

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

**CONSIDERAÇÕES QUANTO AO USO DE TÉCNICAS PARA
ANÁLISE DE FLUXO EM CAVIDADES DE MOLDES DE INJEÇÃO**

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

FERNANDO LUÍS PEIXOTO

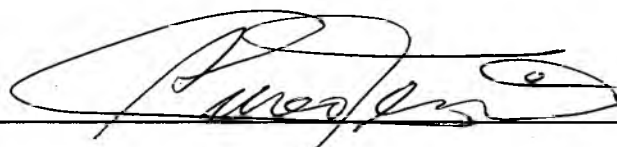
FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 1999

**CONSIDERAÇÕES QUANTO AO USO DE TÉCNICAS PARA
ANÁLISE DE FLUXO EM CAVIDADES DE MOLDES DE INJEÇÃO**

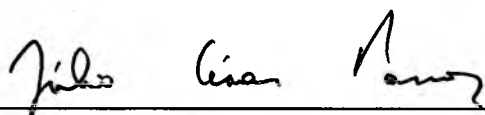
FERNANDO LUÍS PEIXOTO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

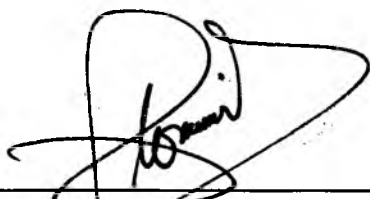


Prof. AUREO CAMPOS FERREIRA, Ph.D - ORIENTADOR

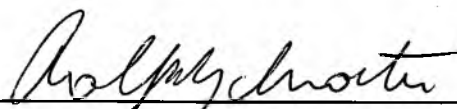


Prof. JÚLIO CÉSAR PASSOS, Dr.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA




Prof. CLÓVIS RAIMUNDO MALISKA, Ph.D



Prof. ROLF BERTRAND SCROETER, Dr. Ing.



Prof. CARLOS HENRIQUE AHRENS, Dr. Eng. Mec.



Prof. NELSON BACK, Ph.D

A Deus,
À minha mãe e à minha avó.

AGRADECIMENTOS:

- Ao CNPq, pelo auxílio financeiro.
- Ao professor Aureo, por sua orientação.
- Ao amigo Caíco, pelo seu apoio e auxílio.
- Ao professor António Pouzada, por sua coorientação no trabalho.
- À professora Maria Jovita, pelo seu auxílio no estudo de caso realizado.
- Aos amigos Albert (Batata) e Braida, pelo seu companheirismo durante o período em que estivemos em Portugal.
- Aos amigos Andrei, Assis, Bork, Carmen, Cléia, Diovani, João Antônio, Luciano, e a todos os amigos do CEFET/RS.
- Ao Lelo, por sua colaboração.
- A todos os amigos do CIMJECT.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
LISTA DE SIGLAS.....	XVI
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO PROJETO DE PRODUTO VISANDO A PREVENÇÃO DE PROBLEMAS DE MOLDAGEM.....	10
2.1 Regras de Projeto e Considerações Relativas ao Preenchimento do Molde.....	12
2.1.1 Posicionamento do Ponto de Injeção.....	12
A) Posicionamento dos Pontos de Injeção nas Seções mais Espessas.....	15
B) Utilização de Canais Quentes.....	17
2.1.2 Orientação do Material Durante o Preenchimento.....	18
2.1.3 Perda de Pressão no Preenchimento do Molde.....	21
2.1.4 Balanceamento do Preenchimento de Moldes Através de Guias e Restritores de Fluxo.....	23
2.1.5 Linhas de Solda.....	27
2.1.6 Empenamentos de Peças Moldadas por Injeção.....	29
A) Comportamento Anisotrópico Devido à Orientação do Material.....	30
B) Resfriamento Diferenciado.....	31
C) Contração Volumétrica Não Uniforme.....	32

2.2	Técnicas Auxiliares para a Avaliação da Qualidade de Peças Injetadas.....	33
2.2.1	Dados de Fluxo em um Molde em Espiral.....	33
2.2.2	Estimativa da Queda de Pressão Durante o Preenchimento do Molde.....	35
2.2.3	Análise Qualitativa da Formação de Linhas de Solda Baseado no Ângulo de Encontro das frentes de Fluxo.....	41
3	RECURSOS PARA A SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DE POLÍMEROS EM MOLDES DE INJEÇÃO.....	42
3.1	Método da Imagem do Enchimento.....	43
3.2	Sistemas CAE.....	46
3.2.1	Sistemas CAE <i>High End</i>	47
A)	Principais Programas/Módulos que Compõe os Sistemas CAE Comerciais.....	49
3.2.2	Sistemas CAE <i>Main Stream</i>	52
3.2.3	Atual Estágio de Evolução dos Sistemas CAE.....	54
A)	Métodos Numéricos.....	57
3.3	Vantagens da Utilização de Sistemas CAE.....	58
3.4	Limitações dos Sistemas CAE.....	58
4	CONSIDERAÇÕES QUANTO AO USO DE TÉCNICAS PARA A ANÁLISE DE FLUXO EM CAVIDADES DE MOLDES DE INJEÇÃO.....	62
4.1	Considerações Preliminares Sobre a Sistemática.....	62
4.2	Definição dos Critérios e Aspectos Utilizados na Sistemática.....	64
4.2.1	Definição dos Aspectos Relacionados ao Fluxo do Material (Problemas de Moldagem) para os quais Serão Determinadas as Necessidades ou não do Emprego de uma Análise de Fluxo.....	64
A)	Avaliação de Linhas de Solda.....	65

B) Avaliação das Tensões Residuais Devido ao Escoamento do Polímero.....	66
C) Avaliação do Aprisionamento de Gases (Bolsas de Ar).....	67
D) Avaliação da Possibilidade de Ocorrência de Empenamentos.....	68
4.2.2 Definição e Forma de Aplicação dos Critérios de Tomada de Decisão.....	69
A) Características Geométricas.....	69
B) Características Funcionais da Peça.....	70
C) Material Plástico Utilizado.....	71
D) Número de Pontos de Injeção Utilizados na Peça.....	72
E) Separação da Frente de Fluxo.....	73
4.3 Orientação Passo a Passo para a Aplicação da Sistemática.....	74
4.3.1 Primeiro Passo da Sistemática – Análise preliminar e levantamento dos requisitos e características impostos à peça.....	74
4.3.2 Segundo Passo da Sistemática – Aplicação e Interpretação dos Fluxogramas Sistematizadores.....	75
5 APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA A CASOS PRÁTICOS.....	89
5.1 Considerações Sobre a Aplicação da Sistemática.....	89
5.2 Caso 1 – Carcaça Superior.....	91
5.2.1 Primeiro Passo da Aplicação da Sistemática – Análise Preliminar.....	91
A) Resumo das Características Necessárias para a Aplicação da Sistemática à Peça Caracaça Superior.....	91
5.2.2 Segundo Passo da Aplicação da Sistemática: Aplicação do Fluxograma Sistematizador.....	92
A) Aspecto linhas de solda.....	93
B) Aspecto bolsas de ar.....	95

C) Aspecto Empenamentos.....	95
D) Aspecto Tensões Oriundas do Fluxo do Material.....	96
5.3 Caso 2 – Luva de 50mm.....	97
5.3.1 Primeiro Passo da Aplicação da Sistemática – Análise Preliminar.....	97
A) Resumo das Características Necessárias para a Aplicação da Sistemática à Peça Luva de 50mm.....	98
5.3.2 Segundo Passo da Aplicação da Sistemática: Aplicação do Fluxograma Sistematizador.....	99
A) Aspecto Linhas de Solda.....	99
B) Aspecto Tensões Oriundas do Fluxo do Material.....	100
C) Aspecto Bolsas de Ar.....	102
D) Empenamentos.....	102
5.4 Caso 3 – Cabo de Faca.....	103
5.4.1 Primeiro Passo da Aplicação da Sistemática – Análise Preliminar.....	103
A) Resumo das Características Necessárias para a Aplicação da Sistemática à Peça Cabo de Faca.....	104
5.4.2 Segundo Passo da Aplicação da Sistemática: Aplicação do Fluxograma Sistematizador.....	105
A) Aspecto Linhas de Solda.....	105
B) Aspecto Empenamentos.....	106
C) Aspecto Bolsas de Ar.....	107
D) Aspecto Tensões Oriundas do Fluxo Material.....	107
5.5 Análise dos Resultados da Aplicação da Sistemática.....	108
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109

6.1	Conclusões.....	109
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
	ANEXO AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE LINHAS DE SOLDA EM PEÇAS	
	MOLDADAS EM POLIACETAL E POLIPROPILENO – UM ESTUDO	
	DE CASO.....	118

LISTA DE TABELAS

	Legenda	Página
TABELA 1 –	Alguns programas de simulação disponíveis no mercado mundial	48
TABELA A.1 –	Condições de processamento selecionadas com a simulação de injeção para as peças moldadas em poliacetal	121
TABELA A.2 –	Condições de processamento selecionadas com a simulação de injeção para as peças moldadas em polipropileno	121
TABELA A.3 –	Parâmetros utilizados na máquina injetora para a moldagem das peças em poliacetal	122
TABELA A.4 –	Parâmetros utilizados na máquina injetora para a moldagem das peças em polipropileno	123
TABELA A.5 –	Massa média das peças moldadas em poliacetal, resultante para cada condição de injeção	123
TABELA A.6 –	Massa média das peças moldadas em polipropileno, resultante para cada condição de injeção	124
TABELA A.7 –	Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em poliacetal (condições C1, C2 e C3)	126
TABELA A.8 –	Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em poliacetal (condições C4 e C5)	127
TABELA A.9 –	Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em polipropileno (condições C1, C2 e C3)	128
TABELA A.10 –	Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em polipropileno (condições C4 e C5)	129

LISTA DE FIGURAS

	Legenda	Página
Figura 1 –	Exemplos de benefícios obtidos nas etapas de projeto e de fabricação de moldes com o uso de tecnologias CAD/CAE/CAM	2
Figura 2 –	Formas pelas quais os recursos dos sistemas CAD/CAE são utilizados pelas empresas do setor de moldes	3
Figura 3 –	Situações onde as análises de moldes são mais vantajosas	5
Figura 4 –	Soluções de posicionamento e tipos de pontos de injeção, que poderiam ser utilizados para a peça apresentada	14
Figura 5 –	Tipos de pontos de injeção utilizados para o preenchimento do anel mostrado	15
Figura 6 –	Efeitos de orientação molecular, causados pelo tipo de ponto de injeção (injeção em leque) utilizado para o preenchimento da peça	16
Figura 7 –	Utilização de raios de canto para a minimização dos efeitos de orientação do polímero	17
Figura 8 –	Formas utilizadas para o projeto de cantos de peças	19
Figura 9 –	Efeitos do posicionamento do ponto de injeção nas diferentes regiões de uma peça	20
Figura 10 –	Efeito do posicionamento do ponto de injeção, sobre a forma de avanço da frente de fluxo	21
Figura 11 –	Efeito do número de pontos de injeção sobre o perfil de preenchimento e distribuição de pressões	23
Figura 12 –	Utilização de guias e restritores de fluxo para a modificação do perfil de avanço da frente de fluxo	24
Figura 13 –	Exemplo da modificação do perfil de preenchimento a partir da utilização de múltiplos pontos de injeção e guias de fluxo	25
Figura 14 –	Exemplos do posicionamento dos pontos de injeção em peças com variações de espessura	26

Figura 15 –	(a) Formação do esguichamento do material ao entrar na cavidade, (b) formas de corrigir a ocorrência de esguichamentos	26
Figura 16 –	Formação de linhas de solda em peças injetadas	28
Figura 17 –	Exemplos de soluções adotadas para a melhora da qualidade de linhas de solda	29
Figura 18 –	Contrações diferenciadas na direção longitudinal e transversal ao escoamento do material, devido a efeitos de orientação induzida pelo fluxo	30
Figura 19 –	Empenamento causado por diferenças existentes entre as taxas de retirada de calor do macho e da cavidade	32
Figura 20 –	Efeitos de contração diferenciada causados pelas variações de pressão existentes ao longo do caminho de fluxo	33
Figura 21 –	Curvas de fluxo em uma espiral. À esquerda, são apresentadas as curvas de máximo comprimento de fluxo atingido como função da espessura de parede e das condições de processamento, e à direita, como função da pressão de injeção	34
Figura 22 –	Curvas do comportamento da viscosidade cisalhante para o poliestireno de alto impacto	37
Figura 23 –	Ângulo de encontro entre as frentes de fluxo formadoras de uma linha de solda	41
Figura 24 –	Comparação entre uma injeção progressiva (a), e a representação do avanço da frente de fluxo pelo método manual	44
Figura 25 –	Curvas de variação do volume específico, características de polímeros amorfos	51
Figura 26 –	Comparação entre uma simulação do preenchimento realizado por um <i>software main stream</i> e o resultado obtido em uma injeção progressiva	53

Figura 27 –	Comparação entre os parâmetros obtidos por um <i>software</i> CAE – C-Mold 3D Quickfill – <i>main stream</i> (figuras a1 – avanço da frente de fluxo e b1 – distribuição de pressões) com os parâmetros obtidos com a simulação em um <i>software high end</i> (figuras a2 – avanço da frente de fluxo e b2 – distribuição de pressões)	54
Figura 28 –	Precisão apontada pelos usuários de sistemas CAE, para os resultados das análises de fluxo	59
Figura 29 –	Níveis de satisfação, apontados pelos usuários de sistemas CAE, relativos aos resultados fornecidos pelas análises	60
Figura 30 –	Fluxograma sistematizador parcial mostrando a divisão da análise de fluxo nos aspectos a serem avaliados.	75
Figura 31 –	Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para a avaliação da possibilidade do empenamento de uma peça injetada	77
Figura 32 –	Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para a avaliação da formação de linhas de solda em uma peça injetada	82
Figura 33 –	Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para avaliação da formação de bolsas de ar em uma peça injetada	86
Figura 34 –	Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para a avaliação das tensões internas oriundas do fluxo do polímero em uma peça injetada	88
Figura 35 –	Modelo da peça Carcaça Superior	92
Figura 36 –	Modelo da peça Luva de 50 mm	99
Figura 37 –	Modelo da peça cabo de faca	104
Figura A.1 –	Peça selecionada para a realização do estudo de linhas de solda	120
Figura A.2 –	Desenho esquemático de um ensaio de tração impacto	124
Figura A.3 –	Forma geométrica do corpo de prova utilizado para os ensaios de tração impacto segundo a norma ASTM D 1822	125

Figura A.4 –	Localização da linha de solda na simulação de preenchimento	131
Figura A.5 –	Diferentes zonas apresentadas pela estrutura morfológica de peças injetadas em poliacetal	131
Figura A.6 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C1	134
Figura A.7 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C2	134
Figura A.8 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C3	135
Figura A.9 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C4	135
Figura A.10 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C5	136
Figura A.11 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C1	136
Figura A.12 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C2	137
Figura A.13 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C3	137
Figura A.14 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C4	138
Figura A.15 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C5	138
Figura A.16 –	Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C5, na qual há a formação de um vazio estrutural	141

LISTA DE SÍMBOLOS

n – Índice da lei das potências

η_T – Viscosidade corrigida ou Rabinowitsch [Pa.s]

η_a – Viscosidade aparente [Pa.s]

$\dot{\gamma}$ – Taxa de cisalhamento [s^{-1}]

K – Consistência [$Pa \cdot s^n$]

R – Raio do canal onde ocorre o escoamento do polímero [m]

L – Comprimento do canal [m]

W – Largura do canal [m]

H – Altura do canal [m]

Q_T – Vazão total [m^3/s]

V_T – Volume total do moldado [m^3]

t_f – Tempo de injeção [s]

$\dot{\gamma}_a$ – Taxa de cisalhamento aparente [s^{-1}]

ΔP – Queda de pressão ao longo de uma seção de fluxo [Mpa]

LISTA DE SIGLAS

CAD	COMPUTER AIDED DESIGN
CAE	COMPUTER AIDED ENGINEERING
CAM	COMPUTER AIDED MANUFACTURING
CNC	COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO
DNC	DIRECT OR DISTRIBUTED NUMERICAL CONTROL
PE	POLIETILENO
POM	POLIOXIMETILENO
PP	POLIPROPILENO

RESUMO

O crescimento e a pressão sofridos pelas empresas do setor de moldes têm obrigado as mesmas a buscarem novas alternativas tecnológicas.

Contudo, a correta aplicação dessas tecnologias ainda é tema de discussões entre especialistas da área, devido aos aspectos envolvidos em sua introdução nas empresas em questão.

Este trabalho tem como objetivo, portanto, a introdução de conceitos relativos à racionalização do uso das tecnologias CAE (Computer Aided Engineering) nas empresas de moldes.

Desta forma, propõe-se a estruturação, através de uma sistemática, de diretrizes que visem fornecer um auxílio ao corpo técnico dessas empresas, na determinação dos casos onde o emprego de uma análise do escoamento do polímero no molde (análise de fluxo), visto ser o recurso mais utilizado dos sistemas CAE, é recomendada ou vantajosa.

Procura-se salientar também, na sistemática, os casos em que, com técnicas alternativas mais simples, pode-se avaliar a qualidade final da peça injetada.

Também é dada uma grande ênfase à utilização de regras e técnicas ao projeto de produtos de plástico, como meio de se obter produtos injetados de melhor qualidade.

É realizada, também, a análise de casos práticos da indústria de moldes, como forma de ilustrar a aplicação da sistemática proposta.

ABSTRACT

The growth and pressure suffered by the injection molding area, has forced this companies in search of new technologies, in order to attend the growing demand of the consumers.

However, the correct application of this technologies is still a theme of discussion, among specialists of the area, due to the aspects involved in its introduction in that companies.

Therefore, the main goal of this work is to introduce concepts associated with the rationalization about the use of flow analysis of CAE (Computer Aided Engineering) technologies, proposing in this way a systematic, in order to help the selection of cases, more adequate to the application of this technologies.

It is also given a great emphasis to the use of rules and techniques to the plastic part design, as well as to the knowledge of polymers properties and characteristics as a way to obtain better quality injected products.

Also is realized an analysis of practical cases, in order to illustrate the application of the proposed systematic.

1. INTRODUÇÃO

O atual estágio de desenvolvimento no setor de polímeros vem mostrando a posição alcançada por este material na produção de bens de consumo. Todavia, com a globalização da economia, as empresas deste setor têm sido pressionadas pela concorrência a lançar mão de novas tecnologias, com o objetivo de cada vez mais colocarem no mercado, o mais rápido possível, produtos que atendam às crescentes exigências dos consumidores.

As alternativas tecnológicas para esse fim, quando aplicadas à fabricação de moldes, têm sido a aquisição de máquinas-ferramenta com comando numérico computadorizado (CNC) e a utilização, cada vez mais intensa, de recursos de engenharia, projeto e fabricação auxiliados por computador (CAE/CAD/CAM – Engenharia, Projeto e Manufatura Auxiliados pelo Computador) [1, 2], em função das inúmeras vantagens e benefícios globais que podem ser alcançados pela empresa, conforme ilustrado na figura 1.

No entanto, a aquisição dessas tecnologias não se traduz pela imediata melhoria de qualidade e rentabilidade do investimento [2, 3, 34], uma vez que o setor de moldes possui peculiaridades, que dificultam a introdução de tais tecnologias, especialmente com relação aos sistemas CAE.

Uma das características desse setor é a de ser constituído por empresas de pequeno e médio porte, onde algumas, inclusive, possuem estrutura familiar. Nessas os conhecimentos são passados de mestre para aprendiz, geralmente mantendo, ao longo do tempo, métodos de trabalho convencionais e, conseqüentemente, ultrapassados. Para essas empresas, geralmente, a implantação de tais tecnologias requer investimentos iniciais, e treinamento de pessoal, cujos

custos são considerados demasiadamente elevados, além de envolver uma complexidade para a qual não estão preparadas.

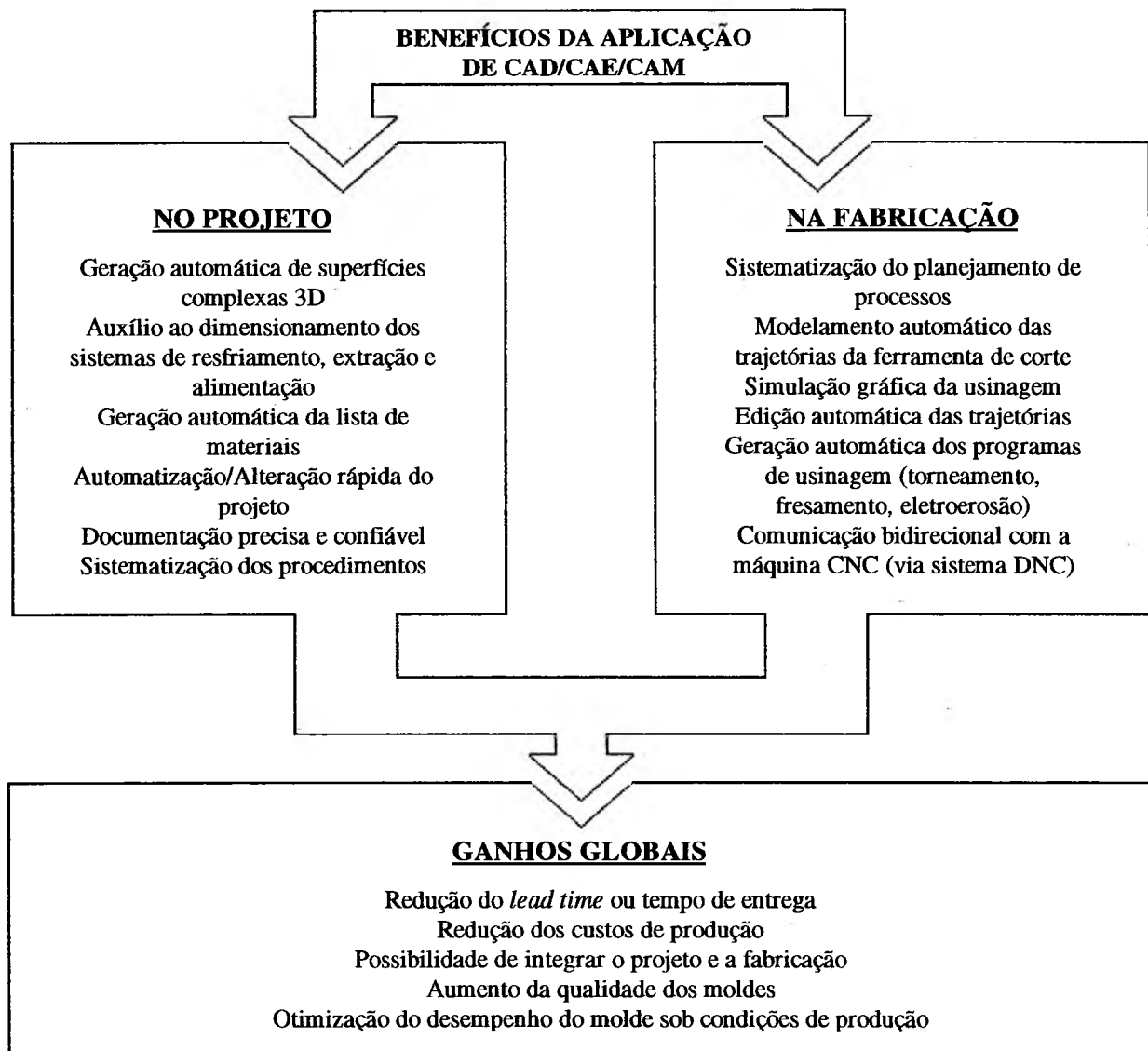


Figura 1 – Exemplos de benefícios obtidos nas etapas de projeto e de fabricação de moldes com o uso de tecnologias CAD/CAE/CAM [2].

Dessa forma a alternativa mais utilizada, que inclusive propicia os primeiros contatos com os sistemas CAE, ainda é a contratação dos serviços de consultores especializados. A figura 2 mostra os resultados de um levantamento, realizado mundialmente entre empresas do setor de

moldes, no qual pode-se observar uma visível preferência pela utilização dos serviços de tais consultores [4].

Uma outra característica, responsável pela dificuldade de implantação e/ou decisão quanto à necessidade ou não de utilizar os sistemas CAE, é a exigência de um conhecimento multidisciplinar (envolvendo, por exemplo, aspectos relacionados com projeto, materiais, fabricação, processamento, custos, engenharia simultânea, etc.) por parte do corpo técnico das empresas. Este fato, associado à falta de um treinamento adequado do corpo técnico do setor (que considere esta multidisciplinaridade), gera um conhecimento apenas superficial dos recursos dos sistemas CAE, o que justifica, pelo menos parcialmente, uma carência de profissionais especializados no emprego das tecnologias CAE no setor de moldes.

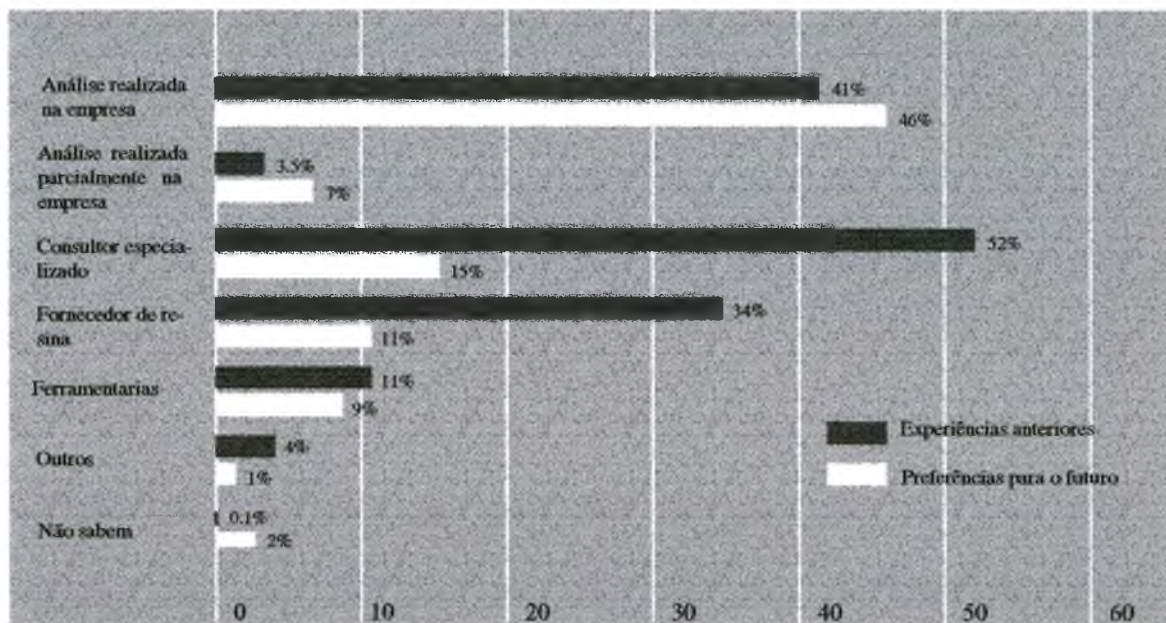


Figura 2 – Formas pelas quais os recursos dos sistemas CAE são utilizados pelas empresas do setor de moldes [4].

Um outro fator, que também desencoraja o uso dos sistemas CAE por parte das empresas do setor, está ligado ao fato de que nem sempre os benefícios obtidos com a realização de uma análise tornam-se evidentes, ou seja, o retorno financeiro, com o emprego desses sistemas, pode ser duvidoso. Nestes casos, a experiência do corpo técnico, associada ao emprego de técnicas mais simples (como a técnica da imagem de enchimento descrita por Dihlmann [1]) parecem ser mais vantajosas para a previsão e/ou correção antecipada de possíveis defeitos e problemas que poderiam vir a ocorrer durante a moldagem.

Outra questão, que também pode ser apontada como causadora de dificuldades, desencorajando assim o emprego de sistemas CAE, está relacionada ao custo da contratação de consultores especializados, quando comparados ao custo total do molde. A experiência tem mostrado que há ocasiões onde o custo, associado à realização de uma análise, representa um percentual elevado quando comparado ao valor de um molde, o que, para muitas matrizes, não é justificado, em virtude também do desconhecimento dos reais benefícios que podem ser alcançados com o emprego dessas tecnologias [5].

Além disso, foi verificado através de um levantamento realizado em nível mundial, entre os usuários dos sistemas CAE, que os níveis de precisão e satisfação, relativos à utilização desta tecnologia, podem alcançar valores relativamente baixos. Tal fato possui ainda um agravante que está relacionado ao banco de dados de materiais plásticos dos *softwares* de simulação. Muitos materiais, utilizados na prática, não estão caracterizados nos bancos de dados dos sistemas CAE, especialmente os materiais fornecidos por fabricantes nacionais. Para a realização de uma análise de fluxo, torna-se necessária a utilização de materiais que estão presentes nos referidos bancos, e que possuem características reológicas básicas semelhantes ao material que será utilizado para a injeção da peça, sendo estes chamados de “contra-tipos”. Contudo, essa prática pode levar, em alguns casos, à obtenção de resultados imprecisos ou até mesmo incorretos, principalmente

quando são observadas, nas simulações, características como campos de tensões, pressões e temperaturas [4, 5]. Este recurso mostra-se mais vantajoso na determinação de características do preenchimento tais como perfil de enchimento, linhas de solda e bolsas de ar, necessitando portanto, uma avaliação criteriosa dos resultados por parte de um profissional com grande experiência no uso do *software*, nos casos de análise dos campos de tensões, pressões e temperaturas [7].

Como consequência das questões que foram expostas anteriormente, uma dúvida muito importante, que surge entre os projetistas de produtos e moldes, é: **“Em que circunstâncias a análise de moldes, via sistemas CAE, é uma ferramenta vantajosa, devendo então ser utilizada?”**. A figura 3 apresenta os resultados de uma enquete realizada entre usuários de sistemas CAE, que pode ser utilizada para ilustrar esta questão [4].

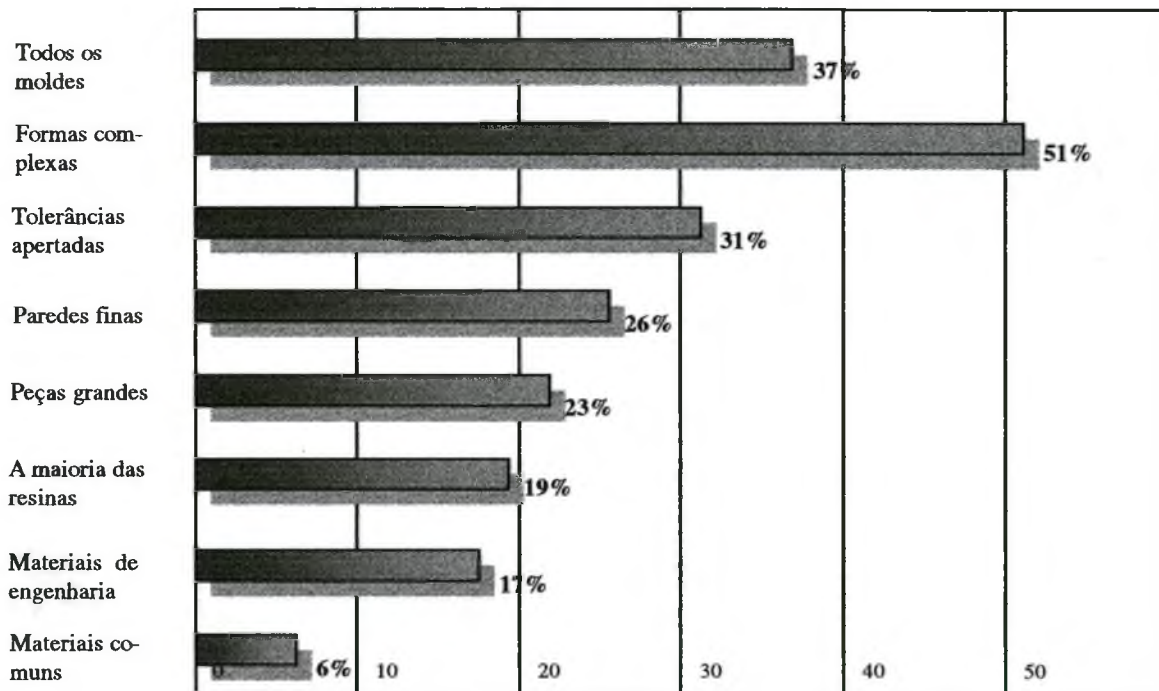


Figura 3- Situações onde as análises de moldes são mais vantajosas [4].

Pode ser visto, através da figura 3, que a resposta da questão exposta anteriormente é de difícil solução, visto não ficar evidente em que situações deve-se empregar uma análise de fluxo. Desta forma os resultados apresentados nessa figura servem apenas para auxiliar no entendimento desta situação, embora a maioria dos usuários concorde que a utilização dos recursos dos sistemas CAE é mais vantajosa para o caso de peças complexas (ver maiores detalhes sobre o conceito de peças complexas no capítulo 4).

É importante observar, todavia, que segundo a pesquisa (apresentada na figura 3) apenas 37% dos usuários acredita que devam ser aplicados os recursos de um sistema CAE em todos os moldes. Pode-se observar também, que a maioria dos usuários (51%) concorda que apenas para peças com formas complexas torna-se necessária a realização de uma análise do molde em um sistema CAE. Desta forma, apenas aqueles casos onde a experiência do corpo técnico (associada à aplicação de técnicas mais simples), não é suficiente para prever os resultados, é que torna vantajosa uma avaliação do molde utilizando-se uma ferramenta CAE [4].

Deve ser salientado aqui que a decisão de utilizar ou não um sistema CAE fica a critério do corpo técnico das empresas do setor de moldes para injeção de plástico. Todavia, é importante mencionar que, em virtude dos avanços conseguidos pelos desenvolvedores de sistemas CAE, podem ser retiradas conclusões das análises de fluxo que podem não estar diretamente relacionadas ao problema que se deseja analisar. Tais conclusões, porém, podem ser úteis na avaliação da qualidade final da peça injetada.

Contudo, há ocasiões onde torna-se difícil para o corpo técnico, estabelecer em que tipos de peças deve-se aplicar ou não os recursos dos sistemas CAE, obtendo-se assim os seus reais benefícios. Estas ocasiões estão relacionadas à interação entre os vários fatores que contribuem para determinar a necessidade ou não da realização de uma análise, e também da situação das empresas do setor de moldes em relação ao emprego dessas tecnologias.

Para exemplificar essa situação, é apresentado em anexo um estudo, no qual pode-se observar que mesmo para peças com geometrias simples (formas simples e sem variações significativas de espessura) pode haver a necessidade de uma análise de fluxo, principalmente quando são consideradas, além da geometria, outras características, tais como requisitos de projeto, material plástico, etc. O referido estudo mostrou que pequenas variações nas condições de processamento podem levar a variações significativas em termos de resistência e microestrutura, resultantes na peça moldada. Nesse sentido, o emprego dos sistemas CAE pode ser útil na determinação de parâmetros que permitam uma estimativa da qualidade do produto injetado.

A solução, que poderia ser empregada com o objetivo de melhorar todo esse quadro de incertezas seria o fornecimento de um treinamento adequado aos profissionais do setor (corpo técnico), proporcionando aos mesmos a ampliação e o aprofundamento de seus conhecimentos em relação aos recursos e limitações dos sistemas CAE, de forma que estes possam então aplicar adequadamente essa tecnologia.

Outras soluções que também poderiam ser empregadas para auxiliar nesta situação seriam:

- 1 - Desenvolver sistemas CAE mais confiáveis, a partir da utilização de, por exemplo, métodos numéricos e modelos matemáticos mais precisos, além de torná-los também mais amigáveis e fáceis de serem utilizados;
- 2 - A partir da experiência de um especialista, definir diretrizes que auxiliem o corpo técnico das empresas na determinação dos casos onde o emprego dos recursos dos sistemas CAE é necessário ou vantajoso.

Tendo como base o que foi exposto anteriormente, tem-se como **objetivo principal** neste trabalho a estruturação, através de uma sistemática, de diretrizes que visem fornecer um auxílio

ao corpo técnico das empresas de moldes, na determinação dos casos onde o emprego de uma análise de fluxo (recursos dos módulos de Flow dos sistemas CAE), visto ser o recurso mais utilizado dos sistemas CAE, é recomendada ou vantajosa. Procura-se também neste trabalho, salientar os casos em que, com técnicas alternativas mais simples, pode-se avaliar a qualidade final da peça injetada.

No entanto, a sistemática que será apresentada não deve ser entendida como uma forma rígida para a solução dos problemas apresentados anteriormente neste capítulo, para o setor de moldes, porém, apenas como uma forma de auxílio ao corpo técnico destas empresas.

Dessa forma, os **objetivos específicos** estabelecidos para o presente trabalho, que servirão de apoio para alcançar o objetivo principal, constituem-se em:

- Apresentar, por meio de um levantamento junto à bibliografia especializada, os principais conceitos de projeto de moldes, utilizados para a prevenção de defeitos de moldagem, bem como as principais técnicas alternativas para a previsão dos referidos defeitos;
- Realizar um levantamento dos principais sistemas CAE comerciais existentes atualmente, fornecendo também uma descrição **sucinta** dos métodos utilizados para a resolução do problema de escoamento do material plástico em moldes de injeção, com o objetivo de salientar os principais recursos e limitações decorrentes de tais métodos;
- Através de um estudo de caso (Anexo), mostrar a problemática envolvida no surgimento de defeitos de moldagem em peças de geometria simples, visando salientar a dificuldade encontrada pelo corpo técnico do setor de moldes, na determinação dos casos onde é necessário ou não o emprego dos recursos de uma análise de fluxo;
- Baseado na sistemática proposta aplicá-la, em casos práticos da indústria de moldes, visando exemplificar melhor seu funcionamento.

Para melhor compreensão do tema abordado, dividiu-se este trabalho em 6 capítulos e um anexo. Desta forma, o capítulo 1, além dos objetivos, apresenta uma descrição da atual situação da aplicação dos recursos dos sistemas CAE, nas empresas do setor de moldes para injeção de plástico, procurando também salientar as principais dúvidas e questões, que surgem entre os usuários dessa tecnologia, quanto a sua utilização. No capítulo 2 são apresentadas técnicas auxiliares e conceitos básicos sobre o projeto de peças plásticas, com informações que visam melhorar a qualidade do produto moldado.

O capítulo 3 mostra o atual estágio de evolução dos sistemas CAE, apresentando uma descrição das equações que governam o fenômeno do escoamento do plástico em um molde, os métodos utilizados para solucionar o problema, bem como uma descrição das principais limitações oriundas das simplificações inerentes aos métodos utilizados para resolver o problema do escoamento do polímero em cavidades de moldes de injeção.

No capítulo 4 é proposta uma sistemática, baseada em diretrizes de apoio a decisão, que visam fornecer um auxílio ao corpo técnico das empresas de moldes, a ser utilizada na determinação dos casos onde o emprego de uma análise de fluxo é recomendada ou vantajosa.

O capítulo 5 descreve a aplicação da sistemática proposta, através da apresentação de casos práticos desenvolvidos junto à indústria de moldes, com o objetivo de avaliar em quais casos há a necessidade do emprego dos recursos dos sistemas CAE, e em que casos poderiam ser empregadas técnicas mais simplificadas para a avaliação da qualidade das peças.

Concluindo o trabalho, são apresentadas no capítulo 6 as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, relacionados ao tema abordado.

2. CONSIDERAÇÕES RELATIVAS AO PROJETO DO MOLDE VISANDO A PREVENÇÃO DE PROBLEMAS DE MOLDAGEM

A moldagem por injeção é um processo com uma alta taxa de produção, que pode ser utilizado para produzir peças plásticas com geometrias muito complexas, abrangendo uma ampla faixa de tamanhos e materiais plásticos [8, 9]. No entanto, é importante reconhecer que o projeto do produto determina decisivamente a facilidade de processamento (ou seja, a manufaturabilidade da peça), bem como os requisitos e custos em relação à ferramenta utilizada [10]. Além disso, deve-se atentar para o fato de que as propriedades da peça moldada serão fortemente influenciadas por fatores tais como, o projeto da ferramenta e as condições de moldagem [1, 8]. Para desenvolver uma peça de qualidade, o projetista da peça de plástico, o projetista do molde, o fornecedor do material e o engenheiro de processos devem trabalhar juntos buscando desenvolver uma peça que seja moldável e funcional. Existe uma probabilidade maior de sucesso no projeto de uma peça de plástico, se tal prática de engenharia simultânea for seguida [8, 9].

O processo de moldagem por injeção é complexo e envolve uma série de etapas. As diferentes fases do processo incluem: preenchimento do molde, recalque, resfriamento do molde, e extração da peça [9, 11].

Preenchimento do molde: Ocorre após o fechamento do molde, quando o material plastificado flui do canhão da unidade injetora, passando pelo bico da máquina para dentro do molde (que está relativamente frio), através da bucha de injeção, dos canais de alimentação, do(s) ponto(s) de injeção entrando por último na cavidade.

Recalque: É a fase que ocorre após a injeção, onde o material plástico é mantido dentro da cavidade do molde, através da aplicação de uma pressão hidráulica, mantendo-se esta pressão por um período de tempo suficiente para que ocorra a solidificação dos pontos de injeção. Desta forma pode-se compensar o efeito de contração do material plástico e garantir que o mesmo reproduza a geometria da cavidade com fidelidade.

Resfriamento: Ocorre a retirada do calor do polímero, que entra na cavidade nas fases de injeção e recalque, através de canais dispostos no molde por onde circula água ou outro fluido (óleo, glicol, etc.) que tem como função o aumento da taxa de retirada de calor, até que a peça atinja sua temperatura de desmoldagem.

Extração da peça: Ocorrem a abertura do molde e a retirada da peça resfriada da cavidade, na maioria dos casos utilizando sistemas de extração mecânicos.

Cada fase do processo de moldagem por injeção sofre influência do projeto da peça. Por esse motivo, para que uma peça de plástico seja considerada moldável, ela deve satisfazer os requisitos de moldagem (quanto ao projeto do molde e do produto) para cada uma das quatro fases do processamento [12]. Embora exista uma grande interação entre as várias fases do processo de moldagem por injeção, a abordagem dada a seguir salienta as considerações mais

importantes, associadas à fase de preenchimento do molde, bem como regras de projeto que visam contornar problemas de moldagem e melhorar a qualidade da peça injetada.

2.1 Regras de Projeto e Considerações Relativas ao Preenchimento do Molde

2.1.1 Posicionamento do Ponto de Injeção

Uma das decisões mais importantes, associadas ao preenchimento do molde, é a determinação do tipo, número e localização dos pontos de injeção [8, 13]. O ponto de injeção, como o nome diz, é o local pelo qual o material entra na cavidade do molde. Os pontos de injeção podem ser colocados em um ou vários locais da peça e podem possuir vários formatos [10, 11]. Os diferentes formatos e localizações, utilizados para os pontos de injeção, podem exercer uma influência decisiva sobre a qualidade da peça. A solução adotada terá influência sobre as fases de preenchimento e recalque do processo de moldagem e exercerá uma forte influência sobre as dimensões finais da peça, bem como em sua qualidade final [10, 11, 14]. O número, a posição e as geometrias adotadas para os pontos de injeção podem influenciar a qualidade da peça de muitas maneiras, provocando alterações nos seguintes elementos:

- Perfil ou forma de preenchimento do molde;
- Qualidade e localização das linhas de solda;
- Grau e direção de orientação;
- Tolerâncias dimensionais;
- Marcas de rechupe;
- Vazios, decorrentes da contração da peça;

- Distribuição de pressão na cavidade;
- Ar aprisionado e falta de preenchimento;
- Tensões residuais;
- Ocorrência ou não de empenamentos.

Na figura 4, onde é apresentado um exemplo de uma peça de plástico injetada, podem ser vistas várias soluções possíveis para a forma, o número e a posição dos pontos de injeção para esta peça apresentada.

Cada disposição, escolhida para os pontos de injeção, tem suas vantagens e limitações específicas. É aconselhável que sejam consideradas tantas opções quantas forem possíveis, estabelecendo-se aquela que ofereça o melhor equilíbrio entre moldabilidade e qualidade da peça acabada.

Por exemplo, para a peça apresentada na figura 4 podem ser adotadas cinco soluções para o posicionamento dos pontos de injeção. No entanto, as três primeiras soluções, onde utilizam-se um ou vários pontos na borda da peça, podem levar a problemas de deflexão do macho, ao aprisionamento de gases, a uma linha de solda possivelmente fraca e a problemas dimensionais. Com este tipo de peça aconselha-se geralmente a colocação dos pontos de injeção no topo da peça ao contrário de colocá-lo(s) nas laterais [8, 10]. Por exemplo, o ponto de injeção colocado na região central do topo da peça proporciona um fluxo mais balanceado do material e uma retirada natural dos gases através da linha de abertura do molde, possibilitando a eliminação das linhas de solda [8, 11].

A disposição dos pontos de injeção pode exercer uma forte influência sobre as dimensões da peça [11]. O anel mostrado na figura 5 é produzido em uma ferramenta de uma única cavidade. As possíveis soluções adotadas para o posicionamento, dos pontos de injeção da peça

apresentada, incluem as formas “a”, “b” e a forma “c”. Do ponto de vista dimensional, e qualidade final da peça, a opção “c”, mostrada na figura 5, é a melhor solução, em virtude dos melhores resultados obtidos em relação ao balanceamento do fluxo, a uniformidade da distribuição de pressão, o bom controle dimensional e a inexistência de linhas de solda.

Infelizmente, esta opção provavelmente resultaria em um elevado consumo de material e exigiria uma operação extra, após a moldagem, para a remoção dos canais de injeção. Um balanço entre os pontos positivos e negativos das soluções encontradas deve ser realizado quando o projetista estiver tomando decisões relativas ao posicionamento dos pontos de injeção [8].

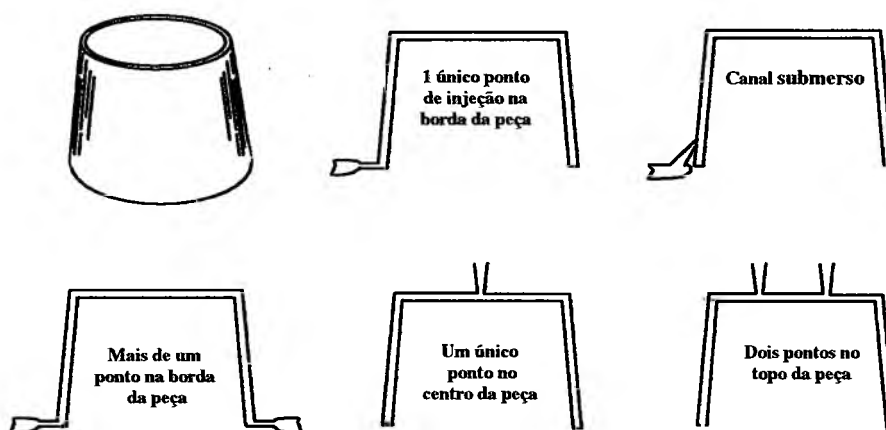


Figura 4 – Diferentes soluções para o posicionamento e os tipos de pontos de injeção que poderiam ser utilizados para a peça injetada apresentada como exemplo [8, 13].



Figura 5 – Disposição dos pontos de injeção utilizados para o preenchimento do anel mostrado [8].

A) Posicionamento dos Pontos de Injeção nas Seções mais Espessas

A utilização de espessuras variáveis, no projeto de peças plásticas, deveria ser evitada sempre que possível [10, 11, 12]. Porém, quando as peças injetadas possuem espessura de parede variável, torna-se geralmente melhor posicionar os pontos de injeção nas regiões mais espessas dos moldados, como mostra a figura 6, pois essas regiões necessitam de maior compensação durante a fase de recalque [8].

Se, por alguma razão, for necessário colocar o ponto de injeção na região mais fina da peça, pode-se utilizar um canal interno, ou uma nervura modificada, para direcionar o fluxo para a região mais espessa durante a fase de recalque, como mostra a figura 6 [8].

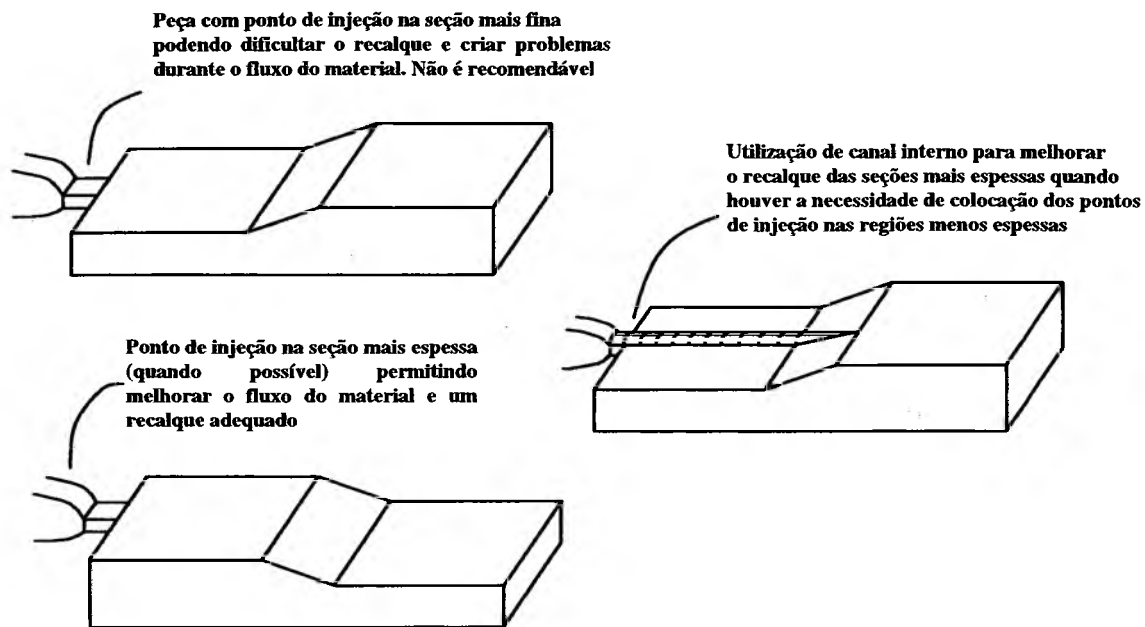


Figura 6 – Exemplos do posicionamento de pontos de injeção em peças com variações de espessura [8].

No entanto, o posicionamento dos pontos de injeção, nas seções mais espessas da peça, também pode ocasionar outros problemas, tal como a ocorrência de “esguichamentos” dentro da cavidade, como pode ser observado na figura 7 [11].

A ocorrência de “esguichamento” pode levar a uma má qualidade superficial da peça bem como à redução das propriedades mecânicas e químicas do moldado.

Um projeto apropriado do ponto de injeção pode ser utilizado para minimizar os efeitos causados pelo “esguichamento” [10, 11]. Por exemplo, pequenos comprimentos e maiores larguras para o ponto de injeção podem ser utilizados, com o objetivo de reduzir os efeitos do “esguichamento”. A colocação de alguma obstrução ao fluxo, em frente ao ponto de injeção (pinos extratores, etc.), também podem auxiliar no desenvolvimento de uma frente de fluxo, minimizando desta forma a probabilidade de ocorrência de “esguichamentos” [10, 11].

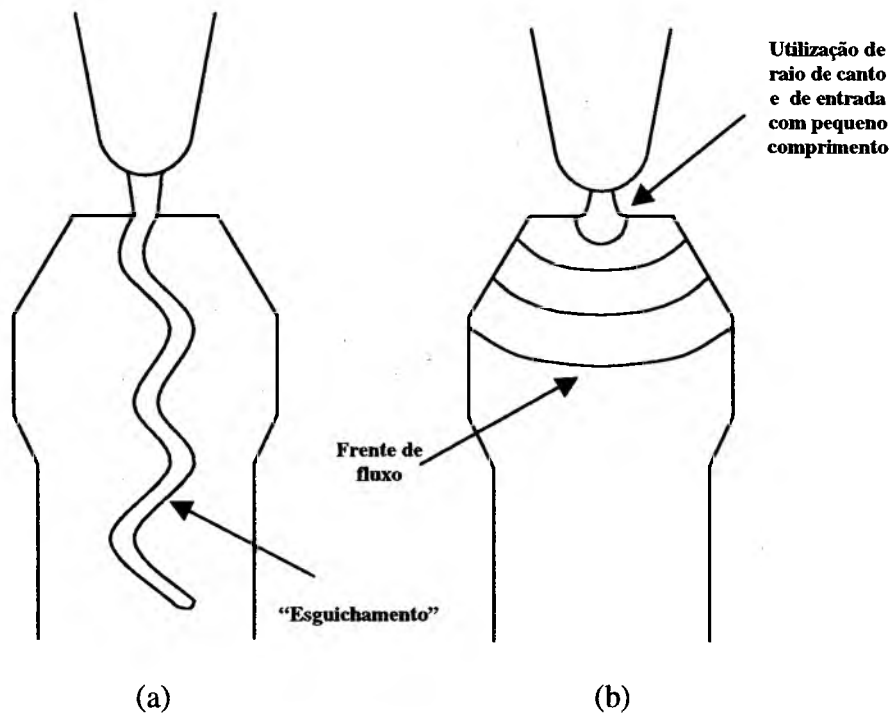


Figura 7 – (a) Formação do esguichamento do material, ao entrar na cavidade, (b) formas de corrigir a ocorrência de esguichamentos [10].

B) Utilização de Canais Quentes

Os sistemas de canais quentes podem ser vistos como extensões do bico das máquinas injetoras dentro das ferramentas de moldagem [8, 9]. Estes sistemas de alimentação oferecem a vantagem de eliminar as sobras correspondentes aos canais de injeção, e os diversos problemas associados com a sua reutilização. No entanto, o uso de canais quentes oferece outras vantagens, como por exemplo a melhoria da qualidade da peça. Quando são utilizados canais quentes, os efeitos provenientes da formação da camada solidificada, nos canais de alimentação, os quais são associados com sistemas de alimentação com canais frios, podem ser minimizados. Desta forma os níveis de orientação, causados pelo processo de moldagem, podem ser reduzidos, resultando em peças com menor nível de tensões residuais [8, 11].

2.1.2 Orientação do Material Durante o Preenchimento

A orientação molecular se desenvolve durante a fase de preenchimento do molde à medida que o material é injetado através do bico da injetora, canais de injeção, pontos de injeção e cavidade, continuando a se desenvolver durante a fase de recalque do processo de moldagem. Nesta fase o polímero continua a fluir para dentro da cavidade do molde para compensar a contração volumétrica da peça [8], fazendo com que as cadeias poliméricas sofram um estiramento devido ao gradiente de velocidades resultante do comportamento laminar do escoamento [18].

Quase todas as peças de plástico possuem algum grau de retenção de orientação molecular. O grau de orientação, retido em uma peça de plástico, é influenciado pelo peso molecular do polímero, pelas características de relaxação e pelas condições de processamento utilizadas durante a moldagem [19]. Variáveis de processo e projeto que possibilitem a relaxação molecular e a redução da pressão de injeção durante o preenchimento de um molde, tendem a reduzir o nível de orientação resultante em um moldado [10, 12]. O nível de orientação resultante será a diferença entre o nível de orientação, imposto pela fase de preenchimento e pela fase de recalque, e o grau de relaxação [8].

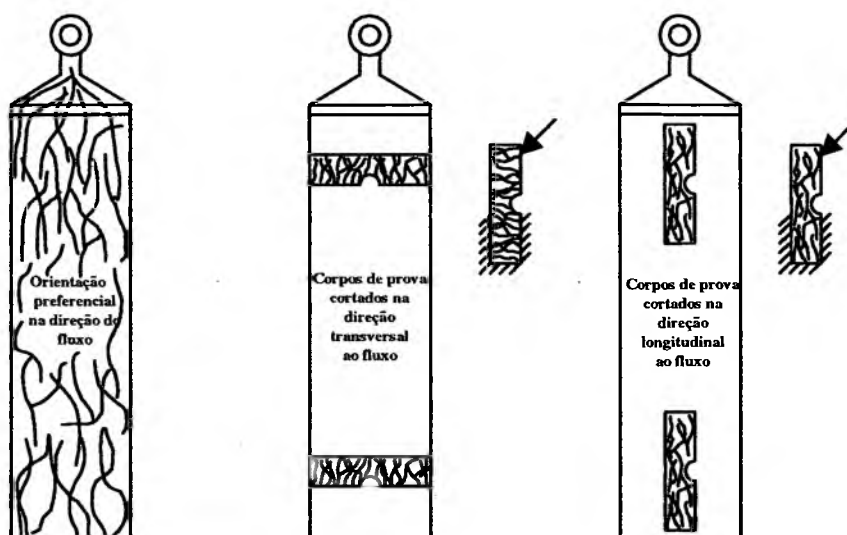


Figura 8 – Efeitos de orientação molecular, causados pelo tipo de ponto de injeção (injeção em leque) utilizado para o preenchimento da peça [8].

Para o preenchimento da peça, apresentada na figura 8, foi utilizado um ponto de injeção em forma de leque (ou canal laminar) no menor lado do moldado. Esse tipo de ponto de injeção resulta em um grau de orientação ao longo da direção do fluxo (ou seja, ao longo do comprimento da peça) [8]. Em virtude das propriedades da peça variarem com a direção principal do fluxo deve-se, sempre que possível, posicionar os pontos de injeção em regiões que promovam a orientação na direção da máxima tensão associada com a aplicação final da peça [12, 18].

A orientação molecular, ao longo do comprimento da peça, poderia resultar em benefício para a mesma em sua aplicação. Por outro lado, quando as peças são sujeitas a tensões de serviço multiaxiais, é geralmente melhor minimizar os níveis de orientação [19, 20].

O grau de orientação, introduzido na peça durante a fase de preenchimento e recalque, como já mencionado anteriormente, é influenciado pelas condições de processamento, pelas propriedades do material e pelo projeto da ferramenta e da peça [8, 20].

Dessa forma, podem ser utilizados, por exemplo, canais de alimentação com diâmetros maiores, pontos de injeção e canais da bucha com pequenos comprimentos, com o objetivo de reduzir a orientação das moléculas. O uso de sistemas com canais quentes também é, geralmente, vantajoso desse ponto de vista. Os cantos, especialmente os cantos internos nos canais de alimentação e na peça, devem ser providos com raios sempre que possível, como apresentado nas Figuras 9 e 10 [10, 11].

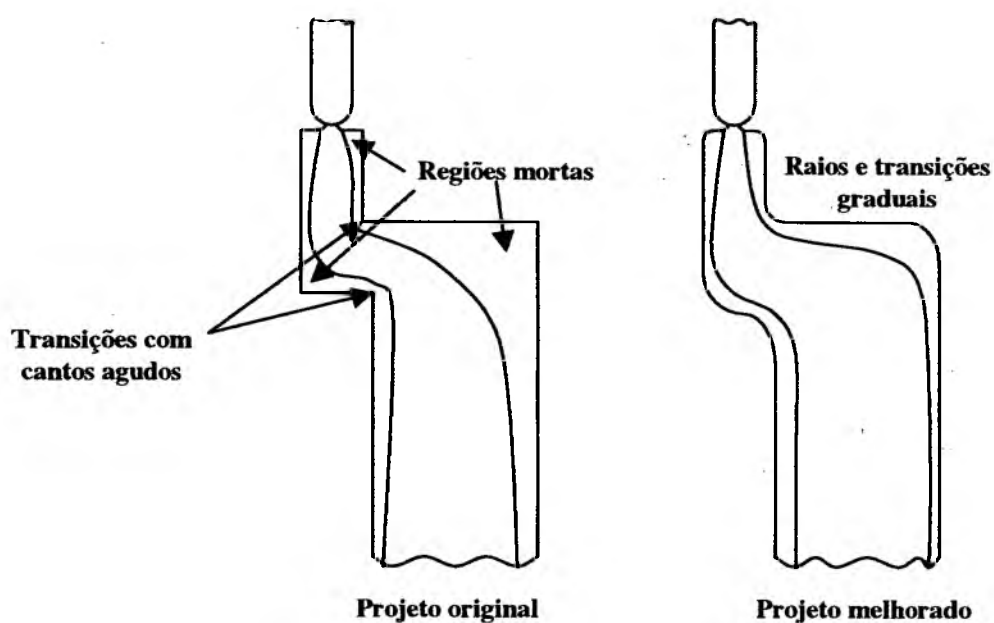


Figura 9 – Utilização de raios de canto para a minimização dos efeitos de orientação molecular do polímero [8].

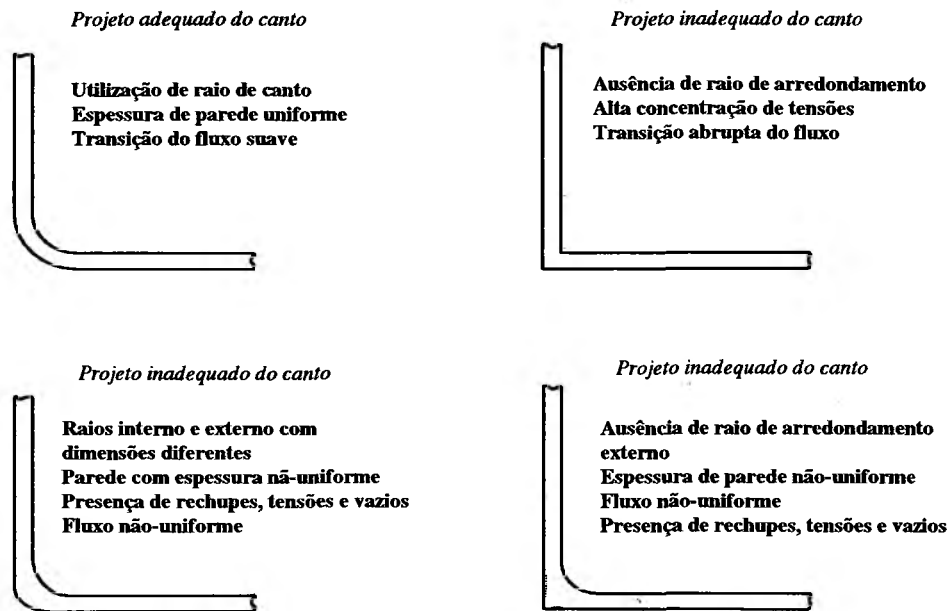


Figura 10 – Formas utilizadas para o projeto de cantos de peças [8, 10].

2.1.3 Perda de Pressão no Preenchimento do Molde

Durante a escolha da posição do ponto de injeção de uma peça, o projetista deve considerar vários fatores relacionados ao preenchimento do molde. O processo de preenchimento de uma cavidade tem início no ponto de injeção, e continua à medida que o material segue o caminho de menor resistência ao fluxo. O ponto de injeção deve ser posicionado de tal forma que a cavidade seja preenchida uniformemente e que a queda de pressão, através desta, não seja excessiva [12].

A queda ou perda de pressão, durante o preenchimento do molde, é influenciada por vários fatores. Esses fatores, relacionados ao preenchimento do molde, incluem:

- tipo de material a ser injetado;

- geometria da cavidade;
- sistema de alimentação do molde;
- condições de processamento.

Observa-se então que a pressão de injeção é influenciada por um grande número de variáveis, incluindo algumas que podem ser controladas pelo projetista do produto.

Considerando-se o exemplo mostrado na figura 11, as opções para o posicionamento do ponto de injeção, para esta peça, incluem a utilização de um único ponto nas extremidades, um único ponto central, ou talvez uma combinação destas alternativas (múltiplos pontos de injeção). A utilização de múltiplos pontos de injeção constitui uma solução eficiente para a redução da pressão de preenchimento [8], no entanto poderia significar um problema, devido ao aparecimento de linhas de solda perpendiculares à direção da tensão de serviço, podendo reduzir a durabilidade do produto. Se um único ponto for colocado na região mais fina da peça, poderia levar a problemas de recalque e solda fria na região mais espessa no fim da cavidade. Seria difícil recalcar e controlar efetivamente as dimensões da seção espessa, na região de final de fluxo, com esta posição de injeção. Já um único ponto colocado no lado mais espesso permitiria controlar o recalque em todas as seções da peça. Por outro lado, um ponto de injeção posicionado na região central da peça seria a melhor solução do ponto de vista de redução da pressão, porém, poderia também causar problemas durante o recalque da região mais espessa da peça mostrada na figura.

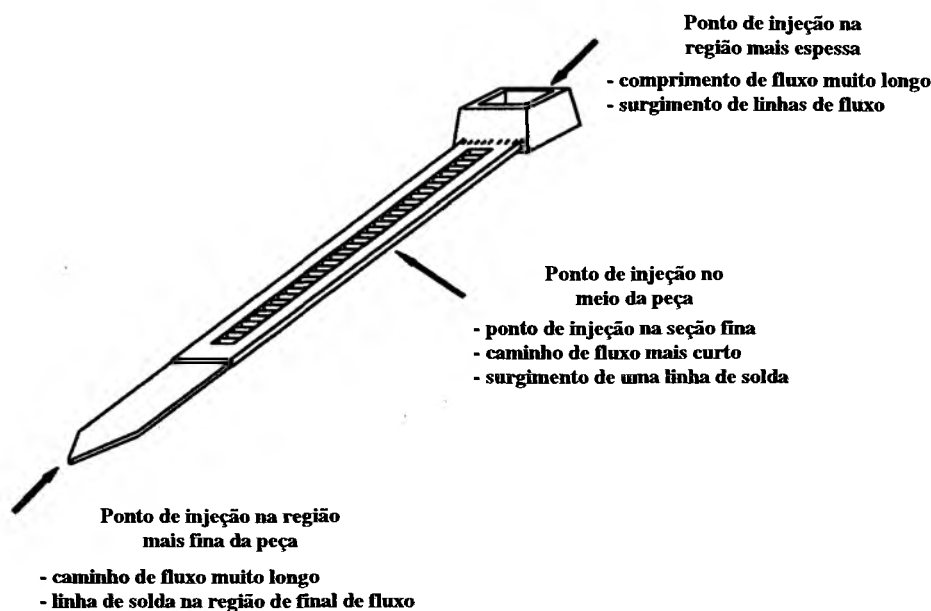


Figura 11 – Efeitos do posicionamento do ponto de injeção nas diferentes regiões de uma peça [8].

2.1.4 Balanceamento do Preenchimento de Moldes Através de Guias e Restritores de Fluxo

Idealmente, o material plástico deve fluir do ponto de injeção alcançando todas as extremidades da cavidade ao mesmo tempo. No entanto, a peça apresentada na figura 12, por possuir espessura de parede constante, irá apresentar um perfil de preenchimento radial, nos primeiros estágios da injeção [8, 12, 14].

Desta forma o material alcança primeiramente os lados esquerdo e direito da peça. Essa forma de preenchimento (fluxo desbalanceado), pode levar à ocorrência de efeitos tais como a compactação exagerada do material plástico em determinadas regiões da peça (*overpack*) e mudanças na direção do fluxo, cujo resultado na peça acabada poderá ser uma tendência ao empenamento.

Uma possível solução para esse problema seria o aumento do número de pontos de injeção, como mostra a figura 13 A e B. Pode-se ver, através desta figura, que o aumento do número de pontos de injeção melhora a uniformidade do preenchimento, diminuindo, desta forma, o grau de *overpack* ao qual a peça é submetida [11, 12].

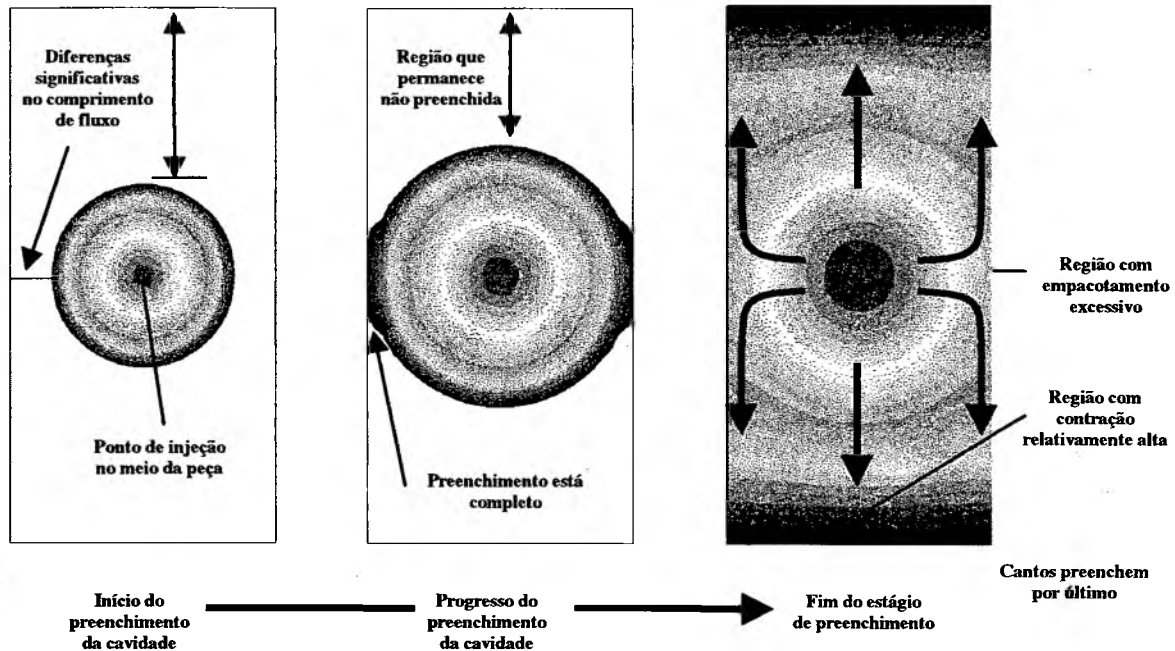


Figura 12 – Efeito do posicionamento do ponto de injeção, sobre a forma de avanço da frente de fluxo [12].

Contudo, esta solução, apesar de ser comparativamente melhor, só poderia ser utilizada se as linhas de solda formadas e as marcas de injeção deixadas fossem funcionalmente e esteticamente aceitáveis [8].

Outra solução que poderia ser adotada é a modificação da forma de preenchimento, de um perfil radial para um perfil retangular, fazendo com que as frentes de fluxo alcancem todas as extremidades da cavidade ao mesmo tempo. Isso pode ser feito através de ajustes locais na espessura de parede da peça [12].

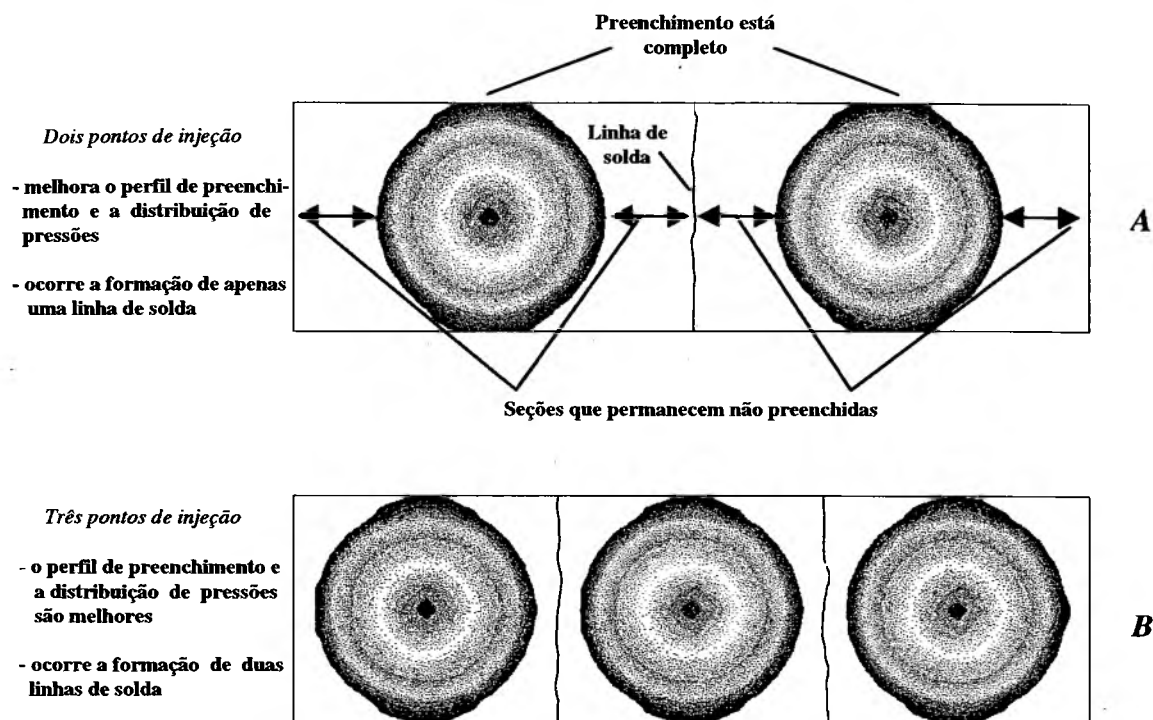


Figura 13 – Efeito do aumento do número de pontos de injeção sobre o perfil de preenchimento e distribuição de pressões [8, 12].

Os aumentos locais na espessura de parede, para facilitar o fluxo, são conhecidos como guias de fluxo ou canais internos, e estendem-se do ponto de injeção em direção às seções da peça mais difíceis de serem preenchidas, enquanto as reduções na espessura de parede, para restringir o fluxo, são conhecidas como restritores ou defletores de fluxo, sendo posicionadas ao longo das seções que são mais facilmente preenchidas [8, 12].

O objetivo da utilização das guias e dos defletores de fluxo é a equalização das pressões entre as regiões mais fáceis e mais difíceis de serem preenchidas, para que as frentes de fluxo alcancem todas as extremidades da cavidade simultaneamente [8, 11, 12].

O perfil de preenchimento, para a peça mostrada na figura 14, poderia então ser modificado, utilizando-se guias ou defletores de fluxo. Outro exemplo que poderia ser citado é a peça mostrada na figura 15, a qual foi produzida utilizando-se três pontos de injeção e guias de

fluxo nas diagonais [8]. Um projeto apropriado das guias de fluxo garante um preenchimento uniforme, resultando em uma peça de melhor qualidade, reduzindo assim a tendência ao empenamento [8, 12].

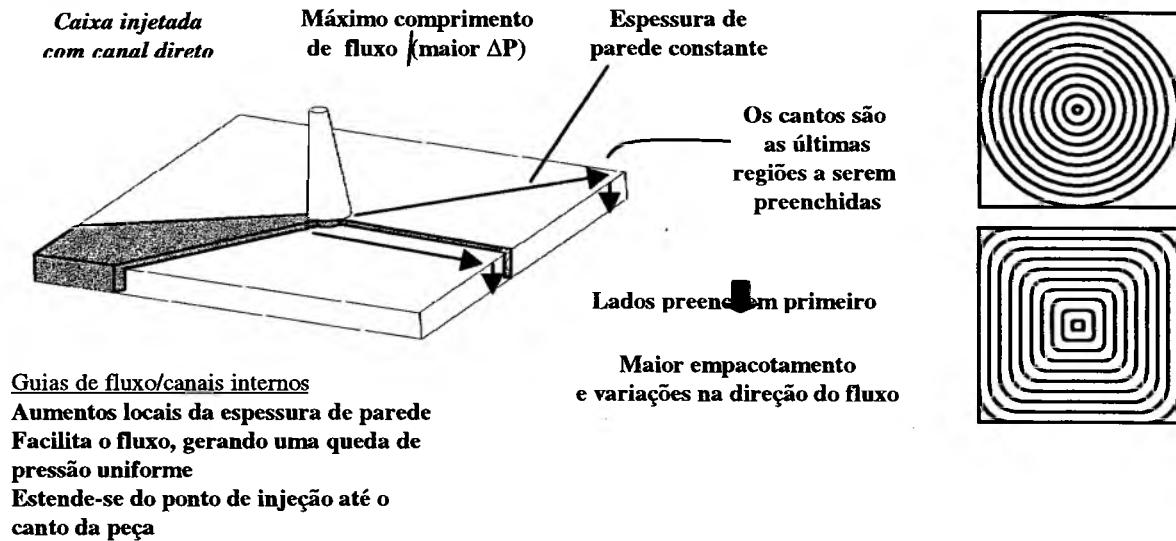


Figura 14 – Utilização de guias e restritores de fluxo para a modificação do perfil de avanço da frente de fluxo [12].

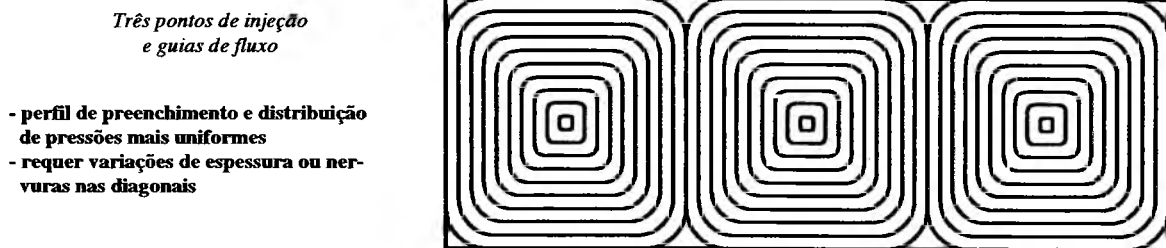


Figura 15 – Utilização de três pontos de injeção juntamente com a aplicação de guias de fluxo para a modificação do perfil de preenchimento [8, 11].

2.1.5 Linhas de Solda

As linhas de solda formam-se durante o processo de preenchimento do molde quando a frente de fluxo se separa e se encontra posteriormente em alguma região. A separação da frente de fluxo pode ser causada por obstruções, variações de espessura ou em peças que possuem múltiplos pontos de injeção [21–25].

As linhas de solda, quando visíveis, apresentam-se com um aspecto semelhante a trincas, na superfície do moldado (Figura 16). O mais importante, no entanto, em relação à formação da linha de solda, é a resistência mecânica apresentada pela região onde ocorre o seu aparecimento, que pode ser significativamente menor do que em regiões onde esta não ocorre [24].

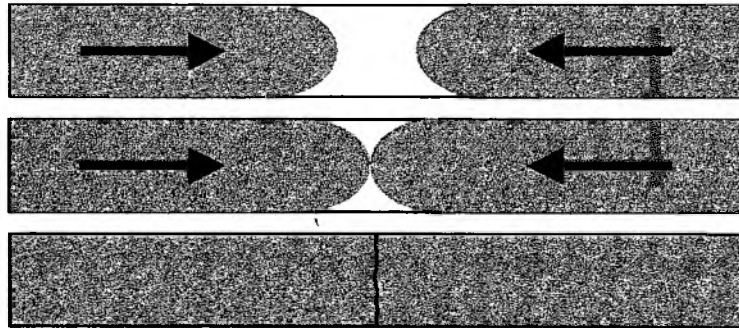
As características apresentadas pela linha de solda, ou seja, sua resistência mecânica, química e sua aparência, são influenciadas pelos seguintes aspectos [8, 24]:

- tipo de material;
- projeto da peça;
- projeto do molde;
- condições de processamento.

Todavia, torna-se difícil prever a qualidade e a aparência de uma peça que possua linhas de solda, em virtude de existir apenas uma pequena quantidade de informações disponíveis a respeito de sua formação.

Existem, contudo, certas regras que podem auxiliar o projetista na melhoria da aparência e resistência de uma linha de solda. Uma das regras de projeto mais importantes nesse caso, é a de posicionar as linhas de solda em locais que não sejam críticos em termos de estética e

desempenho estrutural do produto [10, 11, 12]. O projetista pode variar a geometria, a espessura de parede e a disposição dos pontos de injeção na peça, com o objetivo de posicionar as linhas de solda apropriadamente [12].



Defeitos estruturais/visuais

Figura 16 – Formação de linhas de solda em peças injetadas [12].

Também pode-se conseguir uma melhoria do desempenho e da aparência das linhas de solda, através de ajustes nas condições de processamento, tal como a temperatura do material, como foi descrito anteriormente [8, 12].

Variáveis (temperatura do fundido e do molde, velocidade de injeção etc) que aumentem a temperatura e a pressão, no plano de encontro das frentes de fluxo, exercem um efeito positivo sobre a qualidade geral da linha de solda formada, pelo fato de promover um melhor emaranhamento das moléculas através da interface da solda [23, 24]. Bicos da máquina com maiores comprimentos e sistemas de canais quentes permitem um melhor controle sobre a temperatura do material. Em alguns casos, como o apresentado na figura 17, poderia ser utilizada a adição de uma cavidade auxiliar de solda, para melhorar a resistência da solda, transformando a solda fria formada em uma solda mais resistente [13]. No entanto, esta técnica representa um consumo adicional de material, além de necessitar uma operação posterior à moldagem, para a sua remoção.

Uma alternativa para aumentar a resistência da linha de solda seria aumentar o número de pontos de injeção na peça mostrada na figura 17 [8]. Esta técnica tem como resultado o aumento do número de linhas de solda, contudo em virtude da diminuição dos comprimentos dos caminhos de fluxo até estas regiões, são obtidas maiores temperaturas, com um conseqüente aumento da resistência das linhas de solda formadas devido à facilidade de uma maior fusão entre as duas frentes de fluxo [10,11].

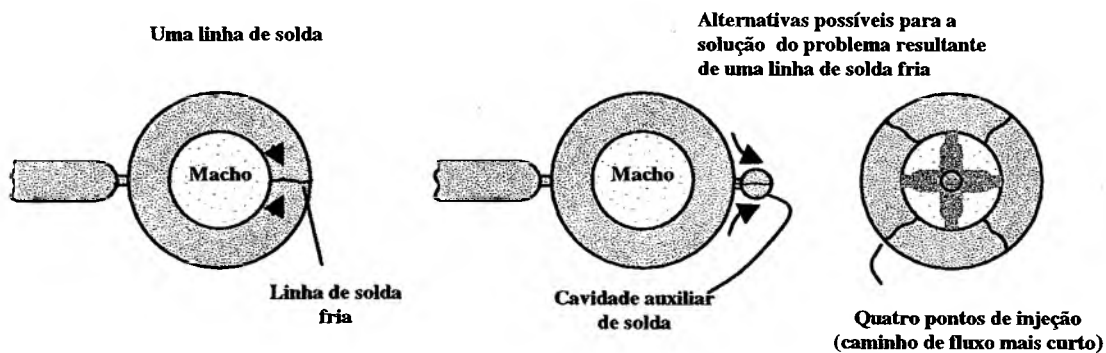


Figura 17 – Exemplos de soluções adotadas para melhorar a qualidade de linhas de solda [8, 13].

2.1.6 Empenamentos de Peças Moldadas por Injeção

O comportamento anisotrópico da contração é um fenômeno indesejável na moldagem por injeção, pois pode levar a dificuldades para atingir as dimensões corretas da peça final, ocorrendo maiores níveis de tensão interna e empenamento quando o nível de tensões for suficiente para causar a deformação da peça [25-27]. Os *softwares* de simulação podem ser utilizados pelos projetistas para otimizar os projetos da peça e da ferramenta, minimizando assim a possibilidade de ocorrência de contração diferenciada e empenamento, mesmo antes da ferramenta ter sido construída [12, 22, 28]. Vários fatores são responsáveis pelo comportamento complexo e não-uniforme da contração de peças moldadas por injeção. Estes fatores incluem: (A) comportamento

anisotrópico do material devido à orientação induzida pelo fluxo, (B) contração térmica assimétrica devido a um resfriamento inadequado da peça e (C) contração volumétrica não-uniforme [12, 26].

A) Comportamento anisotrópico devido à orientação do material

O grau de orientação imposto pelo fluxo do material, durante o preenchimento do molde, tem uma grande influência na contração exibida pelo mesmo. Durante o preenchimento do molde, as moléculas dos polímeros são submetidas a um estiramento que resulta na orientação molecular e no comportamento anisotrópico durante a contração. Os materiais plásticos puros tendem a contrair mais na direção do fluxo quando comparados à contração na direção transversal ao fluxo, enquanto os materiais reforçados apresentam uma restrição na sua contração na direção de orientação das fibras. Em geral, a contração tenderá a ser mais isotrópica quando o grau de orientação, imposto pelo fluxo do material durante o preenchimento do molde, for minimizado e existirem condições favoráveis para a ocorrência de relaxação molecular (Figura 18) [8, 12, 29, 30].

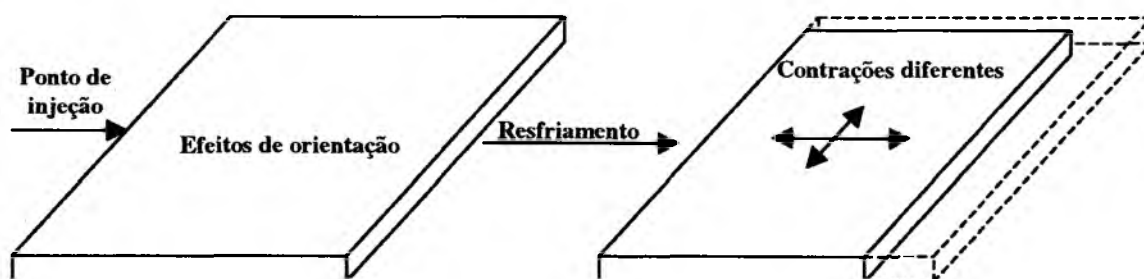


Figura 18 – Contrações diferenciadas na direção longitudinal e transversal ao escoamento do material, devido a efeitos de orientação induzida pelo fluxo [12].

B) Resfriamento Diferenciado

A contração diferenciada na direção da espessura da peça pode ser causada por diferenças na taxa de resfriamento entre a cavidade e o macho. Devido à complexidade dos projetos das peças e dos moldes é difícil alcançar, na prática, um resfriamento completamente uniforme (Figura 19) [8, 31].

O resfriamento não-uniforme causa contrações térmicas diferenciadas do polímero, através da seção transversal da peça, à medida que ela resfria. As superfícies mais quentes da peça continuarão a contrair em relação às superfícies mais frias, após a solidificação do ponto de injeção e da extração da peça, ocasionando tensões internas que aumentam a probabilidade de empenamento da mesma e susceptibilidade a uma ruptura prematura [12]. Desta forma, são utilizadas regras de projeto do sistema de refrigeração do molde, com o objetivo de tornar mais uniforme a retirada de calor da peça [8, 12]. São utilizados também materiais de alta condutividade térmica, em áreas críticas do molde, nas quais existe uma grande concentração de calor, de forma a facilitar a extração do mesmo [8].

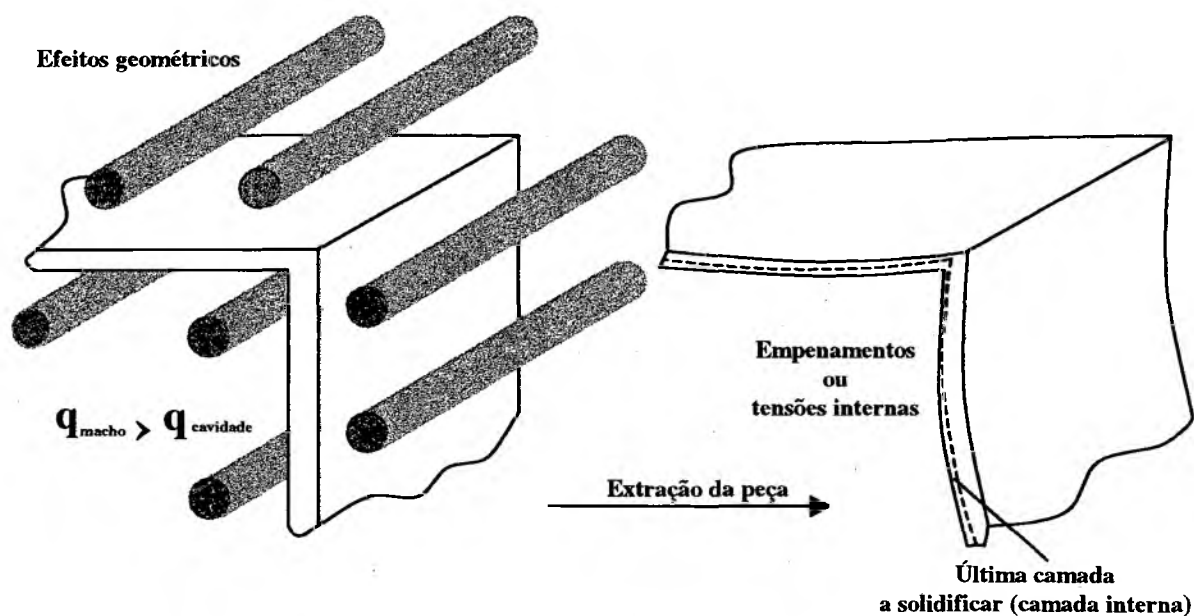


Figura 19 – Empenamento causado por diferenças existentes entre as taxas de retirada de calor do macho e da cavidade [8].

C) Contração volumétrica não-uniforme

A magnitude da pressão de recalque, utilizada durante o processo, terá um efeito significativo sobre a contração. Altas pressões de recalque levam a uma redução global da contração, enquanto baixas pressões aumentam a contração. Infelizmente, as pressões na cavidade variam de um máximo no ponto de injeção até um mínimo na região de fim de fluxo devido à compressibilidade do material [12, 26].

As diferenças de pressão, ao longo do comprimento da cavidade, são bastante significativas, principalmente para caminhos de fluxo maiores ou para peças com paredes finas. Estes diferenciais de pressão, que ocorrem ao longo do ciclo, resultam em valores de contração que tendem a ser maiores em direção às regiões de fim de fluxo, longe do ponto de injeção

(Figura 20). As diferenças de contração, devido às diferenças de pressão, podem também levar à distorção ou empenamento do moldado [8, 27].

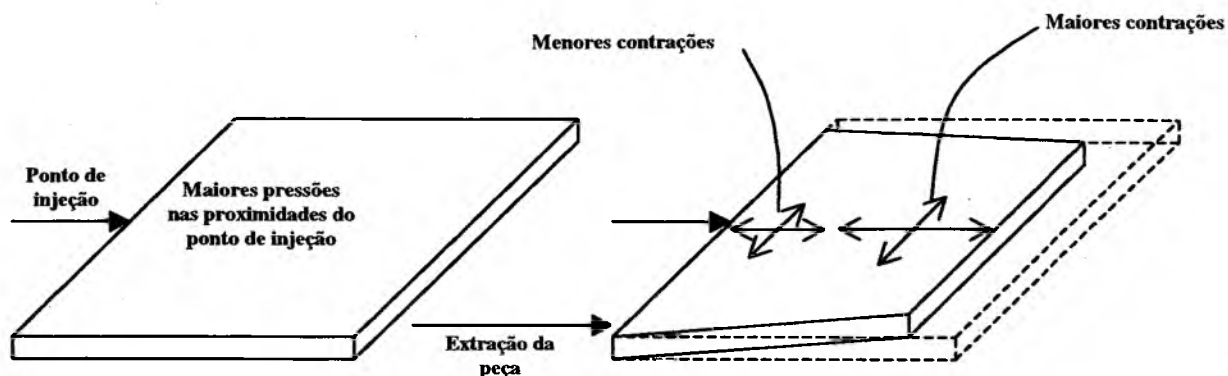


Figura 20 – Efeitos de contração diferenciada causados pelas variações de pressão existentes ao longo do caminho de fluxo [12].

Esta contração diferencial também prejudica o procedimento de dimensionamento da ferramenta para o projetista. Uma maneira de contornar o problema é o uso de múltiplos pontos de injeção. Desta forma, o comprimento de fluxo é reduzido e as pressões na cavidade tendem a ser mais uniformes (portanto a contração de moldagem é mais uniforme) pelo fato de todas as regiões se localizarem agora mais próximas dos pontos de injeção [11, 12].

2.2 Técnicas Auxiliares para a Avaliação da Qualidade de Peças Injetadas

2.2.1 Dados de Fluxo em um Molde em Espiral

Uma forma de avaliar a moldabilidade de um tipo específico de material é realizada através do fluxo em serpentina, onde o material é injetado dentro de uma cavidade em forma de uma longa espiral, utilizando-se várias condições de moldagem.

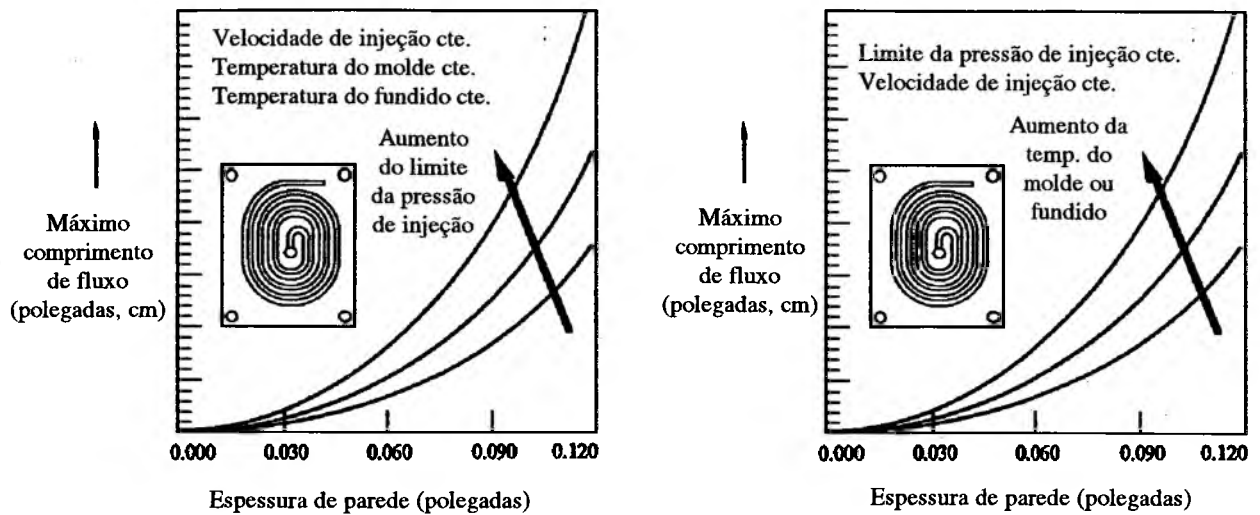


Figura 21 – Curvas de máximo comprimento de fluxo atingido como função da espessura de parede e das condições de processamento à esquerda, e à direita, como função da pressão de injeção [8].

O máximo comprimento de fluxo, que é alcançado experimentalmente, é determinado como função da espessura da cavidade e das condições de injeção utilizadas. As variáveis de processo, que são tipicamente avaliadas, incluem temperatura do material, temperatura do molde, máxima pressão de injeção, velocidade de injeção e espessura da cavidade. Os dados experimentais são geralmente apresentados com o máximo comprimento de fluxo em função da espessura da parede da peça, como mostra a figura 21 [8, 13]. Os resultados desses testes de fluxo auxiliam o projetista na comparação da moldabilidade dos diversos *grades* de resinas, bem como na escolha da posição dos pontos de injeção [13].

2.2.2 Estimativa da Queda de Pressão Durante o Preenchimento de um Molde

Existem situações onde podem ser utilizadas estimativas para auxiliar nas decisões relacionadas ao preenchimento do molde. Uma destas situações refere-se ao cálculo da pressão de injeção. No entanto, é importante salientar que a análise da pressão de injeção, dada abaixo, fornece apenas uma estimativa da perda de pressão em cavidades de moldes de injeção, sendo porém útil na identificação de tendências e no auxílio do entendimento das simulações de preenchimento em computador [8].

A análise da queda de pressão assume para os cálculos iniciais as seguintes hipóteses [8]:

- 1 - comportamento isotérmico (temperatura constante do material);
- 2 - comportamento do fluxo em regime permanente (velocidade de injeção constante durante o deslocamento do pistão);
- 3 – comportamento Newtoniano do fluido.

Além dessas, são feitas hipóteses adicionais sobre a regularidade de forma da peça e dos canais, onde a peça, que apresenta furos e raios, pode ser considerada como um canal retangular de comprimento L , largura W e espessura H , pois admite-se que tais características não sejam relevantes para a determinação da pressão de injeção.

Além disso, torna-se necessário conhecer os dados do material a ser utilizado para a peça, cuja viscosidade precisa ser conhecida para determinar-se a pressão de injeção do molde.

Os dados de viscosidade podem ser obtidos de fornecedores de matéria-prima, e na maioria das vezes são apresentados em formas de tabelas ou gráficos, como exemplificado na figura 22.

Quando os valores de viscosidade dados pelo fornecedor do material são descritos como aparentes, eles não representam corretamente o comportamento não-Newtoniano/pseudoplástico

exibido pela maioria dos polímeros. Desta forma, para um fluido seguindo a lei das potências, a viscosidade corrigida ou Rabinowitsch pode ser determinada usando:

– Para escoamento em canal cilíndrico,

$$\eta_T = [4n/(3n+1)] \cdot \eta_a \quad (2.1)$$

– Para escoamento em canal retangular,

$$\eta_T = [3n/(2n+1)] \cdot \eta_a \quad (2.2)$$

Onde,

n – é o índice da lei das potências ($\eta = K \cdot \gamma^{n-1}$), sendo $n = 1$ para fluidos Newtonianos, $n < 1$ para fluidos pseudoplásticos

η_T – é a viscosidade corrigida ou Rabinowitsch,

η_a – é a viscosidade aparente,

γ – é a taxa de cisalhamento e

K – consistência [Pa.sⁿ].

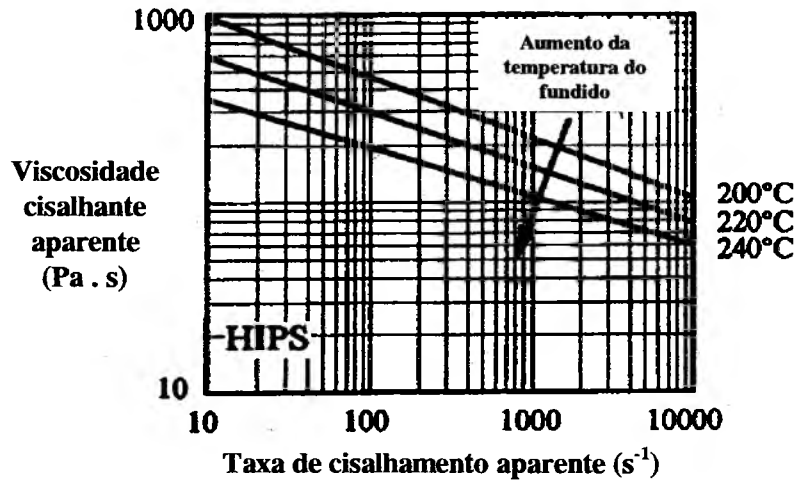


Figura 22 – Curvas de comportamento da viscosidade cisalhante para o poliestireno de alto impacto [8].

A partir dos dados de viscosidade, mencionados anteriormente, da geometria simplificada da peça e das condições de processamento (especificadas pelo projetista), pode-se estimar a pressão de preenchimento do molde da seguinte maneira:

Especificação das condições de processamento: O projetista deve determinar as condições de processamento ou de moldagem para a peça (temperatura do material e tempo de injeção), podendo basear sua escolha em experiências passadas, ou selecionando as piores condições de moldagem, por segurança (menor temperatura/menor viscosidade).

Determinação do volume da peça: O volume total de um moldado pode ser obtido através da soma dos volumes individuais das geometrias que compõem o sistema de alimentação e da peça:

– Volume de um canal cilíndrico,

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot L \quad (2.3)$$

– Volume de um canal retangular,

$$V = L \cdot W \cdot H \quad (2.4)$$

Onde,

R – é o raio do canal,

L – o comprimento do canal,

W – a largura do canal e

H – a altura do canal.

Determinação da vazão volumétrica: A vazão volumétrica pode ser obtida dividindo-se o volume do moldado pelo tempo de injeção estimado. Caso houvesse mais de uma ramificação no molde, a vazão para cada cavidade seria o volume total do moldado dividido pelo tempo de injeção e pelo número de ramificações existentes.

O cálculo da vazão volumétrica é realizado para tornar possível a determinação da pressão de injeção para o moldado.

$$Q_T = V_T / t_f \quad (2.5)$$

Onde,

Q_T – Vazão total

V_T – Volume total do moldado

t_f – Tempo de injeção (determinado através da utilização da experiência do corpo técnico ou métodos mais simples).

Determinação da taxa de cisalhamento aparente: A viscosidade de um polímero, a qual é utilizada para determinar a pressão de injeção, é função da temperatura do material e da taxa de cisalhamento a que o mesmo está submetido.

Assim sendo, pode-se determinar a taxa de cisalhamento da seguinte forma:

– Para escoamento em canal cilíndrico,

$$\gamma_a = [4 \cdot Q] / [\pi \cdot R^3] \quad (2.6)$$

– Para escoamento em canal retangular,

$$\gamma_a = [6 \cdot Q] / [W \cdot H^2] \quad (2.7)$$

Como pode ser visto através das equações 2.6 e 2.7, a taxa de cisalhamento é função da geometria do canal e da vazão volumétrica.

Determinação da viscosidade aparente: A viscosidade aparente de um polímero, no seu estado fundido, pode ser determinada quando são conhecidas a temperatura e a taxa de cisalhamento aparente às quais está submetido. Neste caso, os valores de viscosidade aparente podem ser tomados diretamente do conjunto de curvas de viscosidade (neste caso apresentadas para o poliestireno de alto impacto, mostradas na figura 22).

A partir dos valores encontrados na figura 22, são calculadas as viscosidades verdadeiras utilizando as equações 2.1 e 2.2.

Determinação da queda de pressão: A pressão de injeção total, ΔP_t [Mpa], para o preenchimento do molde, será a soma das quedas de pressão individuais ao longo do ramo.

$$\Delta P_T = \sum \Delta P_i = \Delta P_{\text{canal de injeção}} + \Delta P_{\text{canais de alimentação}} + \Delta P_{\text{ponto de injeção}} + P_{\text{cavidade}} + 7 \quad (2.8)$$

As quedas de pressão individuais podem ser assim calculadas desde que as geometrias, as vazões volumétricas e os valores de viscosidades sejam conhecidos.

– Para escoamento em canal cilíndrico,

$$\Delta P = [8 \cdot Q \cdot \eta \cdot L] / [\pi \cdot R^4] \quad (2.9)$$

– Para escoamento em canal retangular,

$$\Delta P = [12 \cdot Q \cdot \eta \cdot L] / [W \cdot H^3] \quad (2.10)$$

A pressão de preenchimento do molde, determinada utilizando a equação 2.8, é uma indicação da pressão no instante do preenchimento. Mesmo que o valor absoluto determinado aqui não esteja correto, devido ao grande número de hipóteses adotadas, este procedimento auxiliará o projetista no balanceamento do fluxo, determinação da tendência ao empenamento e em outros tipos de decisões de projeto [8].

2.2.3 Análise Qualitativa da Formação de Linhas de Solda Baseada no Ângulo de Encontro das frentes de Fluxo

A aparência ou visibilidade (característica estética) das linhas de solda pode ser correlacionada ao ângulo de encontro das duas frentes de fluxo (Figura 23) que darão origem à mesma [11, 32]. Alguns estudos têm apresentado que existe uma tendência ao desaparecimento das linhas de solda, quando o ângulo de encontro entre as frentes de fluxo atinge um determinado valor conhecido como “ângulo de desaparecimento” [8], o que dependendo do tipo de material utilizado pode estar entre 120 a 150°. Este princípio pode ser utilizado em conjunto com simulações do preenchimento em computador [11], ou mesmo com técnicas mais simples, tais como a imagem do enchimento, na determinação, mesmo que qualitativa, da aparência de linhas de solda.

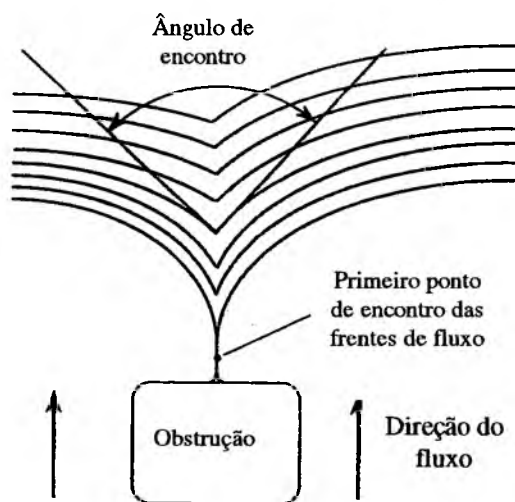


Figura 23 – Ângulo de encontro entre as frentes de fluxo formadoras de uma linha de solda [11].

3. RECURSOS PARA A SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DE POLÍMEROS EM MOLDES DE INJEÇÃO

O comportamento do fluxo do material no preenchimento da cavidade deve ser determinado na fase de projeto da peça e do molde. Os procedimentos que permitem uma visualização (análise qualitativa e quantitativa) do processo de escoamento da matéria plástica no interior da cavidade são conhecidos sob o termo de “Análise de Fluxo” [1, 12].

Essa visualização compreende a geração de uma representação gráfica do escoamento do material dentro do molde. Esta representação deve fornecer informações que permitam prever:

- o tipo, a posição mais favorável e a quantidade de pontos de injeção [1];
- a forma de preenchimento da cavidade (perfil das frentes de fluxo);
- a posição de linhas de solda;
- a posição de eventuais bolsas de ar e,
- a direção de orientação principal do fluxo [7, 18, 19].

Na análise qualitativa pode-se simular o escoamento do material plástico dentro da cavidade do molde, possibilitando ao corpo técnico prever a formação de defeitos tais como bolsas de ar e linhas de solda, permitindo, portanto, a correção da ferramenta (molde), mesmo antes de sua fabricação ter sido iniciada.

Na análise quantitativa, contudo, dispõe-se de equações que, levando em conta o comportamento do material e condições de moldagem, permitem calcular grandezas envolvidas no processo de injeção, tais como pressão de injeção, temperaturas do material e do molde, percentual de camadas solidificadas, tensões internas, força de fechamento do molde e taxa de

cisalhamento, entre outras, possibilitando uma avaliação mais detalhada do processo de escoamento do polímero dentro da cavidade do molde [1, 12, 33].

Como meios de apoio para a representação do preenchimento tem-se à disposição, por exemplo, procedimentos como a imagem de enchimento, bem como programas para computadores com recursos gráficos (sistemas CAE) [1, 11], os quais são o objetivo principal deste capítulo.

3.1 Método da Imagem do Enchimento

O método da imagem de enchimento* corresponde a uma representação gráfica das frentes de fluxo se deslocando dentro da cavidade (representação do escoamento do polímero), ou seja, possibilita uma análise qualitativa do preenchimento da cavidade de um molde. A avaliação quantitativa requer a aplicação de sistemas de equações complexas, sendo muito difícil utilizá-la na prática, devido à exigência de um tempo elevado para a resolução de tais equações. Os programas, descritos mais adiante neste capítulo, utilizam estas equações resolvendo-as em computadores com grande velocidade de processamento, tornando a disponibilidade dos resultados uma realidade mais próxima [10, 32].

Uma representação do escoamento serve para determinar o avanço do material para diferentes tempos do processo de injeção, em diferentes áreas da cavidade. A representação teórica do escoamento equivale à fabricação de peças parcialmente injetadas em moldes prontos através da injeção progressiva (com volumes escalonados). A figura 24 mostra uma comparação entre a representação teórica (método da imagem de enchimento) e a injeção progressiva de uma experiência prática.

*. Uma descrição mais detalhada para a utilização do método pode ser encontrada em [1, 11].

Os fabricantes de peças de plástico e de moldes podem obter informações importantes sobre o comportamento reológico do plástico, através da determinação prévia da frente de fluxo no molde, pelo método da imagem de enchimento [1, 11]. Com este método, tem-se disponível um procedimento para a previsão do escoamento do plástico no interior de cavidades em moldes para injeção de termoplásticos sem o uso do computador. Quando esta técnica é aplicada na fase de projeto, antes do dimensionamento final do molde e do posicionamento do(s) ponto(s) de injeção, podem ser evitados erros que certamente implicariam em elevados custos.

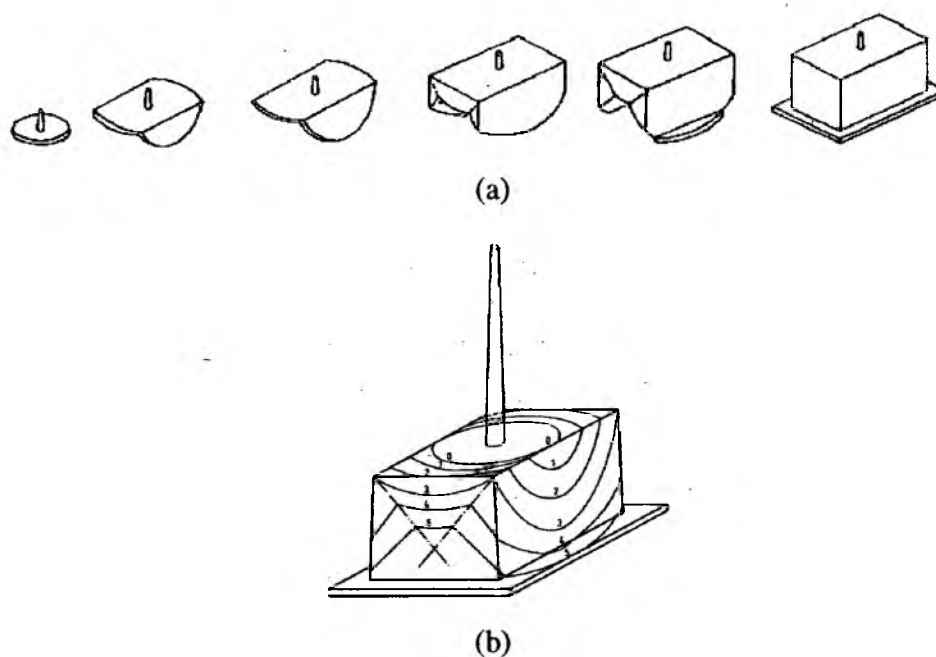


Figura 24 – Comparação entre uma injeção progressiva (a), e a representação do avanço da frente de fluxo pelo método da imagem de enchimento (b) [11].

Correções tais como alterações em regiões específicas da peça ou mudança do posicionamento e do número de pontos de injeção, são ainda facilmente executáveis nesta fase, sem que isso incorra em grandes custos. Por outro lado, se forem necessárias alterações após o molde estar pronto, estas poderão ser extremamente dispendiosas [1, 11, 32].

A localização de aspectos tais como linhas de solda e bolsas de ar fica bastante clara. No caso de serem detectados tais defeitos, pode-se verificar se é possível eliminá-los através da variação da posição, do tipo e do número de pontos de injeção ou por meio da variação da posição de componentes do molde ou das espessuras de paredes ou ainda pela inserção de meios que facilitem ou dificultem o escoamento [1, 12]. Além disso, este é um método de simulação extremamente barato, uma vez que não necessita da utilização de computadores, sendo realizável apenas com régua e compasso.

O projetista deve ter em mente questões como:

- pressão necessária para que a máquina injetora possa preencher a cavidade;
- número de pontos de injeção;
- preenchimento homogêneo da cavidade em moldes com múltiplos pontos de injeção;
- posicionamento dos pontos de injeção e dimensionamento dos canais de alimentação para que o preenchimento seja simultâneo em moldes com múltiplas cavidades;
- posicionamento dos pontos de injeção para que as linhas de solda não fiquem em áreas críticas;
- poucas e curtas linhas de solda, sempre que possível;
- inclusão de escape de gases;
- solicitação térmica e mecânica uniforme e aceitável da massa fundida;
- possibilidades de contração da peça.

O método da imagem de enchimento tem sido usado, na prática, há vários anos, como auxílio para responder questões relativas aos aspectos descritos anteriormente, sendo utilizado pela primeira vez em 1979 [1, 11, 32]. Após o desenvolvimento dos princípios básicos em uma universidade alemã, o método foi aplicado na indústria, e devido à necessidade de redução do tempo e da realização de tarefas complexas, iniciou-se o seu aperfeiçoamento. Procedimentos

como planificação da peça e simplificação de certas geometrias, para facilitar o desenvolvimento do projeto, fazem parte da evolução da metodologia. A soma destas possibilidades faz com que o método da imagem de enchimento seja, na era dos computadores, um importante instrumento para a solução de questões reológicas [1].

3.2 – Sistemas CAE

Em linhas gerais, e no contexto da área de moldes, por sistemas CAE, entende-se programas computacionais (*softwares*), que objetivam dar apoio às atividades relacionadas à fase de concepção, dentro do processo de desenvolvimento de um molde, através da simulação de problemas de engenharia, principalmente, mediante a realização de cálculos matemáticos, a partir de métodos numéricos de resolução, como o FEM - *Finite Element Method* (Método dos Elementos Finitos) [34].

Quando aplicados ao processo de moldagem por injeção de termoplásticos, esses sistemas são utilizados, por exemplo, na simulação do escoamento do polímero dentro da cavidade do molde, fornecendo parâmetros que permitem avaliar (visualizar) a forma como se processa o preenchimento da cavidade e a previsão de problemas na peça moldada [12].

A primeira contribuição experimental importante, no desenvolvimento dos *softwares* CAE, foi feita no início dos anos cinquenta por Spencer e Gilmore, que estudaram visualmente o enchimento de um molde e deduziram uma equação empírica para a determinação do tempo de preenchimento [17]. No entanto, só a partir do início dos anos 70 foram produzidas contribuições significativas na simulação do processo, resultando nos primeiros modelos de simulação de enchimento, os quais consideravam o material como newtoniano e o fluxo isotérmico [12, 17].

Também foram desenvolvidos modelos analíticos para a simulação do escoamento de materiais plásticos, que consideravam os materiais como não-newtonianos, mas o fluxo como isotérmico, pois a consideração do fluxo como não-isotérmico implicaria na utilização de métodos numéricos [17, 35, 36].

Barrie [17] apresentou um trabalho no qual procurava compensar o fato de utilizar a hipótese de um escoamento isotérmico, prevendo a formação de uma camada solidificada junto à parede do molde. Desta forma, o escoamento ocorreria em um canal progressivamente mais estreito (de menor espessura) que aquele apresentado no molde, e assim os valores de queda de pressão apresentados aproximavam-se mais daqueles encontrados na prática [17].

Existem também modelos com a capacidade de prever o avanço da frente do fundido (ou forma de preenchimento), baseados em parâmetros geométricos. No entanto, tais modelos não fornecem bons resultados em peças que apresentam variações muito bruscas de espessura [1, 17].

Devido ao grande crescimento do consumo de produtos de plástico e da exigência dos consumidores, em relação à qualidade destes produtos, a utilização dos sistemas CAE ganhou um grande impulso, a nível mundial, a partir do final dos anos 70 [1].

3.2.1 – Sistemas CAE *High End*

Os sistemas CAE são geralmente compostos por módulos, que permitem a simulação de várias etapas do processo de moldagem por injeção (tais como preenchimento, recalque, contração e empenamento), além de possibilitarem também a análise do sistema de arrefecimento e do comportamento mecânico dos componentes injetados [12].

Tabela 1 – Alguns programas de simulação disponíveis no mercado mundial [1].

Programa	Fornecedor	Análise Reológica	Análise Térmica	Análise de Tensões	Outros Módulos
C-Mold	CCMP	C-Flow C-Pack	C-Cool	C-Mold Residual Stress	Warpage Fiber orientation
Strim 100	Cisigraph	Procop 2D-Rheolo 3D-Rheolo	Cooling Analysis	Plastic Struktur Analysis	3D- Modeling
Moldflow	Moldflow PTY.	MF-2D Single laminate(3D) Multi laminate(3D)	MF-Cool	MFStress	MF-Warp MF-Stress MF-Gas MF-Shrink
TMConcept	Platics & Computers	TMC-FA TMCFABest	TMC-MTA		TMC-MTO TMC-CSE

Sua estrutura apresenta-se bem mais complexa que os sistemas CAE Main Stream, e portanto requer para a sua implantação maiores recursos, tanto do ponto de vista econômico (recursos envolvidos na compra de computadores com maior poder de processamento bem como a própria aquisição da(s) cópia(s) do(s) *software*), quanto de treinamento (tempo em que o funcionário que será responsável pela utilização do *software* deverá ser dispensado de suas atividades para que seja procedido seu treinamento), o que para muitas empresas do setor torna-se inviável [4].

Alguns dos principais *softwares* comerciais estão apresentados na tabela 1.

A) Principais Programas/Módulos que Compõe os Sistemas CAE Comerciais

Os sistemas/*softwares* CAE comerciais são compostos por programas ou módulos que, como referido anteriormente, permitem simular aspectos específicos do processo de moldagem por injeção [1, 12, 36].

Assim, de maneira geral, os *softwares* de simulação e análise do processo de preenchimento de moldes de injeção são compostos pelos seguintes módulos:

A.1) Módulo de *Flow* ou Análise de Fluxo*

O processo de enchimento de uma peça de plástico, devido às suas características, pode ser dividido em três fases, as quais são descritas abaixo [12]:

- a - Fase de preenchimento;
- b - Fase de pressurização ou recalque;
- c - Fase de compensação.

De forma a analisar ou prever como se processam as três fases, durante o preenchimento do molde, utiliza-se o módulo de *flow* ou análise de fluxo dos sistemas/*softwares* CAE, os quais fornecem parâmetros que permitem uma avaliação prévia do que ocorre dentro da cavidade do molde, durante o seu preenchimento [1, 12]. Assim, parâmetros obtidos nas análises de fluxo tais como pressão de injeção, forma de preenchimento do molde/cavidade, linhas de solda e ar aprisionado, tensões e temperaturas, podem ser utilizados na avaliação das características da peça acabada[1].

* Uma descrição mais detalhada das etapas envolvidas no uso de um sistema CAE pode ser obtida em [1, 12].

A.2) Módulo *Cool* ou de Análise do Sistema de Refrigeração dos Moldes de Injeção*

Os moldes de injeção funcionam basicamente como trocadores de calor, extraindo-o do material à medida que este entra na cavidade, até o momento em que o molde abre e a peça, já solidificada, é extraída [12].

Para auxiliar na extração do calor são introduzidos, no molde, canais pelos quais circulam água ou outros fluidos tipicamente utilizados em moldes de injeção. Através da circulação destes fluidos, a retirada de calor ocorre a uma taxa mais elevada, permitindo que sejam atingidos tempos de ciclo menores [8, 11-14].

O módulo *cool* ou de análise do sistema de refrigeração, por sua vez, considera os parâmetros referentes ao escoamento do fluido (água, glicol, etc.) dentro dos canais de refrigeração, permitindo assim que o especialista em CAE possa avaliar o desempenho e a eficiência do sistema de refrigeração do molde, na retirada de calor da peça [1, 12].

Também é permitida ao especialista a utilização dos resultados da análise de refrigeração como condição de contorno para a análise de fluxo. Desta forma, pode-se avaliar os efeitos do sistema de refrigeração sobre o escoamento do plástico dentro da cavidade do molde [12].

A.3) Módulo *Warpage* ou de Análise de Empenamento

À medida que uma peça plástica resfria, ocorre uma redução do seu volume específico, como pode ser visto através das curvas P-V-T, mostradas na figura 25. Isso resulta, por sua vez, em uma redução das dimensões da peça acabada em relação às dimensões da cavidade [8, 11, 12].

* Maiores detalhes sobre a análise do sistema de refrigeração de moldes de injeção podem ser encontradas em [37].

Caso o processo de contração ocorra uniformemente, em todas as direções, a peça apenas ficaria levemente menor após a estabilização das suas dimensões [10, 32]. No entanto, na maioria dos casos, a contração ocorre de forma desigual nas três direções, o que pode levar a tensões internas e, em casos extremos, à deformação da peça após a sua extração [8, 11, 12].

Com o objetivo de avaliar este fenômeno, o projetista do molde pode fazer uso do módulo de análise de empenamento. Desta forma, ele pode analisar a extensão e as fontes causadoras de deformação da peça, podendo assim adotar ações corretivas para minimizar ou até mesmo eliminar os efeitos do empenamento [12]. A tabela 1 mostra os principais *softwares* comerciais, que possuem um módulo de análise de empenamento.

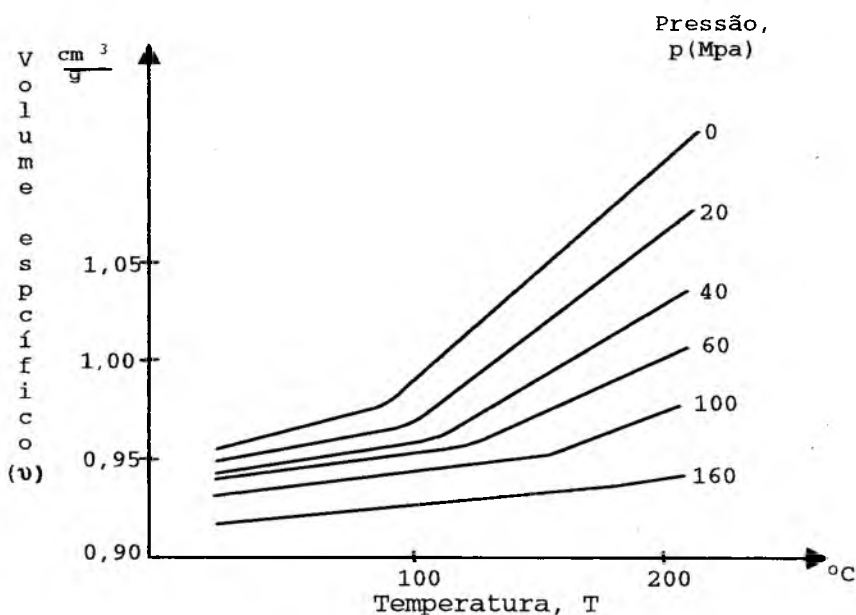


Figura 25 – Curvas de variação do volume específico, características de polímeros amorfos [12].

A.4) Outros Módulos Existentes em Sistemas/*Softwares* CAE Comerciais

Os itens apresentados anteriormente descrevem os principais módulos existentes em sistemas CAE na atualidade. Contudo, existem outros módulos mais recentes [4], e portanto

menos conhecidos, os quais ainda são pouco utilizados. Módulos para análise estrutural, *shrinkage*, injeção assistida a gás, injeção de termofixos e materiais reforçados com fibras, estão surgindo de forma a suprir a carência de ferramentas para análises e simulações computacionais em suas respectivas áreas.

3.2.2 – Sistemas CAE *Main Stream*

Mais recentemente, têm sido disponibilizadas versões mais simples e menos dispendiosas dos sistemas CAE, apresentando-se como uma alternativa ao problema da simulação do escoamento de polímeros em cavidades de moldes de injeção. Apesar de fornecerem resultados menos precisos que as versões mais complexas e completas (Sistemas CAE High End), estes *softwares* permitem, **em alguns casos**, ao corpo técnico das empresas do setor de moldes, uma avaliação mais precisa que os métodos tradicionais mais simples (tentativa e erro, experiência do corpo técnico, método da imagem de enchimento), além de necessitarem de um investimento inicial substancialmente inferior, em termos de conhecimento do usuário e capital. São exemplos desses softwares o Moldflow Plastic Adviser (MPA) da Moldflow Pty. e o C-Mold 3D Quickfill da AcTechnology* [38, 39].

Parâmetros como o avanço da frente de fluxo, distribuição de pressões, temperaturas e tempos de resfriamento podem ser analisados para a cavidade em questão, possibilitando que sejam adotadas medidas que previnam o aparecimento, na peça, de algum defeito proveniente do fluxo inadequado do material [38].

Na figura 26 pode ser observado que os resultados obtidos em uma simulação, utilizando-se o *software* C-Mold 3D Quickfill, apresentam uma boa correlação quanto à previsão da forma

* Maiores informações sobre os softwares podem ser encontradas em [38, 39].

como a cavidade é preenchida, o que também pode ser visto na figura 27 onde é apresentada uma comparação entre os resultados fornecidos pelo mesmo *software* e o C-Mold, ambos da empresa AC Technology.

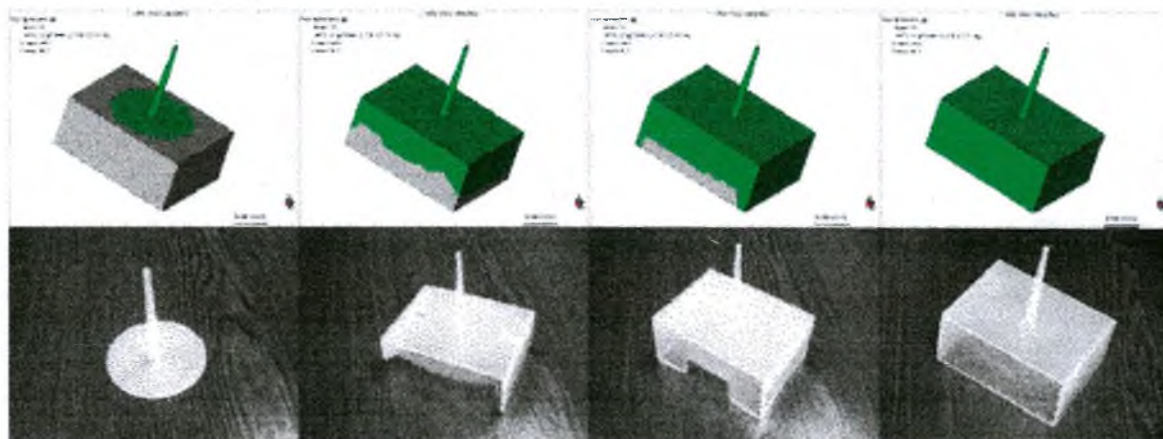


Figura 26 – Comparação entre uma simulação do preenchimento realizado por um *software mainstream* e o resultado obtido em uma injeção progressiva [38].

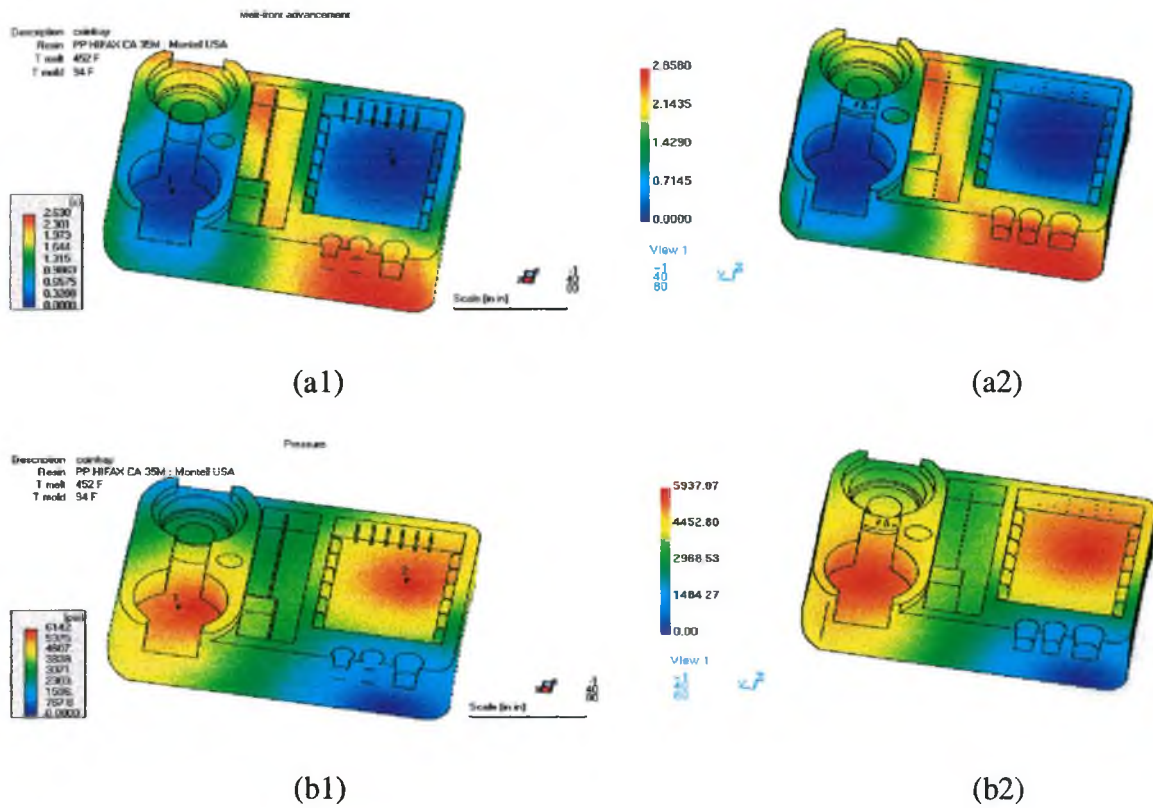


Figura 27 – Comparação entre os parâmetros obtidos por um *software* CAE – C-Mold 3D *Quickfill – main stream* (figuras a1 – avanço da frente de fluxo e b1 – distribuição de pressões) com os parâmetros obtidos na simulação em um *software high end* (figuras a2 – avanço da frente de fluxo e b2 – distribuição de pressões) [38].

3.2.3 Atual Estágio de Evolução dos Sistemas CAE

Geralmente os processos comerciais de simulação baseiam-se na resolução das equações governativas ou de balanço (conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia), associadas a um conjunto de equações de estado, ou equações constitutivas, desde que se considere que o material apresente um comportamento não-newtoniano e um escoamento não isotérmico [1, 16, 17, 33-36].

No entanto, no escoamento de polímeros fundidos, este conjunto de equações necessita, para ser resolvido, de uma série de simplificações [16, 17, 33-36].

As simplificações mais comuns são [1, 16, 17]:

- a) O escoamento é laminar.
- b) O fundido é incompressível.
- c) O escoamento é quasi-estacionário, ou seja, os termos transientes, na equação da conservação da massa e da quantidade de movimento são desprezáveis.
- d) As forças de campo e de inércia são desprezáveis, em comparação com as forças viscosas. Contudo, o efeito das forças de inércia nem sempre pode ser desprezado, principalmente nos pontos de injeção com geometrias fortemente convergentes e vazões elevadas.
- e) O fluxo de calor ocorre na direção do escoamento apenas por convecção e na direção perpendicular ao escoamento por condução. Na camada solidificada só ocorre fluxo de calor por condução na direção da espessura.

Para a resolução das equações de equilíbrio, são utilizadas predominantemente duas aproximações [17]:

- i - a formulação de Hele - Shaw, que reduz o problema a uma solução bidimensional e
- ii - o método do caminho de fluxo associado (*coupled flow path*), no qual a cavidade é representada por uma sucessão de unidades geométricas simples, reduzindo-se a simulação à solução de um conjunto de problemas unidimensionais.

No preenchimento das cavidades é geralmente aceita a divisão do escoamento em duas regiões, sendo uma de fluxo totalmente desenvolvido e predominantemente de cisalhamento, e a frente de onda, com um fluxo em fonte ou em chafariz (*fountain flow*) de características puramente extensionais.

A frente de fluxo do fundido pode ser simulada quer por métodos analíticos aproximados, quer por métodos numéricos detalhados [17]. No entanto, a complexidade matemática, associada ao fluxo em fonte, ao tipo de informação sobre o material que é requerida (caracterização da viscosidade extensional) e ao tempo de cálculo associado, faz com que, na maioria dos estudos, ele não seja considerado, ou o seja apenas de uma forma simplificada [16, 17, 33]. A simplificação habitual considera que a frente de fluxo é plana, mas que o campo de temperaturas é constante [17, 33].

No contato com as paredes frias do molde, o fundido resfria-se e solidifica, criando-se um sistema bifásico de fronteira móvel entre as fases [17, 33]. Um dos problemas decorrentes é a determinação da posição dessa fronteira, havendo autores que consideram uma temperatura de “*no flow*” [33] e outros, que consideram como camada solidificada a região onde a velocidade é menor que um valor especificado [40]. No entanto, seja qual for o critério utilizado, é difícil quantificar, com precisão, qual o valor da temperatura ou da velocidade a ser utilizado. Além disso, a localização desta fronteira depende também da forma como se trata a transferência de calor do fundido para o molde, havendo autores que consideram que na superfície da cavidade a temperatura é uniforme e igual à temperatura do molde, enquanto outros consideram que essa transferência de calor depende do material do molde e da distância dos canais de arrefecimento à superfície da cavidade [17].

A simulação do preenchimento de moldes, com termoplásticos semi-cristalinos, apresenta uma complicação adicional, que é a cristalização sob tensão e anisotérmica do material [16, 41-43]. Assim, um modelo completo deveria incorporar a cinética de cristalização [16], mas a complexidade matemática, o tempo de cálculo e a relativamente curta duração do enchimento faz com que não seja considerada na maioria dos estudos [16, 17, 33, 44].

A) Métodos Numéricos

Os métodos numéricos mais utilizados, para a resolução das equações de equilíbrio, são o método das diferenças finitas (FDM), o método dos elementos finitos (FEM) e um método misto, resultante da conjugação dos dois [17, 33]. Outros métodos como o dos elementos de fronteira também têm sido utilizados [17].

O método das diferenças finitas (FDM) foi desenvolvido nos anos trinta para cálculos manuais, tendo o seu uso sido rapidamente incrementado com o advento dos computadores [17, 33].

As principais vantagens deste método são a simplicidade matemática, a facilidade de formulação e de programação, tempo de cálculo e necessidade de memória relativamente pequenos, comparados com o método dos elementos finitos (FEM). A maior dificuldade, na utilização do FDM, decorre da irregularidade da geometria das fronteiras dos domínios onde as equações diferenciais, com derivadas parciais, terão de ser resolvidas.

O método dos elementos finitos, desenvolvido nos anos sessenta, apresenta como principal vantagem a flexibilidade em se adaptar à geometria [17, 33]. Podem ser tratadas adequadamente geometrias de forma complexa e refinar a malha em zonas onde se pretenda concentrar o esforço de análise [1].

A precisão dos resultados obtidos, quer com o FDM, quer com o FEM, é semelhante e não deve ser usada como critério de seleção a favor, ou contra qualquer um deles [17], dependendo apenas do tipo e do tamanho do elemento utilizado [1].

3.3 Vantagens da Utilização de Sistemas CAE

A utilização de sistemas CAE, para a análise do processo de injeção, pode levar, em muitos casos, à redução de custos e, principalmente, do tempo de fabricação de um molde [1, 4].

Pode-se também reduzir o número de retrabalhos sofridos pelos moldes, bem como a extensão desses retrabalhos, até que os mesmos sejam colocados em produção [1, 2].

Outro grande auxílio obtido com a utilização de *softwares* de análise de injeção, é na determinação das condições de moldagem para os moldes [1, 4]. A utilização de análises de fluxo, para auxiliar na definição das condições de processamento ou moldagem, pode tornar-se uma importante tendência, na visão de fornecedores/desenvolvedores de *softwares* e especialistas industriais [4].

Em algumas situações, tem sido obtidas também reduções no número de peças refugadas, consumo de material em peças e canais e no tempo total de ciclo para os moldes.

Em síntese, as principais vantagens, atribuídas pelos usuários dos sistemas CAE, são as seguintes [1, 4]:

- 1 - Economia de tempo e dinheiro no desenvolvimento da ferramenta (molde);
- 2 - Melhoria da qualidade do produto;
- 3 - Redução no tempo para que um produto comece a ser produzido adequadamente (números de ensaios dos moldes).

3.4 Limitações dos Sistemas CAE

Alguns trabalhos, como o que é apresentado na figura 28, apontam que, para peças com formas complexas, tolerâncias apertadas, paredes muito finas ou muito espessas, moldes com

múltiplas cavidades e materiais cristalinos, a precisão dos resultados de análise de injeção situa-se dentro de uma faixa questionável, ocorrendo os resultados de menor precisão, dentre aqueles obtidos nas análises de peças com materiais reforçados com fibra [4].

Os modelos matemáticos utilizados para representar o escoamento do material plástico dentro de um molde não consideram alguns efeitos, os quais podem ser modelados apenas com a utilização de elementos tridimensionais [6], pois atualmente os *softwares* de simulação ainda não utilizam tais elementos [1, 4, 17, 33].

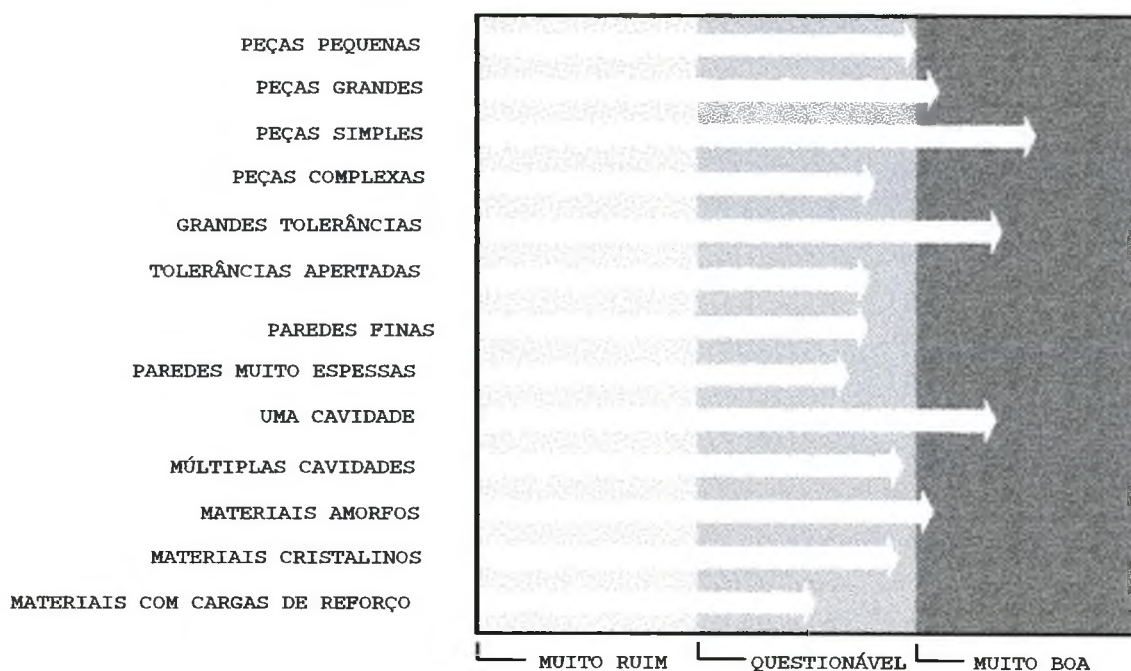


Figura 28 – Precisão apontada pelos usuários de sistemas CAE, para os resultados das análises de fluxo [4].

Em casos de peças com espessuras extremamente pequenas, os programas podem fornecer resultados incorretos, principalmente para os valores de pressão de injeção, os quais podem ser superestimados [45, 46].

Na figura 29 são apresentados os níveis de satisfação dos usuários em relação à precisão dos resultados, em função do tipo de análise ou aplicativo do CAE utilizado [4].

As simulações de preenchimento alcançam os maiores níveis de precisão, bem como as previsões de localização de linhas de solda e ar aprisionado, enquanto os demais aplicativos apresentam índices menores.

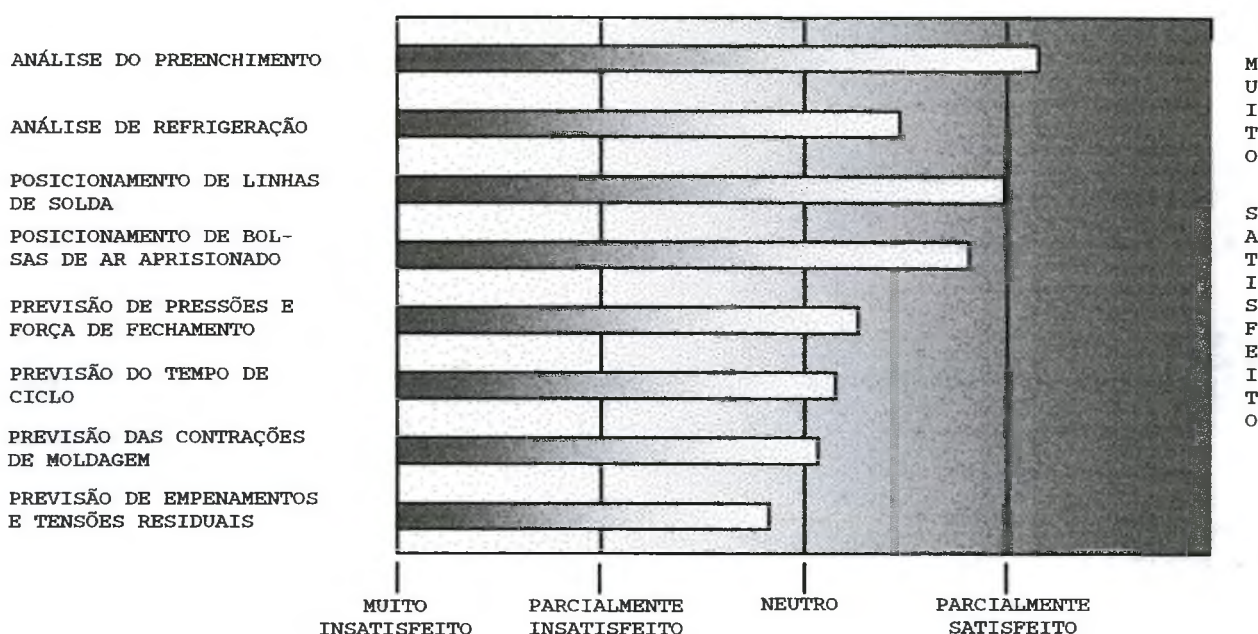


Figura 29 – Níveis de satisfação, apontados pelos usuários de sistemas CAE, relativos aos resultados fornecidos pelas análises [4].

A melhoria dos bancos de dados de materiais merece um tratamento especial, pois é freqüentemente mencionada como sendo uma das principais fontes de imprecisão dos resultados das análises de fluxo. Os fornecedores/desenvolvedores de *softwares* estão constantemente atualizando os seus bancos de dados através da inclusão de novos materiais, desenvolvidos pelos fornecedores de resinas. A velocidade com que os fornecedores de *softwares* atualizam os seus bancos de dados, contudo, não atende as expectativas dos usuários dos sistemas, nem aos

fornecedores de resinas. Em muitas situações é fundamental a utilização do grade correto para a análise de fluxo, principalmente quando o objetivo for a determinação de informações, como as tensões residuais, causadas pelo fluxo do material, as quais à peça fica submetida [4].

Outra grande limitação dos sistemas CAE comerciais é a não-utilização de modelos geométricos sólidos (malha com elementos tridimensionais) para as análises de injeção [4, 17, 33]. No entanto, a utilização de modelos geométricos sólidos em análises de fluxo levaria a um aumento substancial no tempo de processamento em computador, bem como um aumento na complexidade matemática envolvida no desenvolvimento de tais sistemas [4].

4. CONSIDERAÇÕES QUANTO AO USO DE TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE FLUXO EM CAVIDADES DE MOLDES DE INJEÇÃO

4.1 Considerações Preliminares Sobre a Sistemática

Os sistemas CAE têm como objetivo principal, quando aplicados ao projeto e fabricação de moldes para injeção, servir como uma ferramenta de apoio que permita uma avaliação criteriosa da peça e do molde [1].

A análise da peça compreende a avaliação dos aspectos relativos ao fluxo do material dentro da cavidade do molde, tais como o próprio preenchimento (módulo de análise de fluxo), a análise do empenamento da peça (módulo de *warpage*), a análise do processo de contração da peça (módulo de *shrinkage*), bem como os aspectos relativos à avaliação mecânica do produto moldado, ou seja, seu comportamento quando sujeito a esforços (módulo de *stress*).

Já a análise do molde compreende a avaliação do sistema de arrefecimento ou resfriamento do molde (módulo de *cool*), realizado pelos canais de resfriamento, bem como a análise mecânica dos moldes, onde são dimensionados seus diversos componentes, para que os mesmos suportem os esforços decorrentes do processo de preenchimento da cavidade, sendo esta análise mecânica realizada por *softwares* específicos tais como **Algor, Ansys e Nastran**.

Contudo, como mencionado anteriormente, no Capítulo 1, existem, entre os especialistas do corpo técnico das empresas de moldes, certas dúvidas quanto aos casos onde existe a real necessidade de aplicar ou não, os recursos de um sistema CAE *high end* a um molde de injeção. Associado a este fato está ainda a existência de diversos recursos, os quais poderiam ser

utilizados para a análise do escoamento do polímero dentro da cavidade de um molde. Esses recursos podem compreender desde a utilização de técnicas mais simples como a da imagem de enchimento (recurso *low end*), passando pela aplicação de recursos mais elaborados como os *softwares* 3D Quickfill e MPA (recurso *main stream*) indo até a aplicação dos sistemas CAE mais completos (recurso *high end*). Porém, a decisão do recurso a ser aplicado depende fundamentalmente das características de cada molde, bem como do conhecimento da técnica a ser aplicada, ou seja, suas vantagens e limitações.

Contudo, torna-se difícil, como já exposto anteriormente no Capítulo 1, para o corpo técnico das empresas de moldes, detectar em quais casos seria realmente necessária a aplicação dos recursos de um sistema CAE *high end*.

O estudo realizado no anexo mostra que, mesmo para peças muito simples, podem ser encontradas dificuldades no entendimento do comportamento do polímero, durante o preenchimento de uma cavidade, principalmente em aspectos tais como os que foram objeto do estudo apresentado, o que pode gerar dúvidas quanto à decisão sobre a necessidade de aplicar ou não uma análise de fluxo para a avaliação de um molde.

Desta forma, visto ser o recurso dos sistemas CAE mais utilizados, propõe-se neste capítulo a elaboração de uma sistemática de auxílio ao corpo técnico das empresas de moldes, com o objetivo de sistematizar a tomada de decisões sobre os casos onde a aplicação ou não de uma análise de fluxo (com um sistema CAE *high end*) é recomendável ou até mesmo necessária, indicando também o tipo de recurso que poderia ser empregado para avaliação da qualidade de uma peça injetada.

Para tornar mais fácil sua aplicação, a sistemática está dividida em dois passos principais. O primeiro passo da aplicação da sistemática diz respeito a uma análise preliminar e a um levantamento dos requisitos e características impostas a peça.

O segundo passo da sistemática trata da aplicação de um fluxograma sistematizador aos fatores mencionados anteriormente, que permitirá de forma mais simples e objetiva, a visualização e decisão de quando aplicar ou não uma análise de fluxo

Contudo, primeiramente devem ser definidos os critérios ou diretrizes para a tomada de decisão, bem como a sua forma de aplicação, além dos aspectos aos quais serão aplicados as diretrizes mencionadas, sendo esta definição realizada a seguir.

4.2 Definição dos Critérios e Aspectos Utilizados na Sistemática

4.2.1 Definição dos Aspectos Relacionados ao Fluxo do Material (Problemas de Moldagem) para os quais Serão Determinadas as Necessidades ou não do Emprego de uma Análise de Fluxo

Como referido anteriormente, no capítulo 3, através de uma análise de fluxo pode-se, em um sistema CAE *high end*, avaliar certos aspectos do preenchimento de um molde, os quais permitem uma análise da qualidade da peça após a sua moldagem.

Esses aspectos, entre outros, compreendem a avaliação da formação das linhas de solda, das tensões oriundas do fluxo do material, da formação de bolsas de ar e da tendência a empenamentos da peça após a sua extração da cavidade.

A divisão da análise de fluxo em aspectos tem como objetivo facilitar a aplicação da sistemática, tornando a tomada de decisão, sobre a aplicação ou não de uma análise de fluxo, uma tarefa mais simples.

Deve-se ressaltar, todavia, que o número de aspectos pertencentes à análise de fluxo apresenta-se maior. Porém, nesta primeira abordagem dividiu-se a referida análise nos aspectos

listados abaixo, os quais são também os principais problemas que podem ser identificados através de uma análise de fluxo:

- Avaliação das linhas de solda;
- Avaliação das tensões residuais de fluxo;
- Avaliação de bolsas de ar (aprisionamento de gases);
- Avaliação da tendência a empenamentos.

Aos aspectos mencionados serão aplicados os critérios a serem definidos posteriormente, com o objetivo de tomar a decisão de aplicar ou não uma análise de fluxo, de um sistema CAE *high end*, podendo-se também determinar um recurso alternativo a ser empregado (sistema CAE *main stream*, imagem do enchimento, etc.) para a visualização do escoamento do polímero dentro da cavidade, caso decida-se por não empregar uma análise de fluxo de um sistema CAE *high end*.

A) Avaliação de Linhas de Solda

As linhas de solda, como descrito no capítulo 2, são formadas pelo encontro de duas frentes de fluxo do material plástico durante o preenchimento do molde, podendo representar um problema para a peça, tanto do ponto de vista estético quanto estrutural [8, 11, 12].

Pode-se, com o emprego das simulações (em computador) do preenchimento de moldes, avaliar certas características (temperatura e pressão do polímero no plano de encontro das frentes de fluxo) de formação das linhas de solda, bem como o seu posicionamento [11, 12].

Contudo, o emprego de tais tecnologias mostra-se mais eficiente em casos onde o projetista não consegue prever o surgimento das linhas de solda apenas com sua experiência,

auxiliado por técnicas mais simples para a análise do fluxo do material dentro da cavidade do molde [4, 8].

Assim, torna-se recomendável a realização de uma simulação em computador do enchimento da cavidade, como forma mais segura de determinação da posição e da qualidade das linhas de solda formadas em peças que apresentem geometrias complexas e com grandes variações de espessura de parede, em materiais com viscosidade mais elevada, ou em peças que não possam ter marcas superficiais ou que ainda podem ter sua resistência mecânica prejudicada pela formação de uma linha de solda.

B) Avaliação das Tensões Residuais Devido ao Escoamento do Polímero

Tensões internas, resultantes da orientação molecular devido ao fluxo do material, podem ocasionar sérios problemas em peças injetadas, tais como empenamentos e/ou redução de sua vida útil [10, 12, 44].

Pode-se, contudo, com o auxílio de simulações do preenchimento de moldes, através da realização de uma análise de fluxo (usando um sistema CAE *high end*), avaliar o grau e a distribuição dessas tensões, permitindo então que o projetista tome medidas corretivas que visem a solução desse problema [12, 44].

No entanto, devem ser observadas algumas considerações relativas ao material (ex.: presença ou não de cargas, índice de fluidez do material, etc.) e à geometria da peça a ser injetada (espessura de parede e variações de espessura ao longo da peça), quando pretende-se realizar uma simulação do seu preenchimento.

Como descrito no capítulo 3, muitos materiais plásticos não constam no banco de dados de materiais dos *softwares* de simulação. Porém, quando o objetivo de uma análise de fluxo é o estudo das tensões, oriundas do escoamento do polímero, torna-se necessária a utilização das

características reológicas do polímero que será utilizado para a moldagem da peça [6]. Portanto, nos casos onde essa condição não é satisfeita, a realização de uma simulação do preenchimento pode levar a resultados imprecisos (valores de tensões obtidos na simulação diferentes dos obtidos na peça moldada).

Uma outra situação, que pode ser mencionada, é quanto às características geométricas da peça a ser avaliada. Sabe-se, segundo D'Ávila [16], Brito [17] e Kennedy [33], que os resultados dos *softwares* de simulação são mais confiáveis para peças que apresentam uma baixa relação espessura/comprimento (relação espessura/comprimento $\ll 1$). Sendo assim, as análises (simulações) de peças com paredes espessas, comuns em alguns setores da indústria (ex.: setor de tubos e conexões para canalizações de alta pressão), podem apresentar resultados questionáveis (ex.: resultados de tensões cisalhantes residuais, temperaturas, etc.).

Portanto, tais fatores devem ser levados em consideração quando se tem como objetivo a realização de uma análise do preenchimento da cavidade, para a avaliação de tensões residuais em peças injetadas.

C) Avaliação do Aprisionamento de Gases (Bolsas de Ar)

O aprisionamento de gases, dentro de uma cavidade, ocorre quando o material plástico, ao preenchê-la, empurra o ar aí contido para regiões onde não há a possibilidade de escape dos mesmos [10, 11].

A compressão desses gases provoca o seu aquecimento, podendo ocasionar manchas ou até mesmo queimas no produto moldado [8].

Dependendo da geometria do produto, geralmente em casos de peças complexas, o projetista não consegue prever a localização das bolsas de ar, tornando-se necessário, nessas

situações, um exame mais detalhado do enchimento da cavidade, com o auxílio de uma análise de fluxo realizada em um sistema CAE.

D) Avaliação da Possibilidade de Ocorrência de Empenamentos

Como exposto no capítulo 2, as deformações ocorridas em peças plásticas, após sua moldagem, podem ser causadas por fatores como contração térmica assimétrica, contração volumétrica não-uniforme, comportamento anisotrópico do material devido à orientação induzida pelo fluxo e a efeitos térmicos devido à geometria da peça [12, 44], sendo possível contudo, minimizar seus efeitos a partir da aplicação de técnicas específicas de projeto do produto e do molde [8].

A experiência do projetista, aliada a técnicas de projeto, permite, para o caso de peças mais simples, a produção de moldados com a ausência de empenamentos [8, 11]. Contudo, à medida que cresce a complexidade das peças, e conseqüentemente da cavidade, ou no caso do uso de materiais instáveis dimensionalmente, torna-se mais difícil controlar, apenas com o emprego de técnicas mais simplificadas (regras de projeto de produtos), a ocorrência de problemas tais como os empenamentos.

Nesses casos, torna-se recomendável a simulação do preenchimento da cavidade, utilizando-se os recursos das análises de fluxo dos sistemas CAE, de forma a analisar a tendência a empenamentos das peças injetadas, permitindo, então, adotar medidas preventivas que possam levar a sua correção.

4.2.2 Definição e Forma de Aplicação dos Critérios de Tomada de Decisão

Dentro do contexto deste trabalho, definem-se como critérios de tomada de decisão, fatores que indicam se é ou não recomendável a realização de uma análise de fluxo, em um sistema CAE *high end*, para a avaliação do escoamento do polímero em um molde de injeção.

Para o presente trabalho foram definidos 5 critérios, os quais estão apresentados abaixo:

- Características geométricas;
- Características funcionais da peça;
- Material plástico utilizado;
- Número de pontos de injeção utilizados na peça;
- Separação da frente de fluxo.

A) Características Geométricas

Ao critério geométrico atribuem-se todas as características relacionadas à complexidade de formas, dimensões, espessuras de parede e variações de espessura existentes na peça a ser moldada.

Durante o projeto da cavidade de um molde, um dos principais objetivos é assegurar um preenchimento uniforme, sem a formação de linhas de solda, regiões com aprisionamento de gases, tensões residuais ou empenamentos [12, 44]. Contudo, à medida em que aumenta a complexidade geométrica de uma peça, torna-se cada vez mais difícil a previsão da ocorrência de tais problemas.

Nos casos em que, com sua experiência e com o auxílio de técnicas mais simples, não for possível para o corpo técnico das empresas prever o surgimento dos defeitos mencionados

anteriormente, em virtude da complexidade geométrica do produto, torna-se indispensável a realização de simulações em computador do escoamento do polímero, como o recurso mais apropriado para a previsão dos problemas apresentados.

A complexidade geométrica depende, contudo, do tipo de aspecto que está sendo analisado, pois as características geométricas que induzem à formação de um determinado problema não induzem necessariamente a formação de outros.

Assim, estão listados abaixo os aspectos mencionados anteriormente, associados às características geométricas que podem induzir à formação dos mesmos e que devem, portanto, ser observados.

Linhas de solda – geometrias tubulares, que apresentam furos, nervuras, grandes variações de espessura ou um grande número de variações na direção do caminho de fluxo.

Tensões residuais – peças finas e que apresentam grande variação na direção do caminho de fluxo.

Bolsas de ar – peças que apresentam nervuras e formas intrincadas.

Empenamentos – peças finas, onde o comprimento da peça é muito maior que sua espessura, peças que não apresentam nervuras de reforço e que possuem variações na direção do caminho de fluxo.

B) Características Funcionais da Peça

Por características funcionais, entendem-se as características que uma determinada peça deve assumir isoladamente, ou quando a mesma faz parte de um conjunto.

Assim, citam-se peças com características técnicas, as que devem resistir a esforços mecânicos além de não apresentar empenamentos; peças com características estéticas, cujo

aspecto superficial deve apresentar-se ausente de defeitos, e peças que não apresentam requisitos essenciais de estética ou resistência.

Pode-se dizer, de uma maneira geral, que peças com características técnicas e estéticas deveriam ser submetidas a uma análise de fluxo em um sistema CAE para a avaliação de defeitos de moldagem, tais como linhas de solda e tensões de fluxo, os quais podem determinar a redução da vida útil, no primeiro caso, e a impossibilidade de sua utilização no segundo.

Porém, em peças com características comuns, que não possuem requisitos técnicos ou estéticos, pode-se, em alguns casos, como o de peças com geometria muito simples (peças com pouca ou nenhuma variação de espessura, que não possuem nervuras etc), suprimir a realização de uma análise de fluxo, principalmente naquelas situações onde os projetistas possuem experiências anteriores com peças semelhantes.

C) Material Plástico Utilizado

A qualidade de uma peça moldada por injeção pode ser influenciada, em vários de seus aspectos, pelas características do material plástico utilizado, devendo, portanto, ser levada em consideração, quando se avalia a necessidade ou não de se empregar um análise de fluxo a uma determinada peça. Os exemplos que podem ser citados são as características resultantes em uma linha de solda, os níveis de tensões decorrentes do fluxo do material, a possibilidade de ocorrência de queimas nas regiões de formação de bolsas de ar, bem como a possibilidade de empenamento da peça, que são influenciadas pelas propriedades do polímero tais como a presença ou não de cargas de reforço (fibras de vidro, talco, etc.) ou índice de fluidez [47]. Além disso, a possibilidade de ocorrência de empenamentos em peças moldadas também é influenciada pelo índice de contração do material plástico.

Adicionalmente, uma grande dificuldade encontrada na realização de análises de fluxo tem origem no banco de dados de materiais plásticos fornecido pelos desenvolvedores de *softwares*.

Em muitas situações, as características reológicas do material, utilizado para a simulação do preenchimento, apenas se aproximam das características reológicas dos materiais utilizados para a manufatura da peça. Isso implica, conseqüentemente, na ocorrência de diferenças entre os resultados das análises de fluxo e os resultados práticos obtidos com a injeção da peça.

Contudo, em análises mais simplificadas do comportamento do enchimento da cavidade, tais como perfil de preenchimento e distribuição de pressões, pode-se utilizar materiais pertencentes a uma mesma família, os quais possuem características semelhantes [4].

Entretanto, existem situações onde os resultados requeridos exigem uma caracterização exata do comportamento do polímero, como, por exemplo, no cálculo das distribuições de tensões, taxas de cisalhamento e viscosidades. Nesses casos, torna-se indispensável o uso das propriedades corretas dos polímeros utilizados para a fabricação do produto. Caso contrário, os resultados obtidos na simulação podem estar muito distantes do processo real [4].

Desta forma, torna-se necessário avaliar se a realização de uma análise de fluxo é recomendável em função do tipo de resultado requerido e da presença do material no banco de dados.

D) Número de Pontos de Injeção Utilizados na Peça

O número de pontos de injeção, utilizados para o preenchimento de uma peça, determina decisivamente algumas características do produto moldado.

Uma dessas características é a formação de linhas de solda. Como referido no capítulo 2, sempre que for utilizado mais de um ponto de injeção para o preenchimento de um molde, ocorrerá a formação de uma linha de solda na peça injetada.

Nesse sentido, torna-se aconselhável, em certos casos, como será visto mais adiante, na descrição da aplicação do fluxograma sistematizador (apresentado no item 4.3.2), a análise de problemas de moldagem que tenham relação com o número de pontos de injeção da peça (como por exemplo linhas de solda), utilizando os módulos de análise de fluxo dos sistemas CAE.

E) Separação da Frente de Fluxo

A separação da frente de fluxo ocorre quando o material plástico, ao fluir dentro de uma cavidade, encontra obstáculos, sendo forçado a contorná-los.

O resultado disso pode ser o surgimento de alguns problemas de moldagem, tais como linhas de solda e bolsas de ar, entre outros fenômenos, que em algumas situações (como as indicadas no item 4.3.2 da aplicação da sistemática) precisam ser analisados com cuidado, utilizando-se os recursos de análise de fluxo dos sistemas CAE.

4.3 Orientação Passo a Passo para a Aplicação da Sistemática

4.3.1 Primeiro Passo da Sistemática – Análise preliminar e levantamento dos requisitos e características impostos à peça

Como primeiro passo da sistemática, deve-se estabelecer quais são os requisitos impostos à peça, relativos a sua aparência superficial, resistência mecânica ou precisão dimensional.

Deve-se determinar também, neste primeiro passo, além dos requisitos já mencionados, o número de pontos de injeção que serão utilizados na peça (um ou mais de um), suas características geométricas (peça considerada com geometria simples ou complexa pelo corpo técnico da empresa), as características do polímero que será utilizado para a produção da peça (índice de fluidez, índice de contração e presença do material no banco de dados do sistema CAE a ser utilizado), observando-se também se há ou não a ocorrência da separação e posterior união da frente de fluxo do polímero, ao escoar dentro da cavidade.

Tais requisitos e características irão determinar os critérios utilizados para avaliar a necessidade de empregar ou não uma análise de fluxo utilizando um sistema CAE *high end*, ou para indicar o tipo de recurso a ser empregado para a análise da peça, caso decida-se pela não-utilização de um sistema CAE *high end*.

A determinação desses requisitos e características deve ser realizada em uma análise preliminar do desenho do produto (desenho da peça), onde devem estar descritas as principais características que a peça deverá ou não apresentar após sua moldagem.

4.3.2 Segundo Passo da Sistemática – Aplicação e Interpretação dos Fluxogramas Sistematizadores

Com base nos aspectos e critérios definidos anteriormente, desenvolveu-se um fluxograma, onde os aspectos (problemas que podem ocorrer durante a moldagem) são analisados segundo cada critério descrito, servindo de auxílio para o corpo técnico na decisão de utilizar ou não os recursos de análise de fluxo dos sistemas CAE. O fluxograma de auxílio a decisão é apresentado a seguir.

A) Interpretação dos Fluxogramas Sistematizadores

Análise de Fluxo

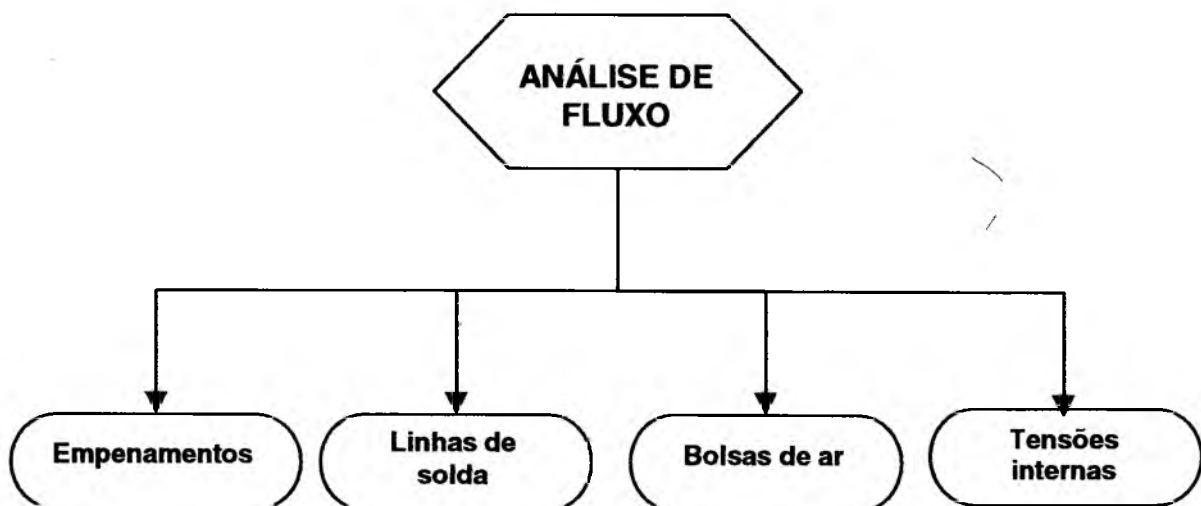


Figura 30 - Fluxograma sistematizador parcial mostrando a divisão da análise de fluxo nos aspectos a serem avaliados.

Como mencionado anteriormente, a sistemática é baseada na decisão de aplicar ou não os recursos de uma análise de fluxo, em um sistema CAE *high end*, para a avaliação dos aspectos ou fenômenos que ocorrem durante o preenchimento do molde.

Desta forma, a figura 30 apresenta o fluxograma parcial, onde a análise de fluxo é subdividida nos quatro aspectos (problemas de moldagem) anteriormente descritos

Como o assunto é complexo, limitou-se, na sistemática, a análise do preenchimento da cavidade, ou seja, da avaliação reológica, dividindo-a em aspectos ou fenômenos que ocorrem durante o preenchimento de um molde, sendo eles:

- Empenamentos;
- Linhas de solda;
- Bolsas de ar;
- Tensões internas.

Empenamentos

A primeira etapa diz respeito à aplicação do critério “característica funcional da peça”, apresentada na figura 31. Definiram-se, então, como características funcionais da peça, as características que a mesma deve apresentar quanto a sua aparência superficial, ou quanto às suas características estruturais e dimensionais.

As características funcionais da peça determinam o conjunto de medidas que deverá ser adotado na determinação do tipo e precisão do recurso (fidelidade de simulação do fenômeno) que será utilizado para a realização de uma análise dos aspectos pertencentes a avaliação reológica.

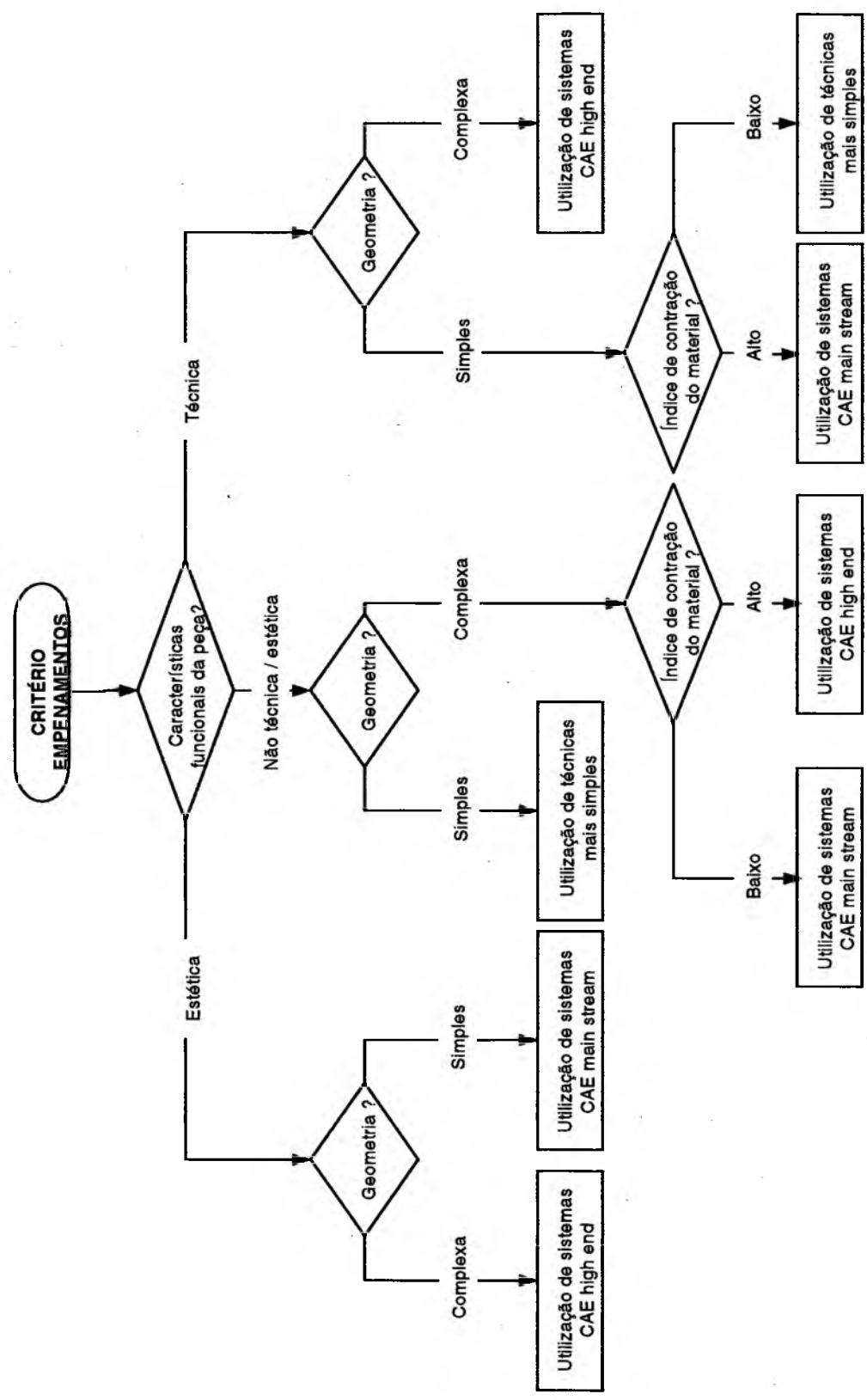


Figura 31 - Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo de uma peça injetada. do empenamento de uma peça injetada.

Como características funcionais de uma peça atribuem-se então:

- característica estética;
- característica técnica;
- peças que não apresentam requisitos técnicos ou estéticos (características não técnica/estética).

Em peças sem requisitos essenciais técnicos ou estéticos (não técnica/estética), deve-se avaliar as características geométricas da mesma (Figura 31). Para peças que tenham geometria simples, como no caso de peças pequenas e sem grandes variações de espessura, poderiam ser aplicadas regras de projeto e técnicas mais simples, como a técnica da imagem de enchimento [1, 11] (com a qual pode-se avaliar o avanço da frente do fundido), visando a prevenção da tendência a empenamentos. A partir da determinação deste parâmetro, podem ser retiradas conclusões sobre a tendência a empenamentos da peça, observando-se a ocorrência de variações bruscas na direção do escoamento do material, ou a existência de regiões onde o empacotamento do material é maior do que nas demais regiões da peça, não sendo necessário, portanto, empregar nestes casos, uma análise de fluxo em sistema CAE *high end*.

Contudo, se a peça possuir uma geometria complexa (peças grandes, com paredes finas e sem reforços), torna-se necessário avaliar as características do material utilizado para a sua fabricação. Caso o material apresente um índice de contração relativamente alto [47], recomenda-se a utilização dos recursos de um sistemas CAE *high end*, para a avaliação dos resultados da simulação que exerçam influência no empenamento da peça moldada.

Em contrapartida, se o material apresentar um índice de contração relativamente baixo [65], o corpo técnico pode, com o emprego de técnicas mais simples, aliadas a sua experiência, contornar o problema de empenamentos em peças injetadas. Em virtude do aumento da complexidade da peça, torna-se difícil a utilização do método da imagem de enchimento, em

virtude do mesmo ser realizado manualmente. Nesses casos pode-se, contudo, utilizar os sistemas CAE *main stream*, tais como os apresentados no capítulo 3. Com o emprego desses sistemas pode ser analisada, mais adequadamente, a tendência a empenamentos de peças com as características mencionadas, a partir da avaliação de parâmetros como o avanço da frente de fluxo, distribuições de pressões e tempos de resfriamento. No entanto, vale a pena ressaltar que tal decisão é dependente da experiência adquirida pelo corpo técnico, e deve ser avaliada com critério pelo mesmo.

Da mesma forma, para uma peça que possua características técnicas, sendo sujeita, durante sua vida útil, a esforços, ou que apresente requisitos com relação a suas tolerâncias dimensionais, deve-se avaliar sua complexidade geométrica. Caso a peça seja complexa (peças grandes e com grandes variações de espessura), é aconselhável a realização de uma análise de preenchimento da cavidade, utilizando um sistema CAE *high end*, para a avaliação dos parâmetros que permitam a previsão de empenamentos. A utilização de sistemas CAE *high end* permitem, para esses casos, a obtenção de parâmetros mais precisos, tais como o avanço da frente do fundido, tempos de resfriamento, influência do sistema de resfriamento sobre o fluxo do material, bem como a possibilidade de controlar o processo de recalque da peça, permitindo portanto um melhor controle sobre tendência a empenamentos das peças.

Considerando agora, que a peça possua um geometria simples (peças pequenas e com transições de espessura suaves) deve-se observar o índice de contração do material utilizado. Caso o material plástico utilizado possua um alto índice de contração seria então recomendável a utilização dos recursos dos sistemas CAE para avaliação da tendência a empenamentos. Nestes casos, todavia, poderiam ser utilizados sistemas CAE *main stream*, tais como os apresentados no capítulo 3. Tendo um custo mais baixo, e não necessitando de um treinamento mais aprofundado, como as versões mais complexas, estes sistemas permitem uma análise mais precisa do comportamento do preenchimento da cavidade, em relação ao método manual [1, 11,

32]. Pode-se, com a utilização de tais sistemas, avaliar, de forma mais precisa, parâmetros como o avanço da frente do fundido e tempos de resfriamento do material da peça o que, associado à experiência do corpo técnico das empresas, permite a previsão de fenômenos tais como os empenamentos. Caso contrário, se o material plástico utilizado apresentar baixo índice de contração o corpo técnico pode, em função de sua experiência, utilizar conceitos de projeto, associados ao método da imagem de enchimento, para a solução do problema.

Nesses casos, em função da maior simplicidade geométrica da peça (peças pequenas e com poucas variações de espessura), é possível utilizar métodos mais simplificados, para a determinação da tendência a empenamentos.

Para o caso de peças com características estéticas deve-se avaliar também sua complexidade geométrica. Para peças com geometria complexa (peças grandes, com paredes finas sem reforços, ou paredes com grandes variações de espessura) semelhante ao caso de peças com função técnica, aconselha-se fortemente a utilização dos recursos dos módulos de análise de fluxo dos sistemas CAE *high end*, para a previsão, a partir dos parâmetros obtidos na simulação, da tendência a empenamentos, permitindo assim que o corpo técnico adote ações corretivas visando a prevenção do problema. Em casos desse tipo, é fundamental a obtenção de peças sem a ocorrência de empenamentos (peças estéticas ou aparentes), tornando-se necessário, devido à complexidade da peça, uma avaliação das variáveis que não são fornecidas por sistemas computacionais mais simplificados, ou por métodos gráficos manuais. Nesses casos, como referido anteriormente, são avaliados parâmetros pertencentes à fase de recalque e resfriamento da peça moldada, além de parâmetros do preenchimento da cavidade.

Já para situações que apresentem geometria simples (peças pequenas com transições suaves de espessura), a experiência do projetista, aliada às técnicas de projeto e à utilização de sistemas CAE *main stream*, permite uma boa avaliação das possibilidades de ocorrência de empenamentos, bem como a minimização, ou eliminação prévia, desses efeitos. Todavia, deve-

se levar em consideração a necessidade de uma ampla experiência do corpo técnico, para que se considere tal opção.

Linhas de Solda

Na análise da necessidade do emprego de uma análise de fluxo em sistemas CAE *high end* para a avaliação de linhas de solda, o primeiro critério que deve ser considerado é a característica funcional da peça (Figura 32). Para o caso de peças que não apresentem características estéticas ou técnicas pode-se, com o emprego de técnicas mais simples, como as descritas no capítulo 2 (técnica da imagem de enchimento), associadas à experiência do projetista, solucionar o problema da formação de linhas de solda. Desta forma, com o emprego da técnica da imagem de enchimento, pode-se prever a localização das linhas de solda, possibilitando, então, o seu deslocamento, mediante o emprego de modificações nas espessuras de parede da peça ou reposicionamento dos pontos de injeção.

Já para situações onde as peças apresentem uma característica técnica, torna-se necessário avaliar o número de pontos de injeção utilizados para o preenchimento da peça, visto que a formação de linhas de solda depende fortemente deste fator.

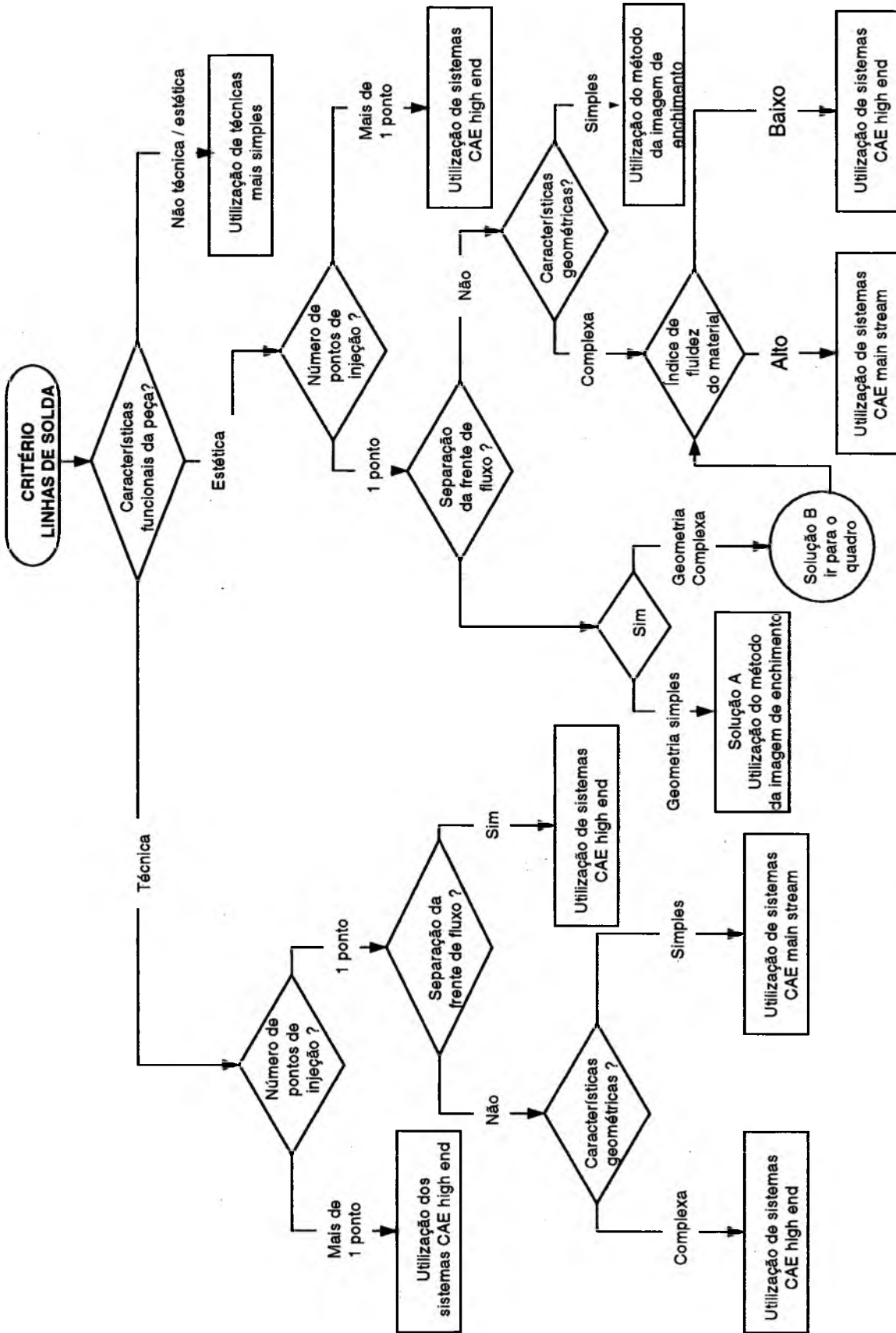


Figura 32 - Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para a avaliação da formação de linhas de solda em uma peça injetada.

Se a peça possuir mais de um ponto de injeção, é recomendável a aplicação dos recursos de sistemas CAE, para a análise dos parâmetros que permitam uma avaliação da qualidade da linha de solda formada, possibilitando assim que o corpo técnico adote ações corretivas, visando solucionar o problema. Nestes casos pode-se, com o emprego de sistemas CAE *high end*, avaliar características como posicionamento, temperaturas e pressões no plano e encontro das frentes de fluxo (região de formação da linha de solda), podendo-se verificar, adicionalmente, a distribuição de temperaturas ao longo da espessura da peça, nesta mesma região. Isso permite não apenas o deslocamento da linha de solda para uma região mais adequada mas, quando comparado a resultados obtidos em experiências anteriores, é possível também avaliar a sua qualidade, ou seja, aparência e resistência mecânica.

No entanto, quando é utilizado apenas um ponto de injeção, torna-se necessária a avaliação das características geométricas da peça. Primeiramente é observado se ocorre a separação da frente de fluxo, o que pode ser visto quando a peça apresenta obstruções ao fluxo do material. Tal fato ocorre, principalmente, em peças tubulares ou que apresentem furos passantes. Portanto para peças onde ocorra a separação da frente de fluxo, torna-se recomendável o emprego de sistemas CAE *high end*, para a avaliação da formação das linhas de solda.

Como no caso anterior, é possível avaliar não só parâmetros como pressões e temperaturas, mas também a distribuição de temperaturas ao longo da espessura da peça, permitindo assim, uma análise prévia do posicionamento e da qualidade da linha de solda formada.

Todavia, nas situações onde não ocorre tal problema, torna-se necessário avaliar a complexidade geométrica do produto.

Caso a peça seja complexa (peças com muitas nervuras e variações bruscas de espessura), é aconselhável que sejam empregados os sistemas CAE para a avaliação da

formação das linhas de solda, tanto do ponto de vista de posicionamento quanto de qualidade. Nestas situações, é possível, com o emprego de sistemas CAE *high end*, avaliar com maior segurança, tanto a posição como a qualidade da linha de solda (caso ocorra sua formação) através da análise dos parâmetros fornecidos por esses sistemas, visto que o surgimento de linhas de solda, nessas situações, é altamente provável.

Por outro lado, se a geometria da peça for simples (peças sem nervuras e com espessura de parede constante), o corpo técnico, baseado em experiências anteriores, pode utilizar as análises de fluxo em sistemas CAE *main stream*, para avaliar o problema. Em casos como este, em função da menor complexidade da peça, pode-se adotar a utilização da referida técnica, para a avaliação do surgimento de linhas de solda.

Caso a peça possua características estéticas, torna-se necessário observar o número de pontos de injeção existentes na mesma. Em situações onde existam apenas um ponto de injeção observa-se então se ocorre a separação da frente de fluxo do polímero ao preencher a cavidade. Nos casos onde ocorrer a separação da frente de fluxo, podem ser adotadas duas medidas. A) Caso a peça seja geometricamente simples (espessura de parede constante e poucas nervuras), pode-se utilizar o método da imagem de enchimento, que permite determinar a posição onde é formada a linha de solda. Dessa forma pode-se deslocá-la para uma região não-visível do produto; B) Caso a peça seja geometricamente complexa deve-se ir para o quadro índice de fluidez do material.

Para os casos em que as peças não apresentarem a separação da frente de fluxo, deve-se analisar a geometria da peça. Se peça for geometricamente simples, pode-se, com o emprego de técnicas mais simples, aliadas à experiência do corpo técnico, prevenir a formação das linhas de solda. Aqui, o emprego da técnica da imagem de enchimento é adequada, em virtude da simplicidade geométrica da peça, permitindo ao corpo técnico das empresas (desde de que tenha

a devida experiência) adotar medidas que visem a eliminação ou minimização prévia de tais defeitos.

Contudo, se a peça for complexa, deve-se observar as características do material plástico utilizado em sua fabricação. Se o material apresentar um alto índice de fluidez [66, 67], a possibilidade das linhas de solda serem visíveis, é menor, caso ocorra a sua formação. Esse fato, aliado à experiência do corpo técnico e a utilização de sistemas CAE *main stream*, possibilita o deslocamento de linhas de solda para regiões menos críticas da peça (regiões menos visíveis), permitindo a obtenção de produtos onde os efeitos, causados pelas linhas de solda, são minimizados.

Em contrapartida, se os materiais apresentarem baixo índice de fluidez [48, 49], recomenda-se uma avaliação mais criteriosa da peça, utilizando então os recursos das análises de fluxo dos sistemas CAE *high end*, para a análise do enchimento e da formação de possíveis linhas de solda. Além disso, com a utilização desses *softwares*, existe a possibilidade de avaliar a distribuição de temperaturas, ao longo da espessura da peça, na região de formação da linha de solda, o que permite uma análise da qualidade da mesma, com relação a sua aparência.

Bolsas de Ar

A formação e a previsão da localização de bolsas de ar são fortemente dependentes da geometria do produto moldado (Figura 33). Dessa forma, se a peça apresentar uma geometria simples, o corpo técnico pode, baseado em sua experiência e associado ao emprego da técnica da imagem de enchimento [1], prever o posicionamento das bolsas de ar, possibilitando assim o seu deslocamento.

Caso a geometria do produto seja complexa, torna-se difícil, mesmo para especialistas com maior experiência, a previsão da ocorrência de tais fenômenos. Nestes casos, torna-se

recomendável o emprego de sistemas CAE *main stream* para o auxílio na localização prévia de bolsas de ar, permitindo que o corpo técnico tome ações corretivas, como as que foram descritas no capítulo 2, visando a solução do problema.

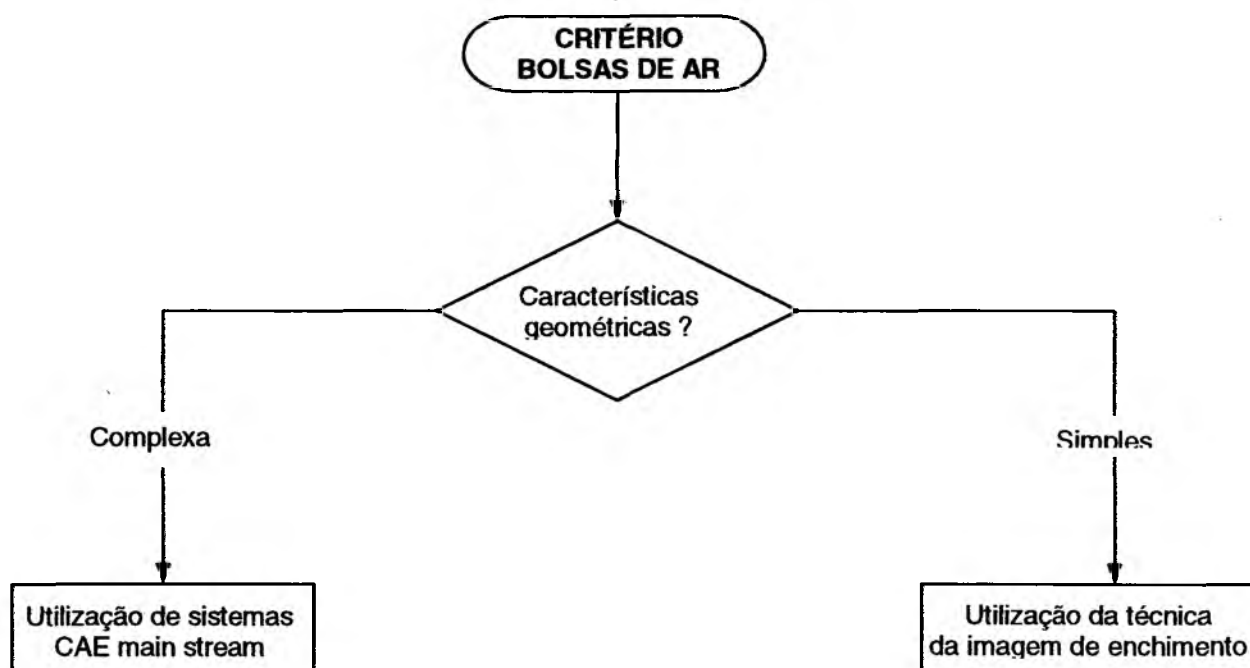


Figura 33 - Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para avaliação da formação de bolsas de ar em uma peça injetada.

Tensões internas

Com relação às tensões internas, oriundas do escoamento do polímero dentro da cavidade do molde, primeiramente deve-se considerar a presença ou não do material plástico no banco de dados dos sistema CAE em questão (Figura 34). Caso o referido material não esteja caracterizado no banco de dados, pode-se utilizar um material com características semelhantes ao material da peça. Esta solução, contudo, merece ser avaliada com mais cuidado pois, em alguns casos, os resultados obtidos para as tensões de fluxo, podem estar muito distantes

daqueles obtidos com o grau correto do material a ser injetado, ou encomendar a caracterização das propriedades do polímero, de forma a introduzir as mesmas nos bancos de dados dos sistemas CAE. O próximo passo a ser seguido, para as duas soluções apresentadas (no caso do polímero não estar presente no banco de dados), é o quadro características funcionais da peça.

Nos casos em que o material conste no banco de dados, deve-se observar então as características funcionais da peça. Dessa forma, pode-se, para peças sem requisitos de estética ou requisitos técnicos, controlar o nível de tensões do produto moldado, a partir do emprego de técnicas de projeto (ver capítulo 2), aliadas a aplicação de sistemas CAE *main stream*, desde que os especialistas, envolvidos na concepção da peça, possuam experiência em casos semelhantes. Já para o caso de peças técnicas, recomenda-se a utilização de sistemas CAE mais avançados, como forma mais eficiente na avaliação destes fenômenos.

Com relação a peças que tenham uma característica estética, faz-se necessário, também, observar a sua complexidade geométrica.

Assim, para peças com geometria simples (peças mais espessas e com poucas variações de espessura), pode-se, a partir do emprego de regras de projeto, e da experiência do projetista (além da utilização de técnicas auxiliares mais simples, bem como sistemas CAE *main stream*, como os mencionados no capítulo 3), avaliar qualitativamente os níveis de tensões internas das peças, decorrentes do escoamento do polímero, e assim poder tomar medidas visando solucionar estes problemas. Todavia, para peças com geometria complexa, aconselha-se o emprego de métodos mais eficazes, como os sistemas CAE *high end*, como forma mais confiável para uma avaliação dos níveis de tensão interna.

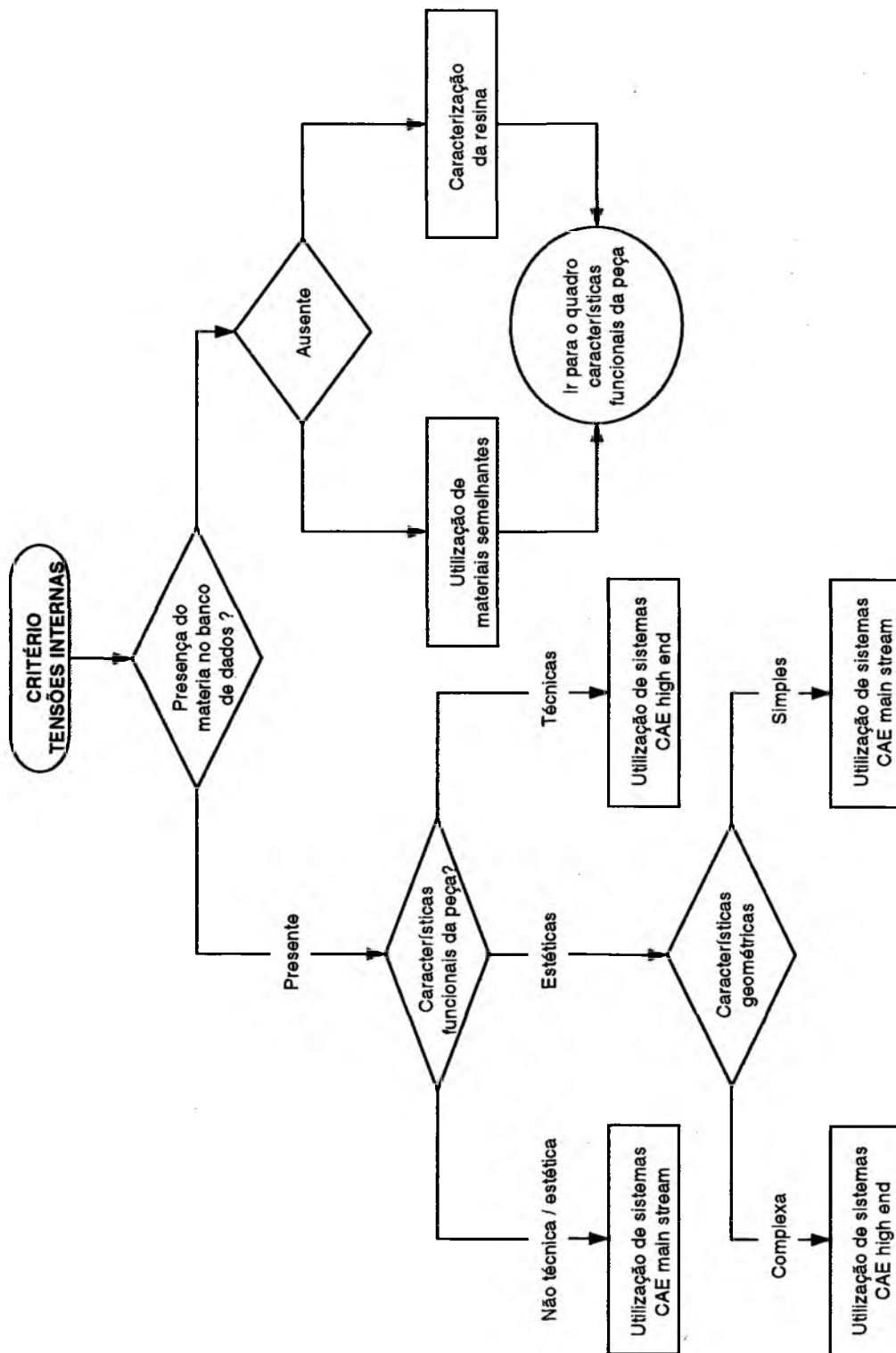


Figura 34 - Fluxograma sistematizador parcial para a decisão do emprego de uma análise de fluxo para a avaliação das tensões internas oriundas do fluxo do polímero em uma peça injetada.

5. APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA A CASOS PRÁTICOS

5.1 Considerações Gerais Sobre a Aplicação da Sistemática

Com o objetivo de exemplificar o funcionamento da sistemática proposta no capítulo anterior, será realizada a sua aplicação a casos práticos da indústria de moldes.

A escolha dos exemplos, ou casos práticos, foi baseada na experiência adquirida na utilização do *software* Moldflow (módulos de análise de fluxo e arrefecimento) e em trabalhos de cooperação entre o grupo CIMJECT e empresas do setor, dos quais foram selecionadas três peças.

Contudo, para iniciar a aplicação da sistemática, torna-se necessária a identificação das características da peça que serão utilizadas como critérios na mesma.

Assim, para a utilização da referida sistemática deve-se identificar as seguintes características:

A) Características Geométricas da Peça

Aqui, são observadas as características geométricas da peça, verificando se a mesma apresenta muitas nervuras, furos, grandes variações de espessura, espessuras muito grandes ou muito pequenas (peças com geometrias complexas), ou se a peça apresenta espessuras constantes, poucas nervuras e ausência de furos, espessuras muito grandes ou muito pequenas (geometria mais simples). Essa classificação da peça com relação à complexidade de sua geometria é utilizada então como critério de decisão da utilização ou não de uma análise de fluxo na peça em questão.

B) Material Utilizado para a peça

Aqui devem ser verificadas as seguintes características do material a ser empregado para a produção da peça:

- O índice de fluidez do material;
- O índice de contração do material em questão;
- Presença ou não de cargas e aditivos;
- Presença ou não do material nos bancos de dados dos sistemas CAE.

C) Número de Pontos de Injeção Utilizados para o Preenchimento da Peça

Deve-se observar, no projeto da peça, o número de pontos de injeção utilizados para a peça a ser moldada, o que exercerá influência na formação de defeitos tais como as linhas de solda.

D) Requisitos de Projeto Exigidos para a Peça

Observar na ficha de projeto da peça as características exigidas para a peça a ser produzida, e quais os problemas de moldagem que podem dificultar a obtenção destas características.

Assim, em uma peça na qual não pode haver manchas, deve-se evitar o surgimento de bolsas de ar e minimizar os níveis de tensões residuais.

A partir dessa avaliação inicial, pode-se então aplicar o fluxograma descrito no capítulo anterior, para determinar a necessidade ou não da aplicação de um sistema CAE.

A seguir é feita uma descrição de cada peça com a posterior aplicação da sistemática.

5.2 Caso 1 – Carcaça Superior

5.2.1 Primeiro Passo da Aplicação da Sistemática – Análise Preliminar

O primeiro exemplo selecionado para a aplicação da sistemática é a peça “Carcaça Superior”. Esta peça, como condições iniciais (retiradas dos requisitos de projeto da mesma) deve apresentar sua superfície visível livre de linhas de solda e marcas de queima. Em função desses requisitos, pode-se dizer que a peça apresenta características estéticas, influenciando na aplicação da sistemática, o que será visto mais adiante na aplicação do fluxograma sistematizador.

O material utilizado para a fabricação da peça é o ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), que possui um índice de fluidez relativamente baixo, o que pode influenciar nas características de formação das linhas de solda. Outra característica do material é o seu baixo índice de contração, o que o torna um material menos suscetível a empenamentos. Além disso, a geometria da peça, por apresentar muitas nervuras e variações de espessura, pode ser considerada como sendo complexa, apresentando também furos passantes em sua superfície.

A) Resumo das Características Necessárias para a Aplicação da Sistemática à Peça Caracaça Superior

Nome da peça: Carcaça Superior

Descrição: Parte superior de uma carcaça para aparelho telefônico (Figura 35)

Característica funcional da peça: Estética

Material da peça: Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) – baixo índice de fluidez e de contração

Geometria: Complexa

Número de pontos de injeção: Peça injetada por um ponto de injeção, como definido em projeto

Ocorrência da separação e reencontro da frente de fluxo



Figura 35 – Modelo da peça Carcaça Superior.

5.2.2 Segundo Passo da Aplicação da Sistemática: Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Nesta etapa, serão avaliados os aspectos relacionados ao fluxo do material dentro da cavidade (linhas de solda, bolsas de ar e empenamentos segundo o descrito nas características da peça) para que seja determinada ou não a necessidade da realização de uma análise do preenchimento, utilizando um sistema CAE *high end*. Para tanto, será aplicado o fluxograma sistematizador, definido no capítulo 4, aos aspectos linhas de solda, bolsas de ar e empenamentos e tensões residuais oriundas do fluxo do polímero.

A) Aspecto linhas de solda

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Primeiro critério: Características funcionais da peça

Pode-se observar na figura 32, que o primeiro critério a ser aplicado está relacionado às características funcionais da peça. Como descrito anteriormente, a peça “carcaça superior” possui características estéticas, devendo portanto ter sua superfície visível livre de linhas de solda e marcas de fluxo. Com a aplicação deste critério define-se como o próximo critério a ser aplicado o número de pontos de injeção.

Segundo critério: Número de pontos de injeção

Deve-se observar nesta etapa, o número de pontos de injeção existentes na peça, que são definidos durante o projeto da mesma, e terão influência na formação das linhas de solda. Como foi descrito anteriormente, a peça “carcaça superior” possui apenas um ponto de injeção que, por sua vez, determina o próximo critério a ser utilizado na aplicação da sistemática como sendo a separação da frente de fluxo.

Terceiro critério: Ocorrência da separação da frente de fluxo

Nesta etapa deve-se observar se a peça possui furos em sua geometria, os quais forçam a frente de fluxo do material a se separar, e se recombinar posteriormente, formando uma linha de

solda. Como a peça carcaça superior possui furos, como pode ser observado na figura 35, logo ocorre a separação da frente de fluxo quando polímero contorna os furos. Adicionalmente a peça “carcaça superior” possui uma geometria complexa, o que leva, conseqüentemente, à aplicação deste critério, o que determina o próximo critério a ser adotado como sendo as características do material da peça.

Quarto critério: Características do material da peça – índice de fluidez do material

Nesta etapa deve-se observar o índice de fluidez do material a ser utilizado para a fabricação da peça.

Caso o material possua um alto índice de fluidez, haverá uma grande possibilidade das linhas de solda não serem visíveis, devido às características de sua formação (Ver Capítulo 2). Contudo, se o material possuir um baixo índice de fluidez, existirá uma forte tendência para que as linhas de solda tornem-se visíveis.

Como se trata de uma peça estética e considerando que será utilizado ABS para sua fabricação, material que possui um índice de fluidez relativamente baixo, seria recomendável a utilização de uma análise de fluxo em um sistema CAE *high end*, para a avaliação do posicionamento e qualidade das linhas de solda.

B) Aspecto bolsas de ar

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Critério único: Características geométricas da peça

Devido à complexidade da peça carcaça superior, deve-se realizar uma simulação do escoamento do material em um sistema CAE *main stream*, para a avaliação do posicionamento das bolsas de ar, sendo possível então, se necessário, deslocá-las para regiões mais adequadas.

C) Aspecto Empenamentos

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Primeiro critério: Características funcionais da peça

Como determinado anteriormente, na análise preliminar, a peça “carcaça superior” possui características predominantemente estéticas, determinando então a aplicação do segundo critério.

Segundo critério: Características geométricas da peça

De acordo com a análise preliminar da peça “carcaça superior”, pode-se observar que sua geometria é relativamente complexa. Portanto, em virtude dessa característica, torna-se difícil, através de métodos mais simples (como a técnica da imagem de enchimento) a previsão da

ocorrência de empenamentos na referida peça. Assim, para estes casos, é aconselhável a utilização de uma análise de fluxo em um sistema CAE *high end* para a avaliação da forma de preenchimento, além da análise de parâmetros como temperaturas e pressões durante o preenchimento da peça, permitindo desta forma, uma avaliação mais precisa da ocorrência ou não de empenamentos neste caso.

D) Aspecto Tensões Oriundas do Fluxo do Material

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Primeiro Critério: Material da peça (presença no banco de dados)

Para a fabricação da peça, foi utilizado um grau de ABS que não está presente no banco de dados do sistema CAE utilizado (MOLDFLOW).

Contudo, pode-se utilizar, para este caso, um material com características semelhantes (contratipo) para a análise das tensões de fluxo. Assim o próximo critério do fluxograma sistematizador está relacionado às características funcionais da peça.

Segundo Critério: Características funcionais da peça

Como a peça apresentada possui características estéticas, torna-se necessário aplicar o critério características geométricas como próxima etapa do fluxograma sistematizador.

Terceiro Critério: Características geométricas da peça

Pode ser observado, da descrição das características da peça “carcaça superior”, que a mesma possui uma geometria complexa, concluindo-se, desta forma, que para a avaliação das tensões oriundas do fluxo do material para este caso, recomenda-se a utilização de um sistema *CAE high end*.

Todavia, a decisão de utilizar um contratipo do material para a realização da análise é de responsabilidade do corpo técnico, que deve avaliar o risco de estar realizando uma análise com um material com características apenas semelhantes às do material que será injetado.

5.3 Caso 2 – Luva de 50mm

5.3.1 Primeiro Passo da Aplicação da Sistemática – Análise Preliminar

A peça, apresentada na figura 36, é uma luva para conexão de tubos de PVC, utilizada em canalizações de baixa pressão. Sua principal característica é ter que resistir aos esforços exercidos na região do anel, que ocorrem durante o encaixe da mesma com o tubo.

Para que não haja uma redução da resistência da peça, o que prejudicaria sua durabilidade, esta região, idealmente, não deveria possuir linhas de solda, além de ser necessário que o nível de tensões residuais, causados pelo fluxo do material, esteja abaixo do limite admissível para o material em questão.

O material (Policloreto de Vinila ou PVC), também é quase totalmente amorfo e possui um índice de contração relativamente baixo, o que proporciona uma maior estabilidade dimensional à peça, ou seja, menor tendência a empenamentos. Em contrapartida, seu índice de

fluidez é baixo, sendo sensível à degradação térmica, o que pode causar problemas relacionados ao fluxo do material, tais como níveis de tensões mais elevados e perdas na qualidade de formação das linhas de solda. Adicionalmente, em virtude da peça apresentar espessura de parede constante, além de não apresentar nervuras e formas complexas, pode-se considerar sua geometria como sendo simples. Contudo, devido a sua forma tubular, e a utilização de apenas um ponto de injeção, ocorrerá, durante o preenchimento da peça, a separação da frente de fluxo do material originando, conseqüentemente, uma linha de solda na mesma.

A) Resumo das Características Necessárias para a Aplicação da Sistemática à Peça “Luva de 50 mm”

Nome da peça: Luva de 50 mm

Descrição: Luva para conexão de tubos de PVC, para canalizações de baixa pressão (Figura 36)

Características funcionais da peça: Peça com características técnicas

Material: Policloreto de vinila (PVC) – baixo índice de contração e baixo índice de fluidez

Características Geométricas: Peça com geometria simples (Ocorre a separação da frente de Fluxo)

Número de pontos de injeção: peça injetada por um ponto de injeção, como definido em projeto

Ocorrência da separação e recombinação da frente de fluxo

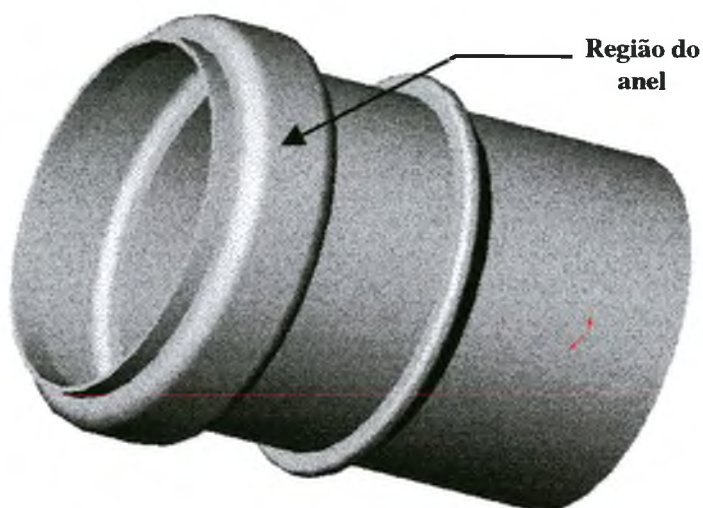


Figura 36 – Modelo da peça “Luva de 50 mm”.

5.3.2 Segundo Passo da Aplicação da Sistemática: Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Nesta etapa, assim como no Caso 1, será feita a aplicação dos critérios da sistemática a cada um dos aspectos determinados anteriormente, na avaliação preliminar da peça.

A) Aspecto linhas de solda

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Primeiro critério: Características funcionais da peça

Da descrição das características da peça “luva de 50 mm”, pode-se observar que a mesma possui características técnicas, em virtude dos esforços que deve suportar quando em serviço. A aplicação deste critério define o critério seguinte a ser aplicado, como sendo o número de pontos de injeção da peça.

Segundo critério: Número de pontos de injeção

Como descrito anteriormente, está sendo utilizado apenas um ponto de injeção para o preenchimento da peça “luva de 50mm”, o que indica então a aplicação do terceiro critério como sendo o próximo passo da sistemática.

Terceiro Critério: Separação da frente de fluxo

Apesar da simplicidade geométrica da peça “luva de 50 mm” (espessura de parede constante e ausência de nervuras) ocorre, devido a sua forma cilíndrica, a separação de sua frente de fluxo e sua posterior recombinação, formando uma linha de solda do lado oposto ao ponto de injeção.

Desta forma, em virtude dos requisitos aos quais a peça é submetida, torna-se necessária a realização de uma análise de fluxo em um sistema CAE *high end* para a avaliação da formação da linha de solda.

B) Aspecto Tensões Oriundas do Fluxo do Material

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Primeiro Critério: Características do Material da Peça – presença no banco de dados

Para a fabricação da peça, foi utilizado um grau de PVC pertencente a um fabricante nacional. Contudo, tal material não está presente no banco de dados dos sistemas CAE.

Como mencionado anteriormente, para a obtenção de valores precisos, nos cálculos de tensões oriundas do escoamento do polímero, fornecidos pelos sistemas CAE, são necessárias as propriedades reológicas corretas dos materiais plásticos, ou seja, o grau do material plástico utilizado na prática deve ser o mesmo utilizado na simulação do preenchimento.

Em virtude disso, os resultados fornecidos pelos sistemas CAE podem não representar corretamente o comportamento do polímero ao preencher a cavidade do molde.

Contudo, pode-se utilizar, para este caso, um material com características semelhantes (contratipo) para a análise das tensões de fluxo. Assim o próximo critério do fluxograma sistematizador está relacionado às características funcionais da peça.

Segundo Critério: Características funcionais da peça

Como a peça apresentada possui características técnicas, torna-se recomendável uma análise de fluxo em uma sistema CAE *high end* para a avaliação das tensões na região do anel, indicada na figura 36.

Tal decisão, de utilizar um contratipo do material para a realização da análise, é de responsabilidade do corpo técnico, que deve avaliar o risco de estar realizando uma análise com um material com características apenas semelhantes às do material que será injetado.

C) Aspecto Bolsas de Ar

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Critério único: Características geométricas da peça

Como a peça “luva de 50 mm” apresenta uma geometria bastante simples (espessura constante e sem nervuras) pode-se, a partir da utilização da técnica da imagem de enchimento, prever a localização das bolsas de ar e providenciar, desta forma, o seu deslocamento, caso seja necessário.

D) Empenamentos

Aplicação do Fluxograma Sistematizador

Primeiro Critério: Características funcionais da peça

O primeiro critério a ser empregado é o critério característica funcional da peça. Como descrito anteriormente, a peça possui características técnicas, o que implica na utilização do critério características geométricas.

Segundo critério: Características geométricas da peça

A peça “luva de 50 mm”, como já mencionado, possui uma geometria simples (não apresenta variações de espessura nem nervuras), o que leva à aplicação do critério material da peça.

Terceiro Critério: Material da peça – Índice de contração

Segundo a análise preliminar, pode-se observar que o material utilizado para a produção da peça é o PVC, que possui um baixo índice de contração, em função de ser um material amorfo.

Pode-se, desta forma, em virtude das características da peça “luva de 50 mm”, utilizar a técnica da imagem de enchimento para a avaliação da ocorrência de empenamentos.

5.4 Caso 3 – Cabo de Faca

5.4.1 Primeiro Passo da Aplicação da Sistemática: Análise Preliminar

A peça “cabo de faca”, apresentada na figura 37, deve, segundo seus requisitos de projeto, ter sua superfície livre de marcas de fluxo, apresentando portanto características predominantemente estéticas.

Para a injeção da peça foi utilizado apenas um ponto de injeção, possuindo a peça uma geometria simples (espessura constante, ausência de nervuras ou desvios na direção do fluxo do material), além de não apresentar a separação e recombinação da frente de fluxo.

O material utilizado para a fabricação da peça é o polietileno de baixa densidade (PEBD), o qual se encontra presente no banco de dados do sistema CAE utilizado (MOLDFLOW), possuindo índice de fluidez relativamente alto e de contração relativamente baixo.

A) Resumo das Características Necessárias para a Aplicação da Sistemática à Peça Cabo de Faca

Nome da peça: Cabo de faca

Descrição: Cabo injetado para faca de cozinha (Figura 37)

Característica funcional da peça: Peça com características estéticas

Material: Polietileno de baixa densidade (PEBD), alto índice de fluidez e de contração

Características Geométricas: Peça com geometria simples

Número de pontos de injeção: Peça injetada por um ponto de injeção, como definido em projeto

Não ocorre a separação e recombinação da frente de fluxo



Figura 37 – Modelo da peça cabo de faca.

5.4.2 Segundo Passo da Aplicação da Sistemática: Aplicação do fluxograma sistematizador

A) Aspecto Linhas de Solda

Primeiro Critério: Características funcionais da peça

O primeiro critério a ser aplicado nesta etapa está relacionado com as características funcionais da peça. Observando-se a análise preliminar da peça, pode ser visto que a mesma possui características estéticas, o que leva a aplicação do critério número de pontos de injeção como próximo passo do fluxograma.

Segundo Critério: Número de pontos de injeção

Como descrito anteriormente, a peça cabo de faca apresenta apenas um ponto de injeção, implicando por sua vez, na utilização do critério ocorrência da separação da frente de fluxo.

Terceiro Critério: Separação da frente de fluxo

Observando-se as características da peça, pode ser visto que não há separação e recombinação da frente de fluxo, o que leva à aplicação do critério características geométricas da peça.

Quarto Critério: Características geométricas da peça

Como mencionado anteriormente, a peça apresenta uma geometria simples. Conclui-se, portanto, que para a avaliação da possibilidade de ocorrência de linhas de solda na peça “cabo de faca”, pode-se utilizar o método da imagem de enchimento.

B) Aspecto Empenamentos

Primeiro Critério: Características Funcionais da Peça

A peça “cabo de faca”, como já referido anteriormente, possui características estéticas, o que implica na utilização do critério características geométricas.

Segundo Critério: Características geométricas da peça

Como a peça cabo de faca possui uma geometria simples pode-se, para a avaliação da possibilidade da ocorrência de empenamentos, utilizar um sistema CAE *main stream* para sua análise.

C) Aspecto Bolsas de Ar

Critério Único: Características geométricas da peça

Como a peça “cabo de faca” apresenta uma geometria bastante simples pode-se, com o emprego da técnica da imagem de enchimento, avaliar o posicionamento das bolsas de ar, permitindo, se necessário, seu deslocamento.

D) Aspecto Tensões Oriundas do Fluxo Material

Primeiro Critério: Material da peça

Nesta etapa verifica-se a presença do material no banco de dados do sistema CAE. Como o material utilizado (PEBD) está presente no banco de dados, o próximo critério a ser empregado fica determinado como sendo as características funcionais da peça.

Segundo Critério: Características funcionais da peça

Observando-se a análise preliminar da peça “cabo de faca”, pode ser visto que a mesma possui características estéticas, o que leva à aplicação do critério características geométricas.

Terceiro Critério: Características Geométrica

Como a peça cabo de faca possui uma geometria simples, conclui-se que é possível, para a avaliação das tensões decorrentes do fluxo do material, a utilização de sistemas CAE *main stream*.

5.5 Análise dos Resultados da Aplicação da Sistemática

Da aplicação da sistemática aos casos práticos, pode-se observar que o tipo de recurso a ser empregado é dependente do conjunto de características da peça associado ao aspecto analisado, implicando em alguns casos, em diferentes recursos para diferentes aspectos.

No entanto, deve-se empregar aquele recurso que resolva o problema da forma mais eficiente, ou seja, no menor tempo e da forma menos dispendiosa possível. Isso não significa, contudo, que seja empregado apenas um tipo de recurso, sendo possível utilizar uma combinação dos métodos discutidos.

Assim, por exemplo, se for determinado que para uma peça deve-se empregar uma análise de fluxo em um sistema CAE high end, para avaliar os aspectos empenamentos e tensões residuais, e a utilização do método da imagem de enchimento, para avaliar-se o posicionamento de bolsas de ar e linhas de solda, pode-se empregar os dois métodos de forma conjunta. Nesse caso, a análise do posicionamento das linhas de solda e das bolsas de ar é realizada na própria empresa por seu corpo técnico, enquanto a avaliação das tensões de fluxo e possibilidade de empenamento pode ser feita por consultores especializados.

Esse tipo de solução pode implicar em uma redução substancial no tempo utilizado para a realização de uma análise, bem como nos custos com a contratação de consultores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Os especialistas do setor de moldes têm despertado, nos últimos anos, para a necessidade da utilização cada vez mais intensa de novos recursos que permitam uma contínua melhoria nos seus produtos, resultado de uma crescente pressão do mercado consumidor.

Nesse contexto, vêm sendo empregadas as tecnologias CAE que, associadas com outras técnicas, vêm mais recentemente sofrendo um crescimento acentuado, principalmente em nível nacional [1, 2, 5, 57], devido ao retardo com que tais técnicas (em geral de custo elevado e exigindo mão de obra especializada, ainda carente no Brasil) começaram a ser introduzidas no país. Contudo, em virtude de suas peculiaridades, a aplicação de tais sistemas nas empresas, necessita ser realizada com muito critério.

Sabe-se, de acordo com o apresentado neste trabalho, que os sistemas CAE comerciais, disponíveis atualmente, possuem uma série de limitações que restringem o seu campo de ação a casos que obedeçam a certos pré-requisitos. Deve-se portanto, avaliar as verdadeiras necessidades da empresa, e confrontá-las com os investimentos iniciais necessários à implantação de tal tecnologia, sendo apenas recomendável ou não implantá-la após essa avaliação inicial.

Este trabalho teve como objetivos principais a apresentação de conceitos relativos a racionalização da utilização das tecnologias CAE, bem como a proposta dos fundamentos de uma sistemática que vise, através do emprego de diretrizes, fornecer um auxílio ao corpo técnico das

empresas de moldes, na determinação dos casos onde o emprego dos sistemas CAE é recomendado ou vantajoso.

Assim, com base no trabalho apresentado, pode-se concluir que:

- É fundamental, além da utilização dos recursos dos sistemas CAE, o reconhecimento da importância do emprego de regras e técnicas específicas ao projeto de produtos e moldes, visto que a melhoria da qualidade e redução (se possível eliminação) antecipada do número de defeitos de moldagem, estão intimamente relacionados à aplicação das mesmas;
- O conhecimento sobre a microestrutura dos materiais plásticos e a influência das condições de processamento sobre a mesma pode, em certos casos, auxiliar no entendimento de alguns fenômenos que ocorrem durante o preenchimento de um molde, fornecendo meios que possibilitem a solução ou minimização de problemas causados pelo fluxo inadequado do material;
- O atual estado da arte das tecnologias CAE não permite, em certas situações, uma boa aproximação em relação ao processo real de injeção. Torna-se necessário, assim, que seja dispensada uma atenção muito grande à análise dos resultados fornecidos por esses sistemas, necessitando-se também, em função de suas limitações, de uma avaliação criteriosa da viabilidade de seu emprego;
- Acredita-se que a sistemática proposta seja viável no auxílio à determinação de casos nos quais havia a real necessidade da realização de uma análise de fluxo, bem como dos casos em que a aplicação dos recursos CAE não se mostrava tão vantajosa. Todavia, para a aplicação da referida

sistemática é necessário, por parte do usuário, um bom conhecimento do processo de injeção e sua influência na qualidade da peça acabada, bem como das regras e técnicas de projeto de produtos.

- Embora essa sistemática não tenha sido formalmente testada como uma ferramenta auxiliar, durante o treinamento de pessoal, acredita-se que valeria a pena avaliar seu potencial em tal situação.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando o tema apresentado, alguns dos trabalhos que poderiam servir de complemento a este são citados a seguir:

- A implementação da sistemática proposta em computador através da elaboração de um sistema especialista, permitindo uma utilização mais fácil da mesma;
- A elaboração de uma sistemática de auxílio ao corpo técnico, que leve em consideração as etapas de avaliações térmica e mecânica;

- A realização de um estudo comparativo entre os resultados fornecidos pelos sistemas CAE e os resultados práticos, obtidos em peças injetadas, relativos à microestrutura formada em peças de material semi-cristalino;

- Levantamento de uma possível correlação entre os parâmetros de processamento, e os resultados de ensaios mecânicos e óticos de peças injetadas em material semi-cristalino;

- Avaliação de um possível correlacionamento entre os parâmetros obtidos em uma simulação e a ocorrência de esguichamentos durante o processo de injeção, a partir da comparação desses parâmetros, com as condições de processamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dihlmann, C., **Simulação e Análise do Preenchimento de Cavidades em Moldes para Injeção de Termoplásticos Utilizando Método Manual e Tecnologia CAE/CAD**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- [2] Koike, T., **Integração do Projeto e da Fabricação de Moldes para Injeção de Plásticos com o Auxílio de Tecnologias CAD/CAE/CAM**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- [3] Ferro, S., **Atraso Técnico Freia Produção**. Plástico Moderno, São Paulo, dezembro 1995.
- [4] Naitove, M. H. & Gaspari J., **Mold Analysis Makes the Grade**. Plastic Technology, abril 1992.
- [5] Trabalho de Cooperação Cipla/Cimject, 1993.
- [6] Trabalho de Cooperação Específico Akros/Cimject, 1995.
- [7] Estágio Profissionalizante – Empresa Multibrás, 1993.
- [8] Malloy, R. A., **Plastic Part Design for Injection Molding**, Hanser Publishers, Munique, 1995.
- [9] Michaeli, W. et al., **Training in Plastics Technology**, Hanser Publishers, 1.ed.- New York (1995).
- [10] Rees, H., **Mold Engineering**, Hanser Publishers, New York, 1994.
- [11] Menges, G. & Mohren P., **How to Make Injection Molds**, Hanser Publishers, 2. ed.- Munich, 1993.
- [12] Manuais do Moldflow, **Moldflow Design Principles**, Moldflow Pty Ltd, Victoria, Austrália, 1991.

- [13] BLASS, A., **Processamento de Polímeros**, Editora da UFSC, 3.ed.- Florianópolis (1988).
- [14] Harada, J., **Moldagem por Injeção Projetos e Princípios Básicos**, Medialdêa Editora, 1.ed.- São Paulo (1991).
- [15] Fernandes, A. P., **Microstructural Analysis of Semi-Crystalline Polymers**, Relatório de Estágio Curricular, Universidade do Minho, 1995.
- [16] D'Ávila, M. A., **Processo de Moldagem por Injeção de Polímeros Semicristalinos- Caracterização e Simulação Assistida por Computador**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [17] Brito, A. M. C., **Simulação do Escoamento de Termoplásticos em Placas moldadas por injeção**, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 1995.
- [18] Vincent, P. I., **Impact Tests and Service Performance of Thermoplastics**, Plastic Institute, London, 1971.
- [19] Crowford, R. J. & McGonagle, K., **The Effect of Injection Moulding Conditions on the Impact Strength of Thermoplastic**. Plastic and Rubber Processing and Applications, Vol. 3, no 1, 1983.
- [20] Pouzada, A.S., **Termoplásticos para Injecção - parte 3 - Plásticos de Engenharia Semi-Cristalinos**. O Molde, Marinha Grande, no.11, março 1991.
- [21] Pour, B. K. et al., **A Study of Tooling Modifications Used to Improve Weld Line Properties of Polymeric Materials**. ANTEC, 1995.
- [22] Wolf, H. J., **Mould Filling Calculation of Weld Lines**. Kunststoffe Plast Europe, München, no 4, abril 1995.
- [23] Titchener, T., **The Effect of Transient Flow on Weld Line Strength and Visibility**. ANTEC, 1995.

- [24] Merhar, C. F., Beiter K. A. & Ishii K., **Weld-Line Strength in Injection Molded PVC Parts**. ANTEC, 1994.
- [25] Michaeli, W. et al., **Avoiding Faults on Mouldings – Weld Lines, Shrinkage and Distortion**. Kunststoffe Plast Europe, no 11, novembro 1995
- [26] Zöllner, O. & Sagenschneider U., **Shrinkage and Deformation of Glass Fibre-Reinforced Thermoplastic may be Calculated**. Kunststoffe Plast Europe, no 9, agosto 1994.
- [27] Gaitzsch, E. et al., **Simulation and Measurement of Warpage**. Kunststoffe Plast Europe, no 5, maio 1994.
- [28] Wilmsen, H. J., **PC Programs for the Moulding Simulation in Injection Moulding**. Kunststoffe Plast Europe, no 4, abril 1994.
- [29] Cox, H. & Mentzer C. *Polymer Engineering & Science*, no 1, 1986.
- [30] Chiang, H. et al. SPE Annual Technical Conference, 1991.
- [31] Delbarre, P. et al., **Analysis and Prevision of Warpage of Injected Parts in Thermoplastics**, The Sixth Annual Meeting, PPS, Nice, 1990.
- [32] Rosato, D. V. & Rosato D. V., **Injection Molding Handbook**, Chapman & Hall, New York, 2^a ed.
- [33] Kennedy, P., **Flow Analysis of Injection Molds**, Hanser/Gardner Publications, Cincinnati, 1995.
- [34] Ahrens, C. H., **Apostila da Disciplina de CAE/CAD/CAM do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- [35] Agassant, J. F. et al., **Polymer Processing Principles and Modeling**, Hanser Publishers, Munich, 1991.
- [36] Isayev, A. I., **Modeling of Polymer Processing**, Hanser Publishers, Munich, 1991.

- [37] Milla, A. Y. F., **Influência do Resfriamento na Qualidade de Peças Termoplásticas Moldadas por Injeção, com Estudo de Caso em Sistemas CAE**, Dissertação de Mestrado,
- [38] C mold 3dquickfill, dezembro de 1998. In:
<http://www.actech.com>
- [39] Moldflow Plastic Adviser, dezembro de 1998. In:
<http://www.moldflow.com>
- [40] Austin, C., **Computer-Aided Part and Modeling Design**. Developments in Injection Moulding – 3, Elsevier, London, 1985.
- [41] Speranza, V. & Titomanlio G., **Effect of Flow Crystallization on the Simulation of the Injection Moulding Process of Thermoplastic Polymers**, The Twelfth Annual Meeting, the Polymer Processing Society, Sorrento, may 1996.
- [42] Ito, H. et al., **Simulation of Injection Molding Process – Crystallization and its Effects on Material Properties**, The Twelfth Annual Meeting, the Polymer Processing Society, Sorrento, may 1996.
- [43] Dufossé, C. et al., **Crystallization and its Effects During Injection Molding**, The Sixth Annual Meeting, the Polymer Processing Society, Nice, april 1996.
- [44] **C-Mold Design Guide**, Ithaca, New York, U.S.A.
- [45] Fassett, J., **Thin Wall Molding: How its Processing Considerations Differ from Standard Injection Molding**, Plastic Engineering, december 1995.
- [46] Fassett, J., **Thin Wall Molding: Differences in Processing over Standard Injection Molding**, ANTEC, 430, 1995.
- [47] Michaeli, W., **Injection Molding**, Hanser Publisher, Munich.

- [48] **Manual do Pêndulo CEAST, Working Instructions – Digital Pendulum Code “6545/000”,** Compagnia Europea Apparechi Scientifici, Torino.
- [49] **ASTM D 1822, Standard Method for Tensile Impact Test,** Annual Book of ASTM Standards, 1991.
- [50] **Rosen, S. L., Barnes & Noble, Fundamental Principles of Materials for Practicing Engineers,** New York, 1971.

ANEXO

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE LINHAS DE SOLDA EM PEÇAS MOLDADAS EM POLIACETAL E POLIPROPILENO

Como apresentado no Capítulo 2, as linhas de solda representam um dos maiores problemas, tanto do ponto de vista estético quanto estrutural, encontrados em peças fabricadas pelo processo de moldagem por injeção.

Em virtude do grande número de variáveis que influenciam o comportamento de uma linha de solda, torna-se difícil prever sua qualidade, mesmo com o emprego de *softwares* de análise de fluxo [8].

Com o objetivo de avaliar a qualidade de linhas de solda em peças injetadas, realizou-se um estudo de caso na Universidade do Minho (Portugal), no qual procurou-se correlacionar as propriedades mecânicas das peças injetadas com as condições de processamento e com a microestrutura cristalina formada na região de encontro das frentes de fluxo.

A.1 - Objetivos do Estudo de Caso

Como principais objetivos do estudo de caso realizado estão:

- i) a moldagem de peças em poliacetal que apresentem a formação de uma única linha de solda;
- ii) a avaliação visual das peças moldadas em poliacetal e polipropileno, para a verificação da formação da ranhura característica das linhas de solda;
- iii) a realização de ensaios mecânicos (tração-impacto), em corpos de prova produzidos a partir das peças moldadas em poliacetal e polipropileno;
- iv) a avaliação da microestrutura (semicristalina) formada na região da linha de solda.

A.2 - Procedimento Experimental

A.2.1 - Seleção do Produto a ser Moldado

A escolha do produto a ser injetado baseou-se na disponibilidade de moldes, existentes na instituição, que possuíssem as características necessárias à realização do trabalho.

Havia, no entanto, apenas um molde no qual ocorria a formação de uma linha de solda, sendo o produto/peça apresentado na figura A.1.



Figura A.1 - Peça selecionada para a realização do estudo de linhas de solda.

A.2.2- Simulação do Preenchimento da Cavidade

A partir do desenho do produto, foi construído um modelo tridimensional, utilizando-se o *software* Moldflow [12].

Procedeu-se em seguida, a partir desse modelo, a simulação do preenchimento da cavidade, para a escolha das condições de moldagem. Foram selecionados 5 níveis de condições, onde procurou-se obter uma variação das características de formação da linha de solda, desde uma condição ideal, com temperaturas e vazões mais elevadas, até condições desfavoráveis para uma boa formação de uma linha de solda, resultando então nos valores apresentados nas tabelas A.1 e A.2.

Tabela A.1 - Condições de processamento selecionadas com a simulação de injeção para as peças moldadas em poliacetal.

CONDIÇÃO	TEMP. DO MOLDE (°C)	TEMP. DO FUNDIDO (°C)	TEMPO DE INJEÇÃO (s)
C1	85	210	1.5
C2	75	210	3.0
C3	70	210	4.5
C4	65	210	5.5
C5	65	210	6.5

Tabela A.2 - Condições de processamento selecionadas com a simulação de injeção para as peças moldadas em polipropileno.

CONDIÇÃO	TEMP. DO MOLDE (°C)	TEMP. DO FUNDIDO (°C)	VAZÃO DE INJEÇÃO (cm ³ /S)
C1	80	280	200
C2	80	250	100
C3	50	220	100
C4	20	220	100
C5	20	220	10

A.2.3 - Moldagem das Peças

As tabelas A.3 e A.4 apresentam, respectivamente, para o poliacetal e para o polipropileno, os parâmetros de entrada da máquina injetora, utilizados em cada condição, e as tabelas A.5 e A.6 a massa média resultante em cada condição de moldagem.

Foram descartadas 20 peças entre duas condições consecutivas, com o objetivo de estabilizar tais condições, de forma a uniformizar as características das peças em cada condição.

Tabela A.3 - Parâmetros utilizados na máquina injetora para a moldagem das peças em poliacetal.

CONDIÇÃO	TEMP. DO MOLDE (°C)	TEMP. DO FUNDIDO (°C)	TEMPO DE INJEÇÃO (s)	PRESSÃO DE INJEÇÃO (P1 bar)	PRESSÃO DE RECALQUE (P2 bar)
C1	85	210	1.5	40	20
C2	75	210	3.0	40	20
C3	70	210	4.5	30	10
C4	65	210	5.5	30	5
C5	65	210	6.5	30	0

Tabela A.4 - Parâmetros utilizados na máquina injetora para a moldagem das peças em polipropileno.

CONDIÇÃO	TEMP. DO MOLDE (°C)	TEMP. DO FUNDIDO (°C)	VAZÃO DE INJEÇÃO (cm ³ /S)	PRESSÃO DE INJEÇÃO (P1 bar)	PRESSÃO DE RECALQUE (P2 bar)
C1	20	220	10	-	2
C2	20	220	100	-	8
C3	80	250	100	-	2
C4	50	220	100	-	2
C5	80	220	200	-	15

Tabela A.5 - Massa média das peças moldadas em poliacetal, resultante para cada condição de injeção.

CONDIÇÃO DE MOLDAGEM	C1	C2	C3	C4	C5
MASSA MÉDIA (m)	39.29g	38.35g	35.65g	35.53g	35.42g

Tabela A.6 - Massa média das peças moldadas em polipropileno, resultante para cada condição de injeção.

CONDIÇÃO DE MOLDAGEM	C1	C2	C3	C4	C5
MASSA MÉDIA (m)	22.5g	22.6g	22.2g	22.8g	22.3g

A.2.4 - Ensaios de Tração-Impacto

Testes de resiliência, os quais podem ser realizados com um pêndulo, são utilizados para determinar as características de fragilidade dos materiais através de um choque, sob certas condições padronizadas [48].

No ensaio de tração-impacto (Figura A.2) o corpo de prova padronizado (ASTM D 1822) é preso horizontalmente, enquanto um martelo lhe aplica um esforço de tração a alta velocidade (impacto).

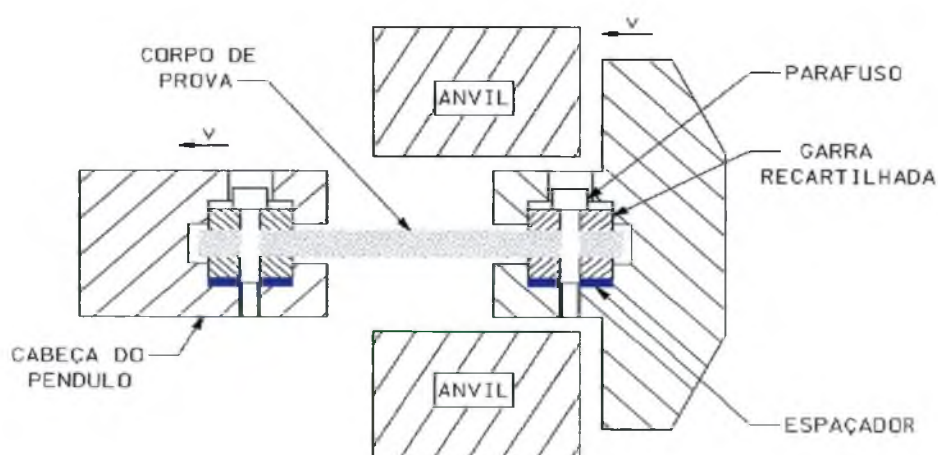


Figura A.2 - Desenho esquemático de um ensaio de Tração-Impacto.

Basicamente mede-se a energia, expressa em Joule, necessária para romper o corpo de prova sob determinadas condições [48, 49].

Como a energia potencial máxima do pêndulo é conhecida (função da altura de queda e do ângulo de queda), pode-se medir a energia absorvida pelo corpo de prova, a qual é igual à energia de ruptura do mesmo [48].

Vários parâmetros influenciam a energia medida, tais como vibrações do braço do pêndulo ou da estrutura, atritos dos componentes e atrito aerodinâmico, etc. De forma a dar repetibilidade às medições, tais fatores são controlados dentro de determinados valores de tolerância, como os descritos por várias normas internacionais [48].

Os corpos de prova para tração-impacto seguiram a norma ASTM D 1822, e podem ser vistos na figura A.3.

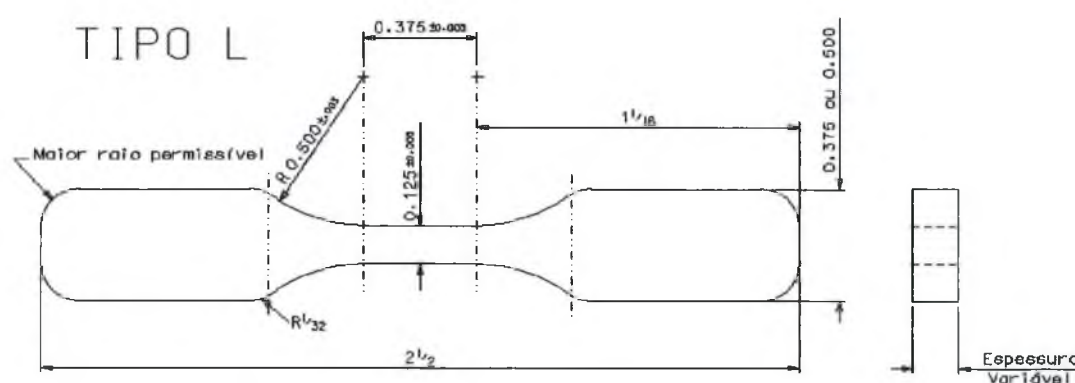


Figura A.3 - Forma geométrica do corpo de prova utilizado para os ensaios de tração-impacto segundo norma ASTM D 1822.

O equipamento no qual foram realizados os ensaios foi um pêndulo digital modelo 6545/000 da CEAST (*Compagnia Europa Apparechi Scientifici - Torino*).

Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova com e sem a presença de linha de solda, sendo os resultados apresentados nas tabelas A.6 à A.9.

Tabela A.7 - Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em poliacetal (condições C1, C2 e C3).

CONDIÇÃO	Nº DA MOLDAGEM	ENERGIA P/ RUPT.(J)
C1	1	1,44
C1	2	1,36
C1	3	1,62
C1	4	1,75
C1	5	1,75
C1	6	1,54
C1	7	1,95
C2	1	1,75
C2	3	1,48
C2	4	1,57
C2	5	1,72
C2	7	1,62
C2	8	1,33
C3	1	1,53
C3	2	1,59
C3	4	1,45
C3	6	1,84
C3	7	1,44
C3	8	1,65

Tabela A.8 - Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em poliacetal
(condições C4 e C5).

CONDIÇÃO	Nº DA MOLDAGEM	ENERGIA P/ RUPT.(J)
C4	1	1,23
C4	2	1,35
C4	3	1,48
C4	4	1,47
C4	6	1,20
C4	7	1,45
C4	9*	1,50
C5	1	1,33
C5	2	1,36
C5	4	1,29
C5	5	1,45
C5	6	1,41
C5	7	1,29
C5	8	1,20

Tabela A.9 - Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova de polipropileno (condições C1, C2 e C3).

CONDIÇÃO	Nº DA MOLDAGEM	ENERGIA P/ RUPT.(J)
C1	1	1,32
C1	2	1,21
C1	3	1,15
C1	4	1,47
C1	5	1,06
C1	6	1,17
C1	7	1,06
C1	8	1,09
C2	1	1,44
C2	2	0,93
C2	3	1,09
C2	4	1,42
C2	5	1,60
C2	6	1,41
C2	7	0,97
C3	1	1,44
C3	2	0,93
C3	3	1,09
C3	4	1,42
C3	5	1,60
C3	6	1,41
C3	7	0,97
C3	8	1,05

Tabela A.10 - Resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova em polipropileno (condições C4 e C5).

CONDIÇÃO	Nº DA MOLDAGEM	ENERGIA P/ RUPT.(J)
C4	1	1,14
C4	2	1,29
C4	3	1,03
C4	4	1,11
C4	5	1,21
C4	6	1,23
C4	7	0,94
C5	1	1,29
C5	2	1,83
C5	3	1,69
C5	4	1,35
C5	5	0,99
C5	6	1,09
C5	7	0,88

A.2.5 - Análise Microscópica das Amostras

Com o objetivo de avaliar o grau e o tipo de estrutura cristalina formada nas peças injetadas, utilizou-se a técnica de microscopia ótica com luz plano polarizada.

Com este método, torna-se possível saber se o material em questão é amorfo ou semi-cristalino, pois as áreas amorfas aparecem escurecidas, enquanto as regiões cristalinas aparecem com aspecto brilhante ou colorido [15].

Para a realização do exame, foram utilizados dois equipamentos, sendo eles um micrótomo, para o seccionamento de finas lâminas do material a ser inspecionado, e um microscópio ótico de luz plano polarizada, para a visualização das lâminas preparadas com o micrótomo.

A.2.5.1 - Procedimento de Corte e Preparação das Amostras

As amostras destinadas à realização da microscopia, foram retiradas da região indicada na figura A.4 (região que contém a linha de solda). A partir dessas amostras, foram cortadas finas películas com aproximadamente 15 μm de espessura, as quais foram montadas em suportes de vidro, para posterior observação ao microscópio ótico.

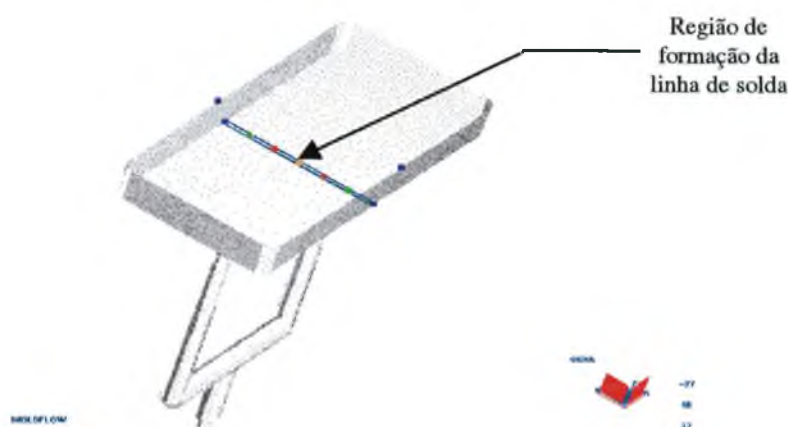


Figura A.4 - Localização da linha de solda na simulação de preenchimento.

A.2.5.2 - Resultados da Microscopia

As lâminas, contendo as películas de poliacetal e polipropileno, foram examinadas e fotografadas, sendo as fotografias apresentadas nas figuras A.6 à A.15.

Na estrutura do poliacetal, através de um exame detalhado na figura A.5, pode-se identificar, de maneira geral, 5 zonas distintas, sendo elas:

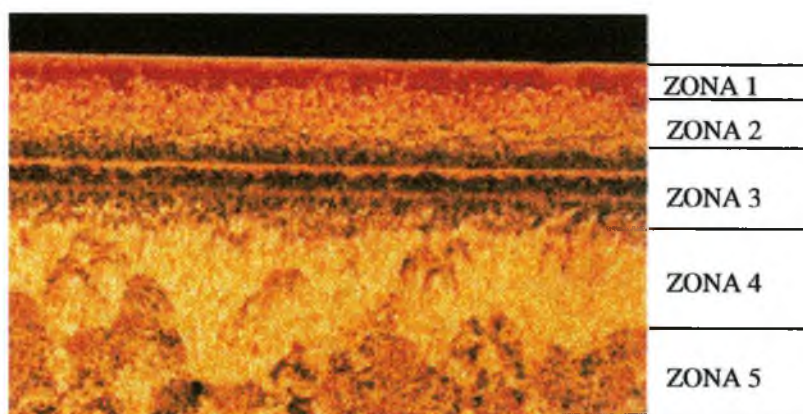


Figura A.5 – Diferentes zonas apresentadas pela estrutura morfológica de peças injetadas em poliacetal.

Zona 1 - Solidificada sob o efeito de um grande gradiente de temperatura e também sob o efeito de orientação molecular. A nucleação ocorre junto à parede do molde (zona mais fria), formando-se uma estrutura comumente designada transcristalina, também conhecida por

“paliçada”, sendo explicada pela grande densidade de nucleações junto à parede em contato com o molde, que impede o desenvolvimento normal dos esferulitos. Em vez disso, há apenas o crescimento dos fibrilos em uma única direção, seguindo a direção do gradiente de temperatura (no sentido do centro da amostra).

Zona 2 - A nucleação distribui-se de forma mais aleatória e aumenta de densidade na direção do interior. Este aumento (que ocorre apesar da temperatura aumentar para o interior), só pode ser explicado por um aumento da orientação molecular. A orientação molecular promove a nucleação, permitindo que a cristalização ocorra a temperaturas mais elevadas. Nesta zona a orientação não é suficientemente elevada para originar uma estrutura fibrosa do tipo *shish kebab*^{*}, que se observa por exemplo na casca externa do polipropileno. Contudo, a orientação é suficiente para promover um aumento do número de núcleos. Este número aumenta com o aumento da orientação molecular, o que indica que a tensão cisalhante segue um perfil com um máximo que se encontra na zona 3 (linha mais brilhante).

Zona 3 - Esta zona é a mais fina e mais brilhante, porque nela, o efeito da orientação molecular é certamente mais acentuado.

A combinação de tensão cisalhante/temperatura do fundido, atinge aqui a combinação que proporciona a máxima orientação molecular. Por isso, a estrutura se apresenta mais parecida com a casca das amostras em PP.

* Estrutura com aparência fibrosa, formada junto a casca externa, altamente orientada, de materiais semi-cristalinos, podendo ser observada na figura A.5 na zona 1.

Zona 4 – Normalmente este aspecto ocorre quando a solidificação se dá a uma velocidade de arrefecimento muito lenta (depois da cavidade do molde estar cheia), e sob o efeito de um gradiente térmico, com o centro da amostra mais quente.*

A nucleação ocorre junto à zona 3, que já estava solidificada neste momento, originando um crescimento relativamente unidirecional das estruturas cristalinas, embora um pouco diferente daquela ocorrida na zona 1, em virtude da velocidade de arrefecimento ser menor na zona 4.

Zona 5 - A estrutura é esferulítica, embora ainda revele alguma influência do gradiente de temperatura. Os esferulitos mais afastados do centro têm uma “cauda” semelhante a um cometa, que revela que o arrefecimento não foi igual em todas as direções. Apenas na zona central, os esferulitos apresentam uma nucleação aleatória/distribuída, e o crescimento apresenta uma simetria mais próxima do habitual (esferuliros esféricos).

Já as amostras retiradas das peças moldadas em polipropileno apresentam-se segundo o descrito em [20], com uma zona mais externa (casca ou pele), e um centro esferulítico (Figuras A.10 à A.14).

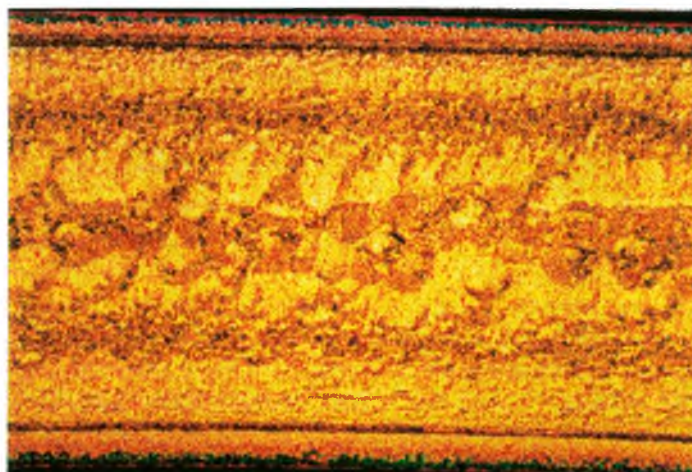


Figura A.6 – Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C1.

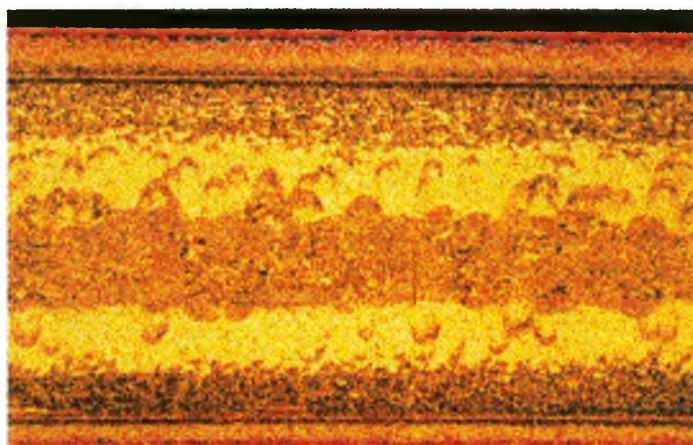


Figura A.7 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C2.

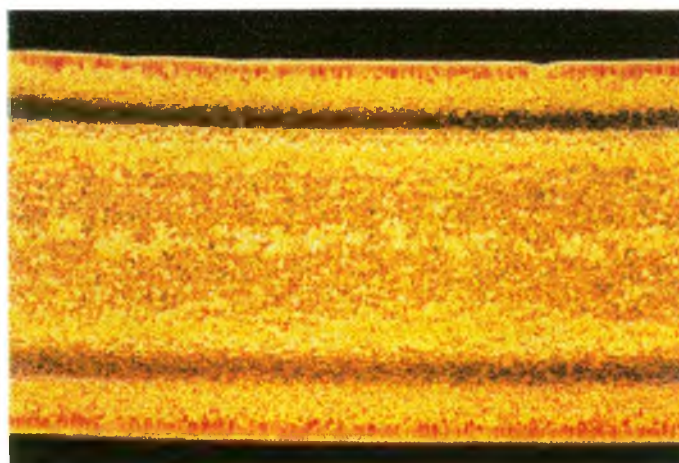


Figura A.8 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C3.

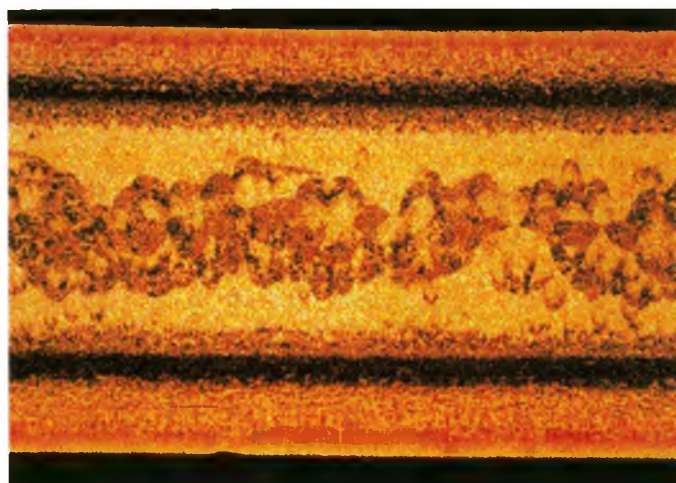


Figura A.9 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C4.

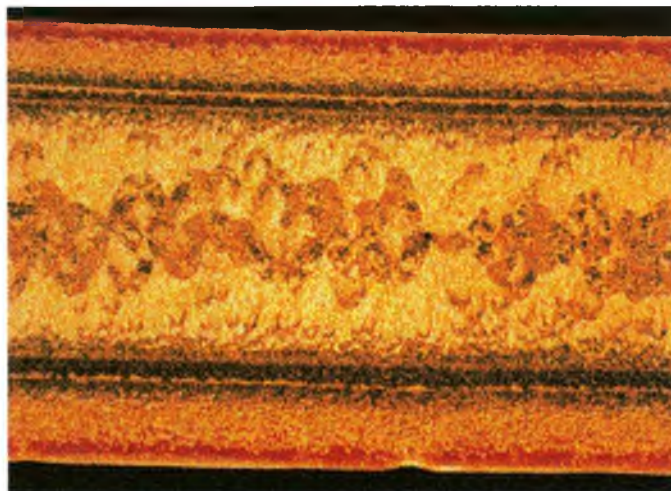


Figura A.10 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal com a condição C5.



Figura A.11 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C1.



Figura A.12 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C2.

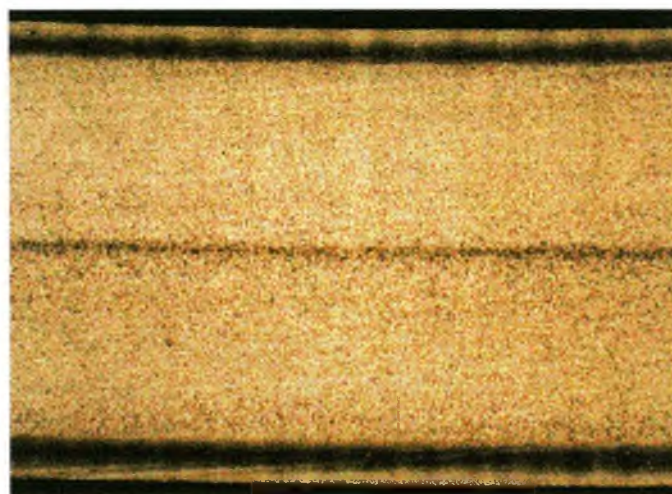


Figura A.13 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C3.



Figura A.14 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C4.

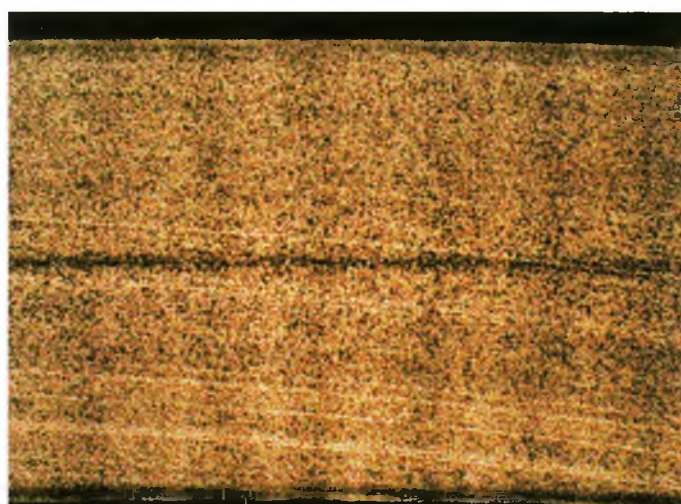


Figura A.15 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em polipropileno com a condição C4.

A.3 - Conclusões dos Resultados do Estudo de Caso

Os resultados dos ensaios de tração-impacto para os corpos de prova das peças moldadas em poliacetal estão apresentados na tabela A.6 e A.7. Nela, pode-se observar um comportamento coerente com o descrito em [8, 24, 50], para amostras contendo linhas de solda, ou seja, a resistência à tração-impacto apresenta uma redução, à medida que as condições de moldagem vão se tornando mais adversas.

Por outro lado, as amostras de polipropileno mostram um comportamento diverso ao apresentado pelo poliacetal. Nestas, há um aumento da resistência à tração-impacto (Tabela A.7 e A.8), à medida que as condições de moldagem tornam-se desfavoráveis.

Tal comportamento pode ser explicado em função do aumento da espessura da camada solidificada. Segundo [20], peças moldadas em polipropileno desenvolvem uma morfologia anisotrópica em multicamadas. De uma maneira simples, isso pode ser considerado como uma estrutura semelhante a um *sandwich*, com uma camada externa altamente orientada e com um centro esferulítico, sendo ambas dependentes das condições de processamento. Sabe-se também que a camada externa ou pele (altamente orientada) diminui com o aumento da temperatura de injeção, com o aumento da temperatura do molde e com o aumento da vazão [20].

Uma característica importante é que a camada mais externa exibe uma alta resistência. Isso explica o comportamento das amostras de polipropileno onde, com a redução das temperaturas do molde e do fundido, obtém-se cascas ou peles com maiores espessuras, resultando em uma maior resistência nos ensaios de tração-impacto.

Já as estruturas cristalinas apresentadas pelo poliacetal, mostram maior complexidade e um maior número de camadas.

Pode-se ver, através das fotografias, que as estruturas desenvolvidas em peças moldadas em poliacetal apresentam-se mais grosseiras, com esferulitos de maior tamanho.

Segundo [20], estudos realizados em material esferulítico indicam que quanto mais as estruturas semicristalinas crescem menor é a quantidade de material inter-esferulítico, resultando em contornos inter-esferulíticos mais fracos, reduzindo assim sua performance em situações de impacto.

A partir da análise das fotografias apresentadas nas figuras A.6 à A.10, pode ser verificada uma tendência no crescimento dos esferulitos, à medida que as condições de moldagem vão se tornando piores. Desta forma, segundo o que foi citado anteriormente, pode ser explicada a redução da resistência mecânica dos corpos de prova em poliacetal.

Além disso, à medida que as condições tornam-se mais adversas, há também o surgimento de vazios, como pode ser visto na figura A.16 (amostra C5), o que contribui ainda mais para a redução da resistência à tração-impacto dos corpos de prova.

Quanto à avaliação visual, as peças moldadas em poliacetal não apresentaram a ranhura característica na formação de linhas de solda quando vistas a olho nú, nem quando observadas ao microscópio ótico. No entanto, as amostras moldadas em polipropileno, apresentam a formação de tais ranhuras.

O motivo de tal acontecimento não pode ser determinado com exatidão, porém pode estar relacionado às menores temperaturas do molde e pressões, utilizadas na moldagem das peças em polipropileno.



Figura A.16 - Micrografia de amostra retirada de peça injetada em poliacetal, com a condição C5, na qual há a formação de um vazio estrutural.