante com 1000mm de comprimento, conforme a Figura 33. O desenho 2D do molde, com base no qual foi feito o modelo para simulação, encontra-se no Apêndice 1.

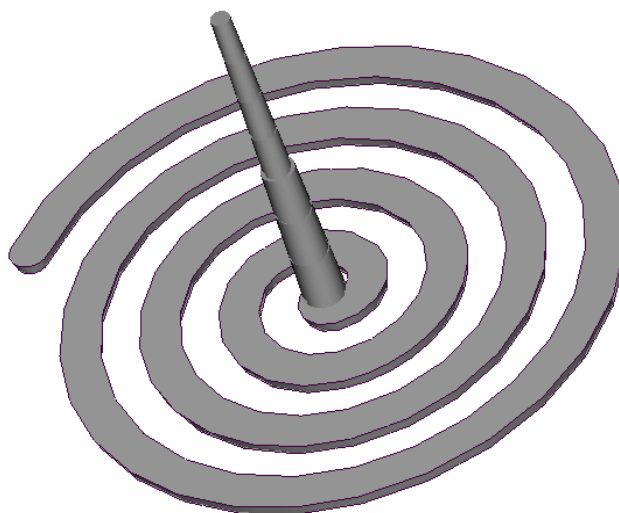


Figura 33 – Desenho da espiral injetada com canal de alimentação.

O material injetado foi um Poliestireno, gentilmente cedido pela BASF, com o nome comercial PS 168N. Este polímero apresenta baixo índice de contração, aspecto importante neste caso, pois uma grande contração poderia prejudicar a medida final do comprimento do material escoado.

Foram adotadas três condições de processo e para cada condição foram selecionadas cinco peças. A média do comprimento de fluxo foi calculada e usada para comparação com os resultados numéricos. As condições de processo adotadas estão na tabela 2.

Tabela 2: Condições de processo para Injeção da Espiral.

AMOSTRA	DOSAGEM	COMUTAÇÃO	VAZÃO	PRESSÃO APÓS A COMUTAÇÃO	TEMPERATURA DO POLÍMERO	TEMPERATURA DO MOLDE
A	30 cm ³	33.33% ou 20 cm ³	40 cm ³ /s	47MPa	230 °C	45 °C
B	30 cm ³	50% ou 15 cm ³	40 cm ³ /s	47MPa	230 °C	45 °C
C	30 cm ³	33.33% ou 20 cm ³	40 cm ³ /s	47MPa	230 °C	60 °C

O volume total da peça considerando o canal de alimentação é de 28,26 cm³, portanto, a quantidade dosada garantiu que o fluxo não parasse por falta de material. No início da injeção, a máquina injetora controla o preenchimento mantendo a vazão especificada, que para todos os casos foi de 40 cm³/s.

A comutação descrita na tabela 2 indica quando a máquina e o *software* começam a controlar o fluxo pela pressão. Para a condição A, por exemplo, esta comutação acontece após

a injeção de 33.33% do material na cavidade ou seja, no ajuste da máquina, quando ainda faltam 20 cm³ a serem injetados. Após a comutação entre a fase de controle por vazão e a fase de controle por pressão, a máquina injetora mantém a pressão especificada, que foi de 500 bar, que corresponde à pressão hidráulica da máquina. Através de comparação entre a pressão hidráulica, P_{hid} , mantida e a pressão do polímero, P_{pol} , medida pelo transdutor de pressão localizado no bico de injeção, pôde-se verificar que a relação é igual a

$$P_{pol} = 0.94 P_{hid} \quad (53)$$

Esta relação é importante pois o *software* trabalha com a pressão do polímero na entrada da cavidade. A comutação por volume de material injetado foi escolhida pois é possível selecionar a mesma condição de contorno no *software*.

A temperatura do polímero é ajustada na máquina através da temperatura das resistências no cilindro de injeção. Conforme já discutiu-se na seção 2.3.4, esta temperatura pode não representar realmente a temperatura do polímero. Um termopar posicionado no bico de injeção mediu uma temperatura de 230°C. Esta é a temperatura que será usada nas simulações.

Este molde possui canais de refrigeração, porém nas análises optou-se por considerar o molde a uma temperatura homogênea. De outra forma, por limitações da entrada de dados do software, após uma análise de resfriamento não seria possível definir as condições de processo, como a pressão de comutação, por exemplo. Portanto, adotou-se a temperatura medida do fluido refrigerante, no caso água, nas faixas de 45 e 60°C.

Os resultados comparativos podem ser vistos nas Figuras 34 a 36 para as condições de processo A, B e C.

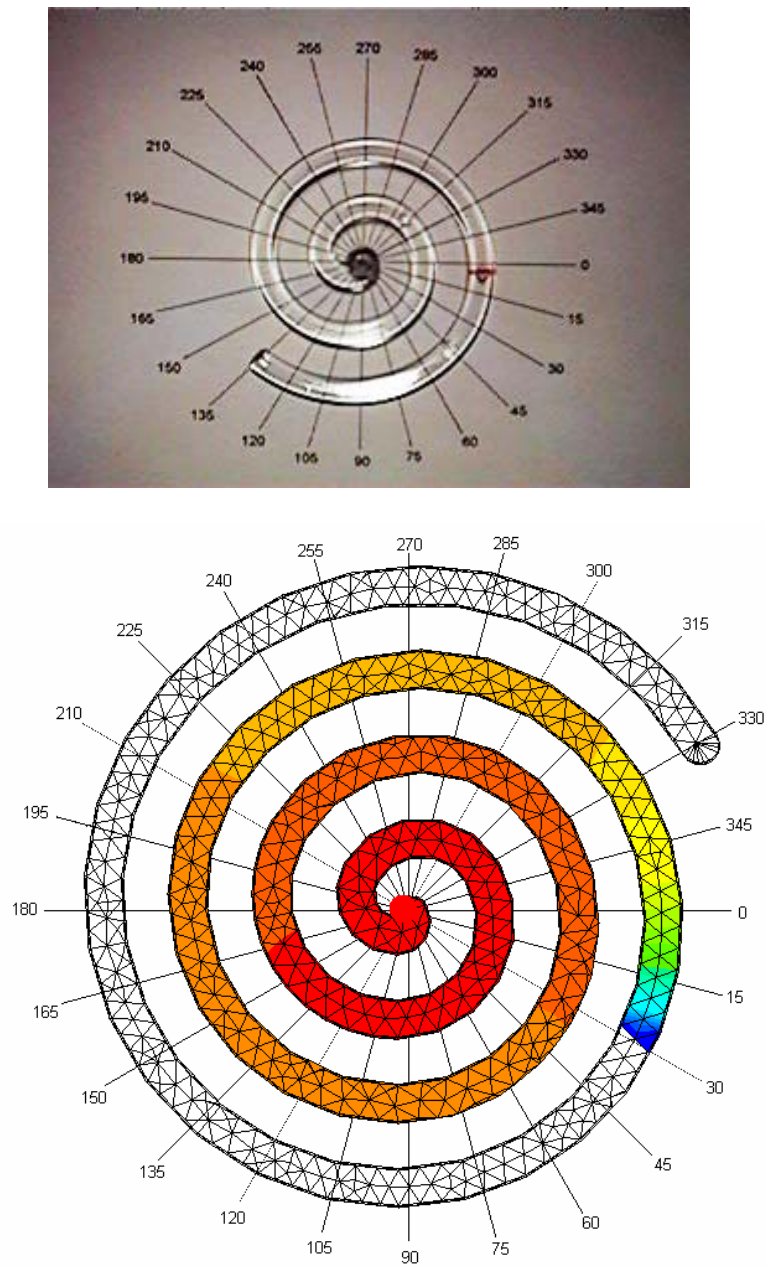


Figura 34 – Resultado do Moldflow e experimental para a condição de processo A.

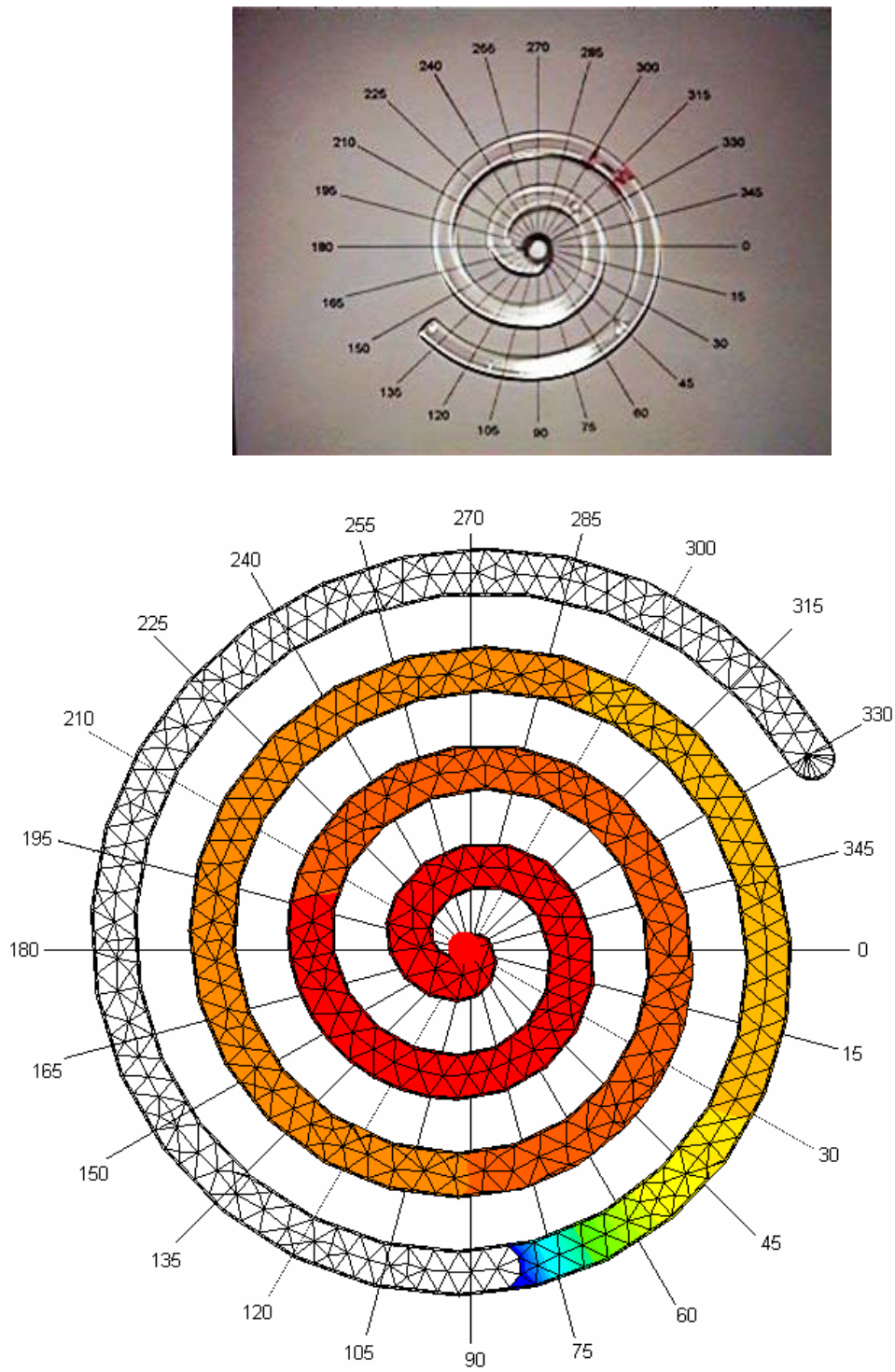


Figura 35 – Resultado do Moldflow e experimental para a condição de processo B.

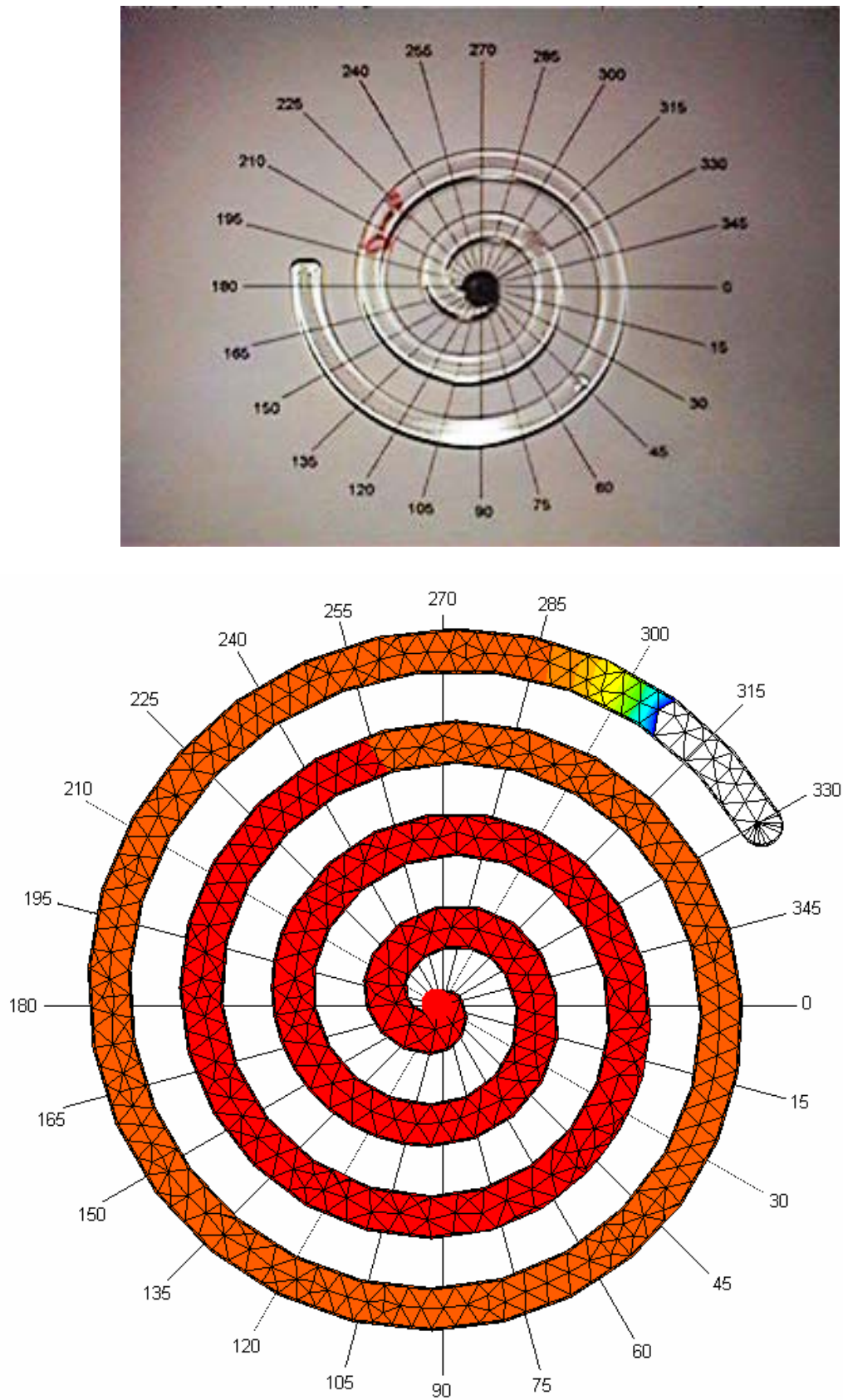


Figura 36 – Resultado do Moldflow e experimental para a condição de processo C.

Pode-se verificar que a simulação previu comprimentos de fluxo maiores que os obtidos nos resultados experimentais. Uma avaliação precipitada pode levar a uma conclusão simples de que o algoritmo implementado no software Moldflow não funciona adequadamente. Entretanto, alguns pontos importantes devem ser discutidos com o objetivo de entender quais aspectos podem ter influenciado nestes resultados.

Fatores experimentais

A comparação de resultados numéricos com resultados experimentais (neste caso pode-se dizer que é quase um caso prático, pois casos de laboratório são, em geral, minuciosamente medidos e controlados) é uma tarefa delicada, em especial na simulação da injeção de peças plásticas. O ambiente e a máquina usados no experimento não permitem o controle de algumas variáveis que influenciam no escoamento da peça no molde. Durante a verificação dos resultados quando vários aspectos foram analisados para entender os resultados, descobriu-se que fatores antes considerados secundários podem ser relevantes. Alguns fatores, portanto, foram negligenciados por não ter-se considerado-os fundamentais ou pela própria impossibilidade de controle e verificação. Por achar que o conhecimento das dificuldades deste processo é de grande contribuição para trabalhos futuros neste campo, detalhar-se-á aqui estes fatores.

Primeiramente, considere as temperaturas adotadas nas condições de contorno do problema numérico. A temperatura do molde foi considerada homogênea em 45 e 60°C. A temperatura do polímero adotada foi a indicada no termopar, 230°C. Em relação ao molde, ele possui canais de refrigeração de 8 mm de diâmetro distante 20mm da cavidade, localizados segundo a Figura 37.

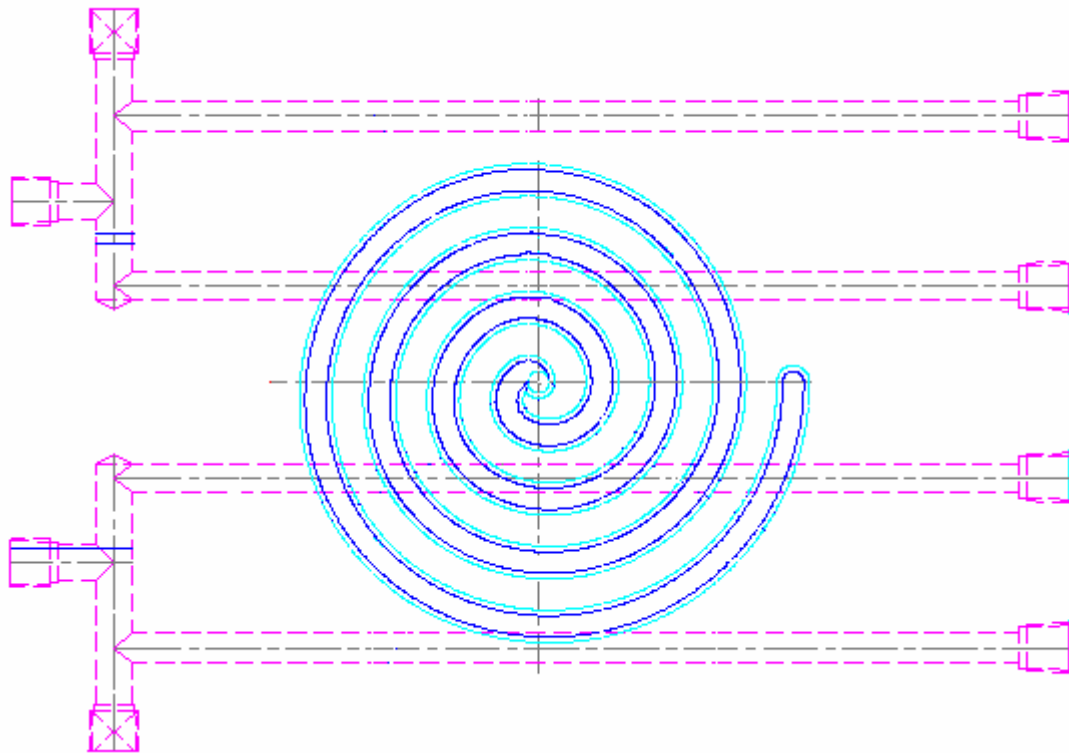


Figura 37 – Disposição dos canais de refrigeração do molde.(FLORES, 1996)

A temperatura usada na análise foi a temperatura da água que circulava nos canais. Não foi possível a medição da temperatura das paredes do molde. Em molde de produção, ao longo do ciclo, o molde chega a uma temperatura média de equilíbrio, resultado da transferência de calor por condução e convecção da resina injetada, do fluido refrigerante e do próprio ambiente externo. Esta temperatura tende a ser maior que a temperatura do fluido refrigerante. Neste experimento, esta temperatura de equilíbrio pode não ter sido atingida, já que poucas peças foram injetadas. O molde poderia estar com regiões de temperatura abaixo da temperatura do fluido e mais próxima da temperatura ambiente. Isso poderia causar uma solidificação mais rápida do material e, conseqüentemente, um comprimento de fluxo experimental menor

A temperatura do polímero foi representada pela leitura do termopar que existia no bico da injetora. Este termopar toca efetivamente o metal e não o polímero do qual se pretende medir a temperatura. Portanto, ele pode estar registrando uma temperatura menor do que a de entrada do polímero na cavidade. Se isto for verdade, o resultado numérico obtido se distanciará mais ainda do resultado experimental, pois com a temperatura maior, o polímero provavelmente escoará por mais tempo.

Outro aspecto importante é a pressão de injeção. Como já comentado anteriormente, a pressão ajustada na máquina é geralmente a pressão hidráulica, como neste caso. Esta máquina está instrumentada com um transdutor de pressão no bico de injeção. Através da verificação do valor medido quando a máquina atingia 500 bar (hidráulica), adotou-se a relação da Eq. (53), de 0.94. Porém verificou-se através do gráfico pressão x tempo da máquina que esta relação não é constante durante toda a injeção da peça. Não foi possível levar este fato em consideração na simulação. Por isso a pressão de comutação adotada nas condições de contorno do problema numérico de 47MPa poderá estar subestimada ou superestimada.

A velocidade de resposta da máquina às mudanças nas condições de processo também não foi medida. Na comutação por volume da fase de controle por vazão para controle por pressão, não se sabe, exatamente, em quanto tempo a máquina faz a modificação da pressão de injeção para pressão de “recalque”. O tempo de injeção desta peça é muito curto em função da vazão adotada e está em torno de 1 a 2 segundos. Sendo este pequeno período importantíssimo para a determinação do comprimento de fluxo, a pressão exercida no material a cada fração de segundo é relevante.

Portanto, estes parâmetros podem ter tido grande influência nos resultados numéricos. É difícil quantificar esta influência e portanto ter uma comparação absoluta e direta dos resultados experimentais com os numéricos.

Fatores numéricos

Durante a especificação das condições de contorno, o acompanhamento da saída de dados intermediários e análise dos resultados numéricos obtidos, alguns aspectos também foram considerados.

O material utilizado nestas injeções, PS 168N da BASF, estava presente no banco de dados padrão do software. Estas propriedades foram usadas nas simulações realizadas, porém, a caracterização do material foi feita baseada em amostras fornecidas pela BASF na Europa, e o material usado é produzido no Brasil. Comenta-se no meio industrial que existem diferenças entre lotes de materiais de mesma especificação, produzidos em diferentes lugares. Esta faixa de variação das propriedades, muitas vezes é aceita e está inclusive dentro da faixa de variação especificada pelo fabricante para a resina. Como não foi possível fazer a caracterização das propriedades do material, existe a dúvida de quão bem este material está

representado no banco de dados e pelo modelo de viscosidade. Neste estudo onde permitiu-se propositalmente que a frente de avanço solidifique antes do preenchimento total da peça, a vazão no final do experimento é muito pequena. A viscosidade nestes momentos será com certeza calculada pela extrapolação da curva presente no software e não será precisa.

A característica geométrica do molde, comprido e fino, faz com que a abordagem de escoamento bidimensional presente no software pareça adequada. Porém, considerando-se a razão entre a largura e a altura da seção transversal, que é de 2.65, a abordagem de Hele-Shaw não parece tão apropriada. Somando-se à geometria o fato que para prever o final do escoamento, as componentes da velocidade em x e y (plano da espiral) tornam-se cada vez menores, notaremos que na análise dimensional das equações governantes (KENNEDY, P., 1995), estes termos teriam uma ordem de grandeza menor, tornando os termos em z mais importantes. A troca de calor pelas paredes laterais por condução e pela convecção do fluido em z , também se tornam importantes para o cálculo da temperatura de não-escoamento (*no flow*) utilizada pelo *software* para determinar a parada do escoamento. Portanto, uma abordagem tridimensional das equações de conservação de momento e de energia levaria, certamente, a resultados mais precisos.

Um último fato, observado durante as análises e não esperado, foi o aumento brusco na vazão do polímero quando o software simulou a comutação do controle de vazão por pressão. O software usa um tempo de resposta de até 0.2s para mudanças de pressão. Esta é uma tentativa de retratar o tempo de resposta que acontece nas máquinas injetoras, porém não é possível mudar este valor, o software o estima internamente. Portanto, estabelecido o limite para a mudança do controle, por exemplo, em 50% do volume na condição C, a pressão aumentará “gradativamente” até 47 MPa em 0.6s. O que foi observado é que no momento em que a pressão de 47MPa era atingida, a vazão aumentava instantaneamente para, em alguns casos, 1300% da vazão nominal de 40 cm³/s. Na Figura 38, mostra-se esta reação para uma das análises rodadas e na tabela 3, os valores fornecidos pelo *software*.

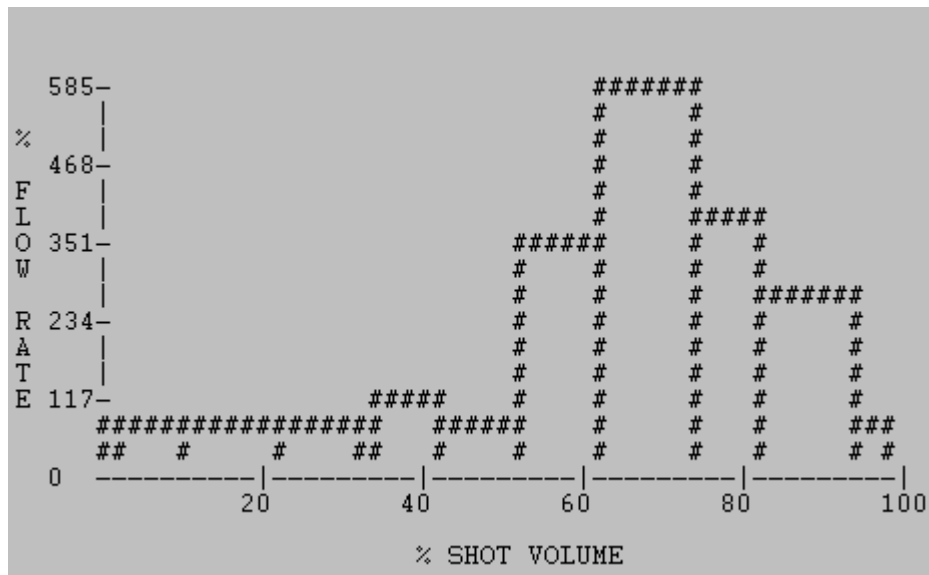


Figura 38 – Vazão em função do volume preenchido para a condição C.

Tabela 3: Dados fornecidos ao longo da análise da condição C

Tempo	Volume	Vazão		Pressão
		sec	%	
0.04916	5.81	34.60	86.5	6.04
0.13506	17.00	37.21	93.0	9.14
0.21230	27.10	37.46	93.7	16.82
0.26084	33.45	37.66	94.1	20.04
0.28435	36.62	37.48	93.7	26.19
0.29976	38.79	37.51	93.8	26.46
0.31586	41.02	37.55	93.9	28.12
0.33031	43.11	37.65	94.1	30.89
0.34623	45.24	37.68	94.2	30.60
0.36446	47.58	37.89	94.7	31.75
0.38173	49.87	38.09	95.2	30.17
0.39995	52.21	38.27	95.7	29.04
0.41762	54.62	37.97	94.9	38.52
0.43452	56.88	37.89	94.7	45.83
0.44088	58.94	265.41	663.5	47.00
0.44301	60.96	257.51	643.8	47.00
0.44517	62.99	250.40	626.0	47.00
0.44745	65.05	260.94	652.3	47.00
0.44995	67.20	234.31	585.8	47.00
0.45256	69.30	220.59	551.5	47.00
0.45538	71.44	206.47	516.2	47.00
0.45826	73.49	198.33	495.8	47.00
0.46132	75.53	176.62	441.5	47.00
0.46495	77.63	152.14	380.3	47.00
0.46892	79.72	142.23	355.6	47.00
0.47308	81.75	134.41	336.0	47.00
0.47760	83.86	125.62	314.1	47.00
0.48226	85.90	122.19	305.5	47.00
0.48721	87.95	114.99	287.5	47.00
0.49279	90.13	107.57	268.9	47.00
0.49857	92.23	97.98	245.0	47.00
0.58709	94.34	0.99	2.5	47.00
1.12843	95.35	0.36	0.9	47.00
3.07788	96.36	0.09	0.2	47.00
7.61064	96.91	0.01	0.0	47.00

O aumento da vazão devido ao aumento na pressão, certamente, gerou um cálculo da taxa de cisalhamento também elevado e conseqüentemente um aumento na temperatura e uma diminuição na viscosidade do material, fazendo com que a previsão de posição da parada de fluxo fosse mais longa que o observado na prática.

Para verificar o efeito desta mudança da vazão no comprimento de fluxo, várias análises foram realizadas modificando-se a pressão de “recalque”. O resultado é mostrado no gráfico da Figura 39.

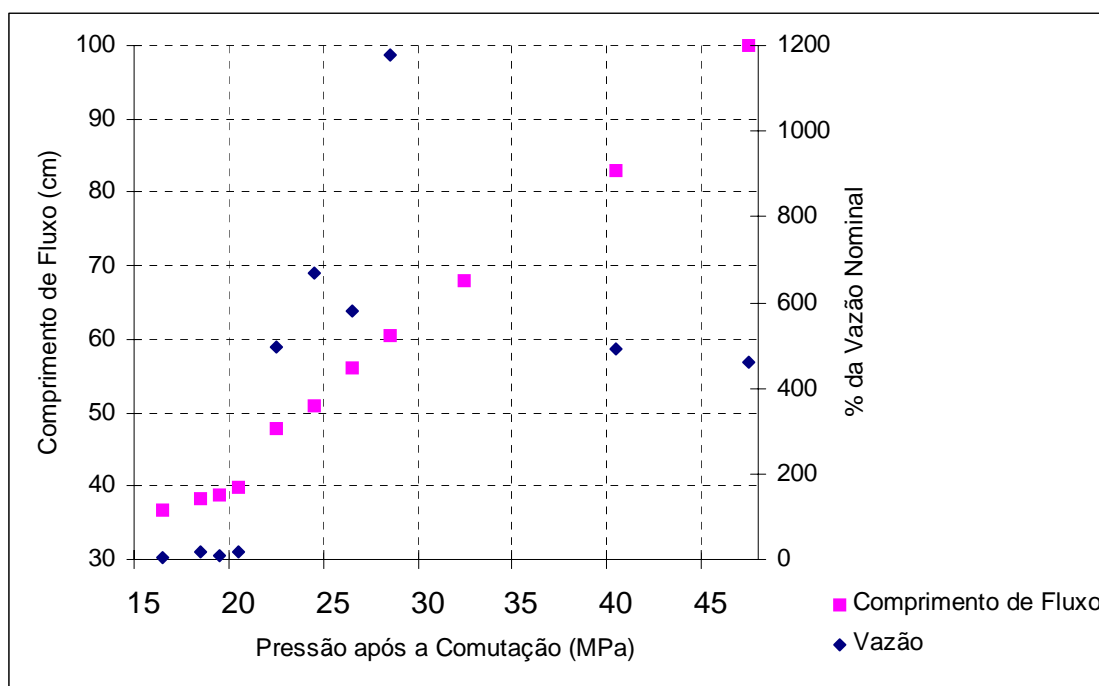


Figura 39 – Variação do comprimento de fluxo e da vazão máxima com a pressão de comutação.

Pode-se notar neste gráfico que quando a vazão passa de 100% da vazão nominal a inclinação da curva de aumento do comprimento de fluxo aumenta bastante e se torna independente do valor da vazão.

Este aumento na vazão observado na simulação não ocorre na máquina que limita a vazão na fase de recalque. No caso deste experimento, o limite foi igual a vazão nominal de $40 \text{ cm}^3/\text{s}$. Mesmo que este limite de vazão não fosse definido na regulagem da máquina, por limitações impostas pela inércia e pela capacidade da máquina, não se conseguiria imprimir tal velocidade à rosca.

O software quando passa a controlar por pressão o preenchimento, tem como resposta a vazão. Não sendo “informado” das limitações físicas de aumento de vazão, ele calcula livremente qual a resposta na vazão causada pelo gradiente de pressão. Com isso, a alta taxa de cisalhamento gerada influi na equação da energia e conseqüentemente no cálculo da temperatura de *no flow* e na viscosidade. Por esta razão, certamente, o cálculo do comprimento de fluxo foi superestimado.

É importante ressaltar que as condições de processo usadas nesta seção não são normalmente utilizadas. Fez-se uma mudança abrupta na pressão e escolheu-se condições de temperatura e vazão que permitissem o não preenchimento da peça. Normalmente, as

condições adotadas tem objetivos contrários, isto é, o preenchimento da cavidade a uma pressão pequena e contínua. Com isso, ajustou-se as condições de processo, de forma que o software trabalhasse num domínio onde as propriedades do material foram extrapoladas e os gradientes encontrados bem maiores que os padrões.

Uma alternativa e sugestão para trabalhos futuros similares é a comutação da pressão para uma pressão relativa a pressão de injeção, de preferência menor, para o cálculo de uma vazão menor que a nominal neste fase do controle.

5. Conclusão

O presente trabalho dedicou-se à análise da simulação da injeção de peças plásticas em casos simples, para o conhecimento mais profundo da metodologia numérica e simplificações existentes em três programas e as suas consequências nos resultados obtidos. Dos programas escolhidos, dois deles são pacotes comerciais amplamente utilizados no mercado e o terceiro, um programa desenvolvido no Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor da UFSC, por Vasconcellos (VASCONCELLOS, J. F., 1999).

Entre os objetivos delineados, está o aprendizado na simulação da injeção de peças plásticas de forma fundamentada, através da análise crítica dos aspectos numéricos e físicos envolvidos. Outro objetivo é a contribuição de um documento que discute sobre aspectos numéricos e práticos importantes a serem considerados na análise de resultados e no desenvolvimento de programas de simulação em injeção de plásticos.

Para o desenvolvimento do trabalho, quatro casos foram escolhidos pela sua simplicidade e ao mesmo tempo, pela riqueza de informações que poderiam ser obtidas. O primeiro caso, para verificação da posição de encontro da frente de avanço, foi uma comparação com os resultados experimentais obtidos por Hieber (1983) na validação de um programa de simulação. Observou-se alguns aspectos relativos às simplificações numéricas inerentes aos programas e aos artifícios utilizados para fazer as condições de contorno experimentais tão bem comportadas quanto às que necessita-se no problema numérico. No preenchimento do disco com injeção central, vários questionamentos foram levantados, entretanto não se pôde encontrar as devidas respostas pois as informações necessárias são protegidas nos softwares comerciais. A comparação dos três programas, no preenchimento de um semi-anel, permitiu a reflexão sobre detalhes numéricos existentes nestes simuladores. E finalmente, a injeção da cavidade espiral, permitiu uma profunda análise sobre as dificuldades encontradas na comparação de casos experimentais e resultados numéricos. A discussão criada nesta seção, só foi possível devido à experimentação na injeção de uma peça real, importante a todos aqueles que pretendem trabalhar na simulação da injeção de plásticos. A análise crítica destes quatro casos propiciou à autora uma visão ampla e profunda dos detalhes envolvidos em problemas de injeção de plásticos, tanto do ponto de vista numérico como experimental.

No decorrer do trabalho, o envolvimento profissional da autora na área de simulação de injeção de peças plásticas e o contato com outros usuários destas ferramentas, permitiu o

enriquecimento do trabalho com observações sobre a realidade da utilização da simulação e suas dificuldades. Acredita-se ser esta, uma das contribuições importantes desta dissertação para futuros trabalhos de pesquisa na área e também para auxiliar usuários destas ferramentas na interpretação dos resultados obtidos.

Este trabalho atingiu seu objetivo de permitir que membros do PRONEX, aprimorassem seus conhecimentos na simulação de peças plásticas. Houve uma preocupação na redação desta dissertação em descrever todos os aspectos relevantes da simulação do processo de injeção descobertos no desenvolvimento do trabalho, com o objetivo de que este trabalho se tornasse uma referência, tanto para os alunos e professores envolvidos no processo de injeção como àqueles envolvidos na simulação numérica. A característica do texto reflete a intenção do PRONEX de ser um projeto interdisciplinar no Departamento de Engenharia Mecânica.

O envolvimento em um dos casos estudados, com a experimentação, enriqueceu as discussões. O trabalho procurou mostrar as dificuldades e os erros cometidos com o objetivo de torná-lo uma boa referência para àqueles que pretendem fazer comparações entre resultados experimentais e numéricos. Estas comparações devem ser vivenciadas pelo pesquisador, pois tornam-se essenciais para o desenvolvimento de códigos que retratem de forma adequada o processo de injeção e sejam úteis no desenvolvimento da engenharia neste campo. Isto significa permitir que condições de contorno sejam prescritas da mesma forma que se é possível fazer no processo e entender que o usuário final do software precisa conhecer o que está sendo resolvido no algoritmo, para que possa utilizar todo o potencial da simulação com segurança.

A dificuldade encontrada em obter informações sobre os detalhes numéricos dos *softwares* comerciais dificultou as conclusões de alguns casos estudados. É muito importante, que os códigos desenvolvidos tenham estes detalhes publicados, para que ao conhecer estes detalhes, o usuário possa analisar melhor os resultados obtidos.

Este trabalho foi desenvolvido, tratando-se apenas da fase de preenchimento de termoplásticos. Vários outros aspectos, além dos tratados aqui, podem ser discutidos a este respeito, pois este processo tem uma vasta quantidade de variáveis. Uma continuação deste trabalho, poderia ser o estudo da fase de compactação do material com atenção especial à equação da energia, que neste caso será "protagonista" na previsão da solidificação do material. Uma outra sugestão para trabalhos futuros é o estudo dos novos algoritmos implementados e já disponíveis comercialmente baseados em malhas de casca sobre modelos

sólidos, conhecidas como 2D e 1/2 e nos recentes pacotes para resolução das equações completas em malhas tetraédricas. Outras etapas do processo, também simuladas merecem estudos, pois suas equações e simplificações são ainda menos discutidas. Nestes casos, pouca literatura é encontrada para auxiliar os estudiosos e usuários desta tecnologia cada vez mais utilizada no desenvolvimento de projetos de engenharia.

6. Referências Bibliográficas

- ANTEC 1999, sessão W3 E T5, Annual Technical Conference of SPE Proceedings, maio/1999
- ANTEC 2000, sessão M3 e TH2, Annual Technical Conference of SPE Proceedings, maio/2000.
- BRETAS, R. E. S., D'ÁVILA, MARCOS A., 2000. *Reologia de Polímeros Fundidos*, Ed. UFSCar.
- BRITO, A. M., 1995. *Simulação do Escoamento de Termoplásticos em Placas Moldadas por Injeção*, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Portugal.
- CHIANG, H. H., HIEBER C. A., WANG K. K., 1991. *A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part 1: Formulation*, Polymer Engineering and Science, Vol. 31, No. 2, pp 116-139, January.
- C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994. *A Resource for Plastics Engineers*, AC Technology, Ithaca, New York.
- C-MOLD REFERENCE MANUAL, 1996. A C Technology, Ithaca, NY.
- D'ÁVILA, M. A., AHRENS, C. H., 1997. *Processo de Moldagem por Injeção de Polímeros Semi-Cristalinos : Caracterização e Simulação Assistida por Computador*, Dissertação de Mestrado, CEPGEM – UFSC.
- DIHLMANN, C.; FERREIRA, A. C., 1993. *Simulação e Análise do Preenchimento de Cavidades em Moldes para Injeção de Termoplásticos Utilizando Método Manual e Tecnologia CAE/CAD*, Dissertação de Mestrado, CEPGEM – UFSC.
- ENGELSTEIN, G. 1993. *Effects of Finite Element Meshing on Mold Filling Analysis*, Plastics Engineering, p. 41, April.
- FLORES, 1996. *Projeto de Molde para Corpo de Prova II*, UFSCAR.

- FRIEDRICH, B., GÜÇERİ, S. I., 1993. *A Novel Hybrid Numerical Technique to Model 3-D Fountain Flow in Injection Molding Processes*, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 49, p. 141-173.
- GADBOIS, M. R et al, 1995. *Influence of Mesh and Control Parameters on CAE Software for Injection Molding*, Annual Technical Conference of SPE, p.707.
- GOGOS, C. G., HUANG C., SCHMIDT, LARRY R.1986. *The Process of Cavity Filling Including the Fountain Flow in Injection Molding*, Polymer Engineering and Science, Vol. 26, No. 20, pp 1457-1466, Mid-November.
- HIEBER, C.A. E SHEN, S.F., 1978. *Flow Analysis of the Non-Isothermal Two-Dimensional Filling Process in Injection Molding*, Israel Journal of Technology, Vol. 16, pp. 248-254.
- HIEBER, C.A., SOCHA, L. S., SHEN, S.F., WANG, K.K., ISAYEV, A. I. 1983. *Filling Thin Cavities of Variable Gap Thickness: A Numerical and Experimental Investigation*, Polymer Engineering and Science, Vol. 23, No. 1, pp 20-26.
- HIEBER, C.A., WANG, K. K., 1990, *Melt- Viscosity Modeling and Its Effects upon Injection Molding Simulation*, SPE Technical Papers, 36, 943-947.
- ISAYEV, A. I., 1987. *Injection and Compression Molding Fundamentals*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- KAMAL, M. R., KENIG, S., 1972. *The Injection Molding of Thermoplastics Part 1: Theoretical Model*, Polymer Engineering and Science, Vol. 12, No. 4, pp 294-301, July.
- KENNEDY, P., 2000. *Comunicação pessoal*, Minneapolis, USA.
- KENNEDY, P., 1995. *Flow Analysis of Injection Molds*, Hanser/Gardner Publications, Cincinnati, EUA.
- MALISKA, C. R., 1995. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

- MALISKA, C. R.; VASCONCELLOS, J. F., 1998. *An Unstructured Finite-Volume Procedure for Simulating Flows with Moving Fronts*, aceito para publicação no Forth World Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, June 29-July 2, 1998.
- MALLOY, R A., 1994. *Plastic Parts Design for Injection Molding -An Introduction*, Hanser/Gardner Publications, Cincinnati, EUA.
- MOLDFLOW ON LINE HELP, 2000. Moldflow Corporation.
- MORALES, A. R., BRETAS, R., 1982. *Morfologia e Propriedades Dinâmicas e Mecânicas de Resina Epóxi/Elastômero Reativo*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos.
- NRPP/UFSCAR, 2000, endereço eletrônico:
<http://www.ufscar.br/portugues/projetos/nrpp/index.html>
- PATEL, S., 1996. *Flow Analysis of Injection Molding Process*, Departmental Paper, Mechanical Engineering Department, University of Michigan, April.
- PROVENZA, F., 1991. *Moldes para Plásticos*, Editora F. Provenza.
- STEVENSON, J. F., HIEBER, C. A., GALSKOY, A., WANG, K. K. , 1976. SPE Technical Papers, 22, 282 -288.
- SUBBIAH, S. A, 1990. *Numerical Analysis of the Filling of Irregular Thin Cavities with Non-Isothermal, Non-Newtonian Fluids*, Tese de Doutorado, College of Engineering University of Delaware , EUA.
- TADMOR Z., GOGOS, C. G., 1979. *Principles of Polymer Processing*, Hansen Publishers, New York.
- THOMPSON, R. L., MENDES, PAULO R. S., NACCACHE, M. F., 1998. *A New Constitutive Equation and Its Performance in Contraction Flow*, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, revised in November 1998.

- TOENSMEIER, P. A., 1997. *3-D Software is Reshaping Design, But Programs Need More Simplicity*, Modern Plastics International, May.
- TRAFFORD, D. L., 1987. *Computational Analysis & Simulation of the Mold Filling Process for Hele-Shaw Flows*, Center for Composite Materials Report CCM-87-04, University of Delaware, USA.
- VASCONCELLOS, J. F., 1999. *Simulação Numérica da Injeção de Termoplásticos Usando Diagramas de Voronoi e Solução Implícita do Posicionamento da Frente*, Tese de Doutorado, CPGEM-UFSC, 1999.
- WANG, K. K., 1994. *Twenty Years of CIMP Research Towards CAE for Injection Molding*, Advances in CAE of Polymer Processing, ASME, Ed. K. Himasekhar ed al., MD-Vol. 49/11ffi-Vol. 283, pp. 1-5.
- WANG, V. W., 1986. *Dynamic Simulation and Graphics for the Injection Molding of Three-Dimensional Thin Parts*, Journal of Polymer Engineering, Vol. 7, N° 21.

APÊNDICE

Projeto do Molde da Cavidade em Espiral