

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

**PARÂMETROS DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS EM
MOLDES FABRICADOS POR ESTEREOLITOGRAFIA COM RESINA SOMOS
7110[®]**

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

FÁBIO ANDRÉ BUSATO

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2004.

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

**PARÂMETROS DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS EM
MOLDES FABRICADOS POR ESTEREOLITOGRAFIA COM RESINA SOMOS
7110[®]**

FÁBIO ANDRÉ BUSATO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
FABRICAÇÃO, APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. – Orientador

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. – Coordenador do POSMEC

Banca Examinadora

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. – Presidente

Prof. Paulo A. P. Wendhausen, Dr. Ing.

Prof. Gean Salmoria, Dr. Ing.

Quando falares, cuida para que tuas palavras sejam melhores que o silêncio
(Provérbio indiano).

Meus sinceros
agradecimentos aos meus pais,
à Patrícia, aos meus amigos e
a todos que de alguma forma
acreditaram e contribuíram
para a realização do trabalho
de mestrado.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Henrique Ahrens pela orientação durante a realização do trabalho.

Aos meus pais, Dário e Nilda, pelo apoio durante todos estes anos de estudo.

À UFSC, ao PÓSMEC e ao CIMJECT pela oportunidade de freqüentar uma das melhores instituições do país.

À CAPES pelo apoio financeiro durante o período de mestrado.

À SOCIESC pela oportunidade de trabalhar durante a conclusão do mestrado.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Fred, Fraga, Gean, Foggiatto, Lafratta, Diovane, Armando e a todos que contribuíram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
ABREVIATURA.....	xiii
SIMBOLOGIA	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.2. DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS.....	7
2.1. O PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	7
2.1.1. VARIÁVEIS DE PROCESSO.....	7
PRESSÃO DE INJEÇÃO.....	7
PRESSÃO DE RECALQUE.....	8
CONTRAPRESSÃO.....	9
TEMPERATURA DO CILINDRO / MASSA.....	9
TEMPERATURA DO MOLDE.....	9
VELOCIDADE DE INJEÇÃO.....	10
ROTAÇÃO DA ROSCA.....	10
2.1.2. LIMPEZA DO CILINDRO E INÍCIO DA PRODUÇÃO.....	10
2.1.3. PREPARAÇÃO DO MATERIAL.....	10
2.1.4. O CICLO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	11
2.1.5. CURVAS DE PRESSÃO E TEMPERATURA NO CICLO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	12
2.1.6. REPRESENTAÇÃO DAS FASES DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	14
2.2. SISTEMAS CAE NO PROJETO DE PEÇAS E MOLDES PARA TERMOPLÁSTICOS.....	16
3. PROTOTIPAGEM E FERRAMENTAL RÁPIDO.....	19
3.1. PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	19
3.1.1. APLICAÇÕES DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	20
3.1.2. ETAPAS DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	20
3.1.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	21
3.1.4. O FUTURO E AS CONCLUSÕES SOBRE A TÉCNICA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	22
3.2. FERRAMENTAL RÁPIDO.....	23
3.2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE FERRAMENTAL RÁPIDO.....	24
3.2.2. CLASSIFICAÇÃO DO FERRAMENTAL RÁPIDO SEGUNDO O MÉTODO DE CONSTRUÇÃO.....	25
MÉTODO DIRETO.....	25
MÉTODO INDIRETO.....	25
3.2.3. CLASSIFICAÇÃO DO FERRAMENTAL RÁPIDO SEGUNDO A QUANTIDADE DE PEÇAS PRODUZIDAS.....	26

FERRAMENTAL MACIO (SOFT TOOLING).....	26
FERRAMENTAL MÉDIO (BRIDGE TOOLING).....	26
FERRAMENTAL DURO (HARD TOOLING).....	26
3.2.4. FERRAMENTAL RÁPIDO X FERRAMENTAL CONVENCIONAL.....	26
FERRAMENTAL RÁPIDO.....	26
FERRAMENTAL CONVENCIONAL.....	26
3.2.5. O FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	27
3.2.6. TIPOS DE INSERTOS UTILIZADOS EM FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	27
INSERTO SÓLIDO.....	27
INSERTO COM CANAL DE REFRIGERAÇÃO INCORPORADO.....	28
INSERTO EM CASCA.....	30
INSERTO ALETADO.....	31
3.2.7. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	33
CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS.....	33
ESPESSURA DE CASCA.....	33
PÓS-CURA.....	34
AGENTES DESMOLDANTES.....	34
ÂNGULOS DE SAÍDA.....	34
FALHA DO INSERTO.....	34
MATERIAL DE PREENCHIMENTO DA PARTE POSTERIOR DOS INSERTOS.....	35
EFEITO ESCADA.....	35
3.2.8. DIFERENÇA DA FORÇA DE EXTRAÇÃO ENTRE PP, ABS E PA 6,6.....	36
4. DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO.....	39
4.1. ESCOPO DA PESQUISA.....	39
4.2. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA – ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3.....	39
4.3. PROJETO DOS INSERTOS – ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3.....	39
4.3.1. PROJETO DO INSERTO DE AÇO – ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3.....	40
4.3.2. PROJETO DO INSERTO DE ESTEREOLITOGRAFIA – ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3.....	42
4.4. MODELOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO – ESTUDOS DE CASO 2 E 3.....	45
4.4.1. IMPORTAÇÃO DO MODELO CAD.....	46
4.4.2. TIPO DE MALHA E NÚMERO DE ELEMENTOS.....	46
4.4.3. SELEÇÃO DA RESINA TERMOPLÁSTICA PARA OS ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3.....	47
4.4.4. SELEÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE.....	48
4.4.5. ADEQUAÇÃO DOS DIFERENTES MATERIAIS DO MOLDE NA PEÇA E NO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO..	48
4.4.6. MODELAGEM DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO.....	49
4.4.7. MODELAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	49
4.4.8. PROCEDIMENTO PARA A CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA INJETORA NO SOFTQERE.....	52
4.4.9. PROCEDIMENTO PARA CONFIGURAÇÃO DO CICLO DE INJEÇÃO.....	54
4.5. PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM COMUNS AOS ESTUDOS DE CASOS.....	56
4.5.1. MOLDAGEM DO PP – ESTUDO DE CASO 1.....	57
MOLDAGEM COM O INSERTO DE AÇO – PP.....	58
MOLDAGEM COM O INSERTO DE ESTEREOLITOGRAFIA – PP.....	58

4.5.2. MOLDAGEM E SIMULAÇÃO DO ABS – ESTUDO DE CASO 2.....	59
MOLDAGEM COM O INSERTO DE AÇO – ABS.....	60
MOLDAGEM COM O INSERTO DE ESTEREOLITOGRAFIA – ABS.....	62
SIMULAÇÃO COM OS MODELOS DO INSERTO DE AÇO E ESTEREOLITOGRAFIA – ABS.....	62
4.5.3. MOLDAGEM E SIMULAÇÃO DO PA 6,6 – ESTUDO DE CASO 3.....	63
MOLDAGEM COM O INSERTO DE AÇO – PA 6,6.....	64
MOLDAGEM COM O INSERTO DE ESTEREOLITOGRAFIA – PA 6,6.....	65
SIMULAÇÃO COM OS MODELOS DO INSERTO DE AÇO E ESTEREOLITOGRAFIA – PA 6,6.....	65
5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1. MOLDAGEM DO PP – ESTUDO DE CASO 1.....	66
5.1.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NOS INSERTO DE AÇO E DE ESTEREOLITOGRAFIA.....	66
5.2. MOLDAGEM E SIMULAÇÃO DO ABS – ESTUDO DE CASO 2.....	71
5.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NO INSERTO DE AÇO E DE ESTEREOLITOGRAFIA.....	71
5.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NO INSERTO DE AÇO.....	76
5.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NO INSERTO DE ESTEREOLITOGRAFIA.....	81
5.2.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS CAE UTILIZADOS NO PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	87
5.2.5. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE CAE NO PROJETO DE INSERTOS.....	89
5.3. MOLDAGEM E SIMULAÇÃO DO PA 6,6 – ESTUDO DE CASO 3.....	95
5.3.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NO INSERTO DE AÇO E DE ESTEREOLITOGRAFIA.....	96
5.3.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NO INSERTO DE AÇO.....	99
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	102
6.1. CONCLUSÕES.....	102
6.2. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXO 1.....	114
ANEXO 2.....	118
ANEXO 3.....	120
ANEXO 4.....	123
ANEXO 5.....	126
ANEXO 6.....	127
ANEXO 7.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo de moldagem por injeção convencional.....	11
Figura 2.2 – Curva de pressão versus tempo no ciclo de injeção convencional.....	12
Figura 2.3 – Curva de temperatura versus tempo no ciclo de injeção convencional.....	13
Figura 2.4 – Situação da peça e do ponto de injeção durante o ciclo de injeção.....	13
Figura 2.5 – Fase de plastificação.....	14
Figura 2.6 – Fase de injeção.....	14
Figura 2.7 – Fase de resfriamento.....	15
Figura 2.8 – Fase de extração.....	15
Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de estereolitografia.....	22
Figura 3.2 – Método direto de construção de ferramental.....	25
Figura 3.3 – Método indireto de construção de ferramentas.....	25
Figura 3.4 – Representação esquemática do inserto sólido.....	28
Figura 3.5 – Inserto sólido.....	28
Figura 3.6 – Representação esquemática de um inserto <i>conformal cooling</i>	29
Figura 3.7 – Inserto <i>conformal cooling</i> e peças injetadas.....	29
Figura 3.8 – Representação esquemática do inserto em casca.....	30
Figura 3.9 – Inserto em casca com canais de refrigeração.....	31
Figura 3.10 – Representação esquemática do inserto aletado.....	32
Figura 3.11 – Inserto aletado.....	33
Figura 3.12 – Origem comum de falha em insertos de estereolitografia.....	36
Figura 3.13 – Força de extração versus ângulo de saída para PP, ABS e PA.....	37
Figura 3.14 – Força de extração versus espessura de camada para PP, ABS e PA.....	38
Figura 3.15 – Efeito escada em superfícies inclinadas.....	38
Figura 4.1 – Corpo de prova de tração modelado em CAD.....	40
Figura 4.2 – Corte longitudinal do inserto em aço.....	41
Figura 4.3 – Detalhe do posicionamento do termopar no inserto de aço.....	41
Figura 4.4 – Detalhes do equipamento de aquecimento.....	42
Figura 4.5 – Sistema de aquisição de sinais Pico Log – TC 08.....	43
Figura 4.6 – Corte no inserto móvel de estereolitografia mostrando a localização dos termopares.....	44
Figura 4.7 – Vistas do modelo CAE com sistema de alimentação e de refrigeração para o inserto de aço.....	45
Figura 4.8 – Vistas do modelo CAE com sistema de alimentação e refrigeração para o inserto de estereolitografia.....	45
Figura 4.9 – Janela para a seleção da resina termoplástica no banco de dados do software de simulação.....	47

Figura 4.10 – Janelas com parâmetros dos diferentes materiais de molde utilizados.....	49
Figura 4.11 – Parâmetros dos canais de refrigeração – inserto de aço.....	50
Figura 4.12 – Parâmetros do fluido refrigerante – inserto de aço.....	50
Figura 4.13 – Parâmetros dos canais de refrigeração – inserto de estereolitografia.....	51
Figura 4.14 – Parâmetros do fluido refrigerante – inserto de estereolitografia.....	51
Figura 4.15 – Descrição da máquina injetora.....	52
Figura 4.16 – Descrição da unidade de injeção da máquina injetora.....	53
Figura 4.17 – Descrição da unidade hidráulica da máquina injetora.....	53
Figura 4.18 – Descrição da unidade de fechamento da máquina injetora.....	53
Figura 4.19 – Configuração para o controle da fase de preenchimento e refrigeração.....	54
Figura 4.20 – Configuração para o controle da fase de recalque.....	55
Figura 4.21 – Perfil de pressão de recalque para a fase de recalque.....	55
Figura 4.22 – Configuração para o controle da temperatura de injeção, do molde e o tempo de molde aberto.....	56
Figura 5.1 – Comparação entre os parâmetros de injeção do polipropileno no inserto de aço e estereolitografia.....	66
Figura 5.2 – Comparação entre os parâmetros de injeção do polipropileno no inserto de aço e estereolitografia.....	67
Figura 5.3 – peças em polipropileno antes e após a fase de ajustamento.....	71
Figura 5.4 – Comparação entre os parâmetros de injeção do ABS no inserto de aço e estereolitografia.....	72
Figura 5.5 – Comparação entre os parâmetros de injeção do ABS no inserto de aço e estereolitografia.....	72
Figura 5.6 – Peças moldadas em ABS nos ferramentais de aço e estereolitografia.....	76
Figura 5.7 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção e de recalque experimental e simulada para o inserto de aço.....	78
Figura 5.8 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.....	78
Figura 5.9 – Comparação entre as curvas de vazão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.....	79
Figura 5.10 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de aço.....	79
Figura 5.11 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de aço.....	80
Figura 5.12 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção e de recalque experimental e simulada para o inserto de estereolitografia.....	82
Figura 5.13 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção experimental e simulada para o inserto de estereolitografia.....	83

Figura 5.14 – Comparação entre as curvas de vazão de injeção experimental e simulada para o inserto de estereolitografia.....	84
Figura 5.15 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de estereolitografia.....	84
Figura 5.16 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de estereolitografia.....	85
Figuras 5.17 – Representação gráfica comparativa entre os valores dos dois modelos CAE....	88
Figuras 5.18 – Representação gráfica comparativa entre os valores dos dois modelos CAE....	89
Figuras 5.19 – Modelo do ponto de injeção “original”.....	90
Figuras 5.20 – Modelo do ponto de injeção “original modificado”.....	90
Figuras 5.21 – Modelo do ponto de injeção “semicircular”.....	91
Figuras 5.22 – Modelo do ponto de injeção “retangular”.....	91
Figura 5.23 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo original”.....	91
Figura 5.24 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo original modificado”	92
Figura 5.25 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo semicircular”...	92
Figura 5.26 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo retangular”.....	92
Figura 5.27 – Comparação entre a simulação CAE dos diferentes pontos de injeção.....	94
Figura 5.28 – Comparação entre a simulação CAE dos diferentes pontos de injeção.....	94
Figura 5.29 – Comparação entre a simulação CAE dos diferentes pontos de injeção.....	95
Figura 5.30 – Superfície do inserto de estereolitografia após moldagem com o PA 6,6.....	96
Figura 5.31 – Comparação entre os parâmetros de injeção do ABS no inserto de aço e estereolitografia.....	97
Figura 5.32 – Comparação entre os parâmetros de injeção do ABS no inserto de aço e estereolitografia.....	97
Figura 5.33 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção e de recalque experimental e simulada para o inserto de aço.....	100
Figura 5.34 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.....	101
Figura 5.35 – Comparação entre as curvas de vazão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.....	101
Figura A1 – Geometria utilizada por KREPLIN (2000).....	116
Figura A2 – Geometria utilizada por HARRIS & DICKENS (2001).....	116
Figura A3 – Geometria utilizada por ARCIPRETE et al. (1999).....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação entre alguns tipos de ferramental rápido.....	24
Tabela 4.1 – Comparação entre o número de elementos e a precisão dos resultados do modelo CAE.....	46
Tabela 4.2 – Comparação entre raio de aspecto dos modelos utilizados.....	47
Tabela 4.3 – Parâmetros de injeção de referência utilizados com o PP H301.....	57
Tabela 4.4 – Parâmetros de injeção de referência utilizados com o ABS Cicolac GPM 6300 da GE Plastics.....	60
Tabela 4.5 – Parâmetros de injeção de referência utilizados com a poliamida Technyl A216 da Rhodia.....	63
Tabela 5.1 – Parâmetros de entrada para a simulação no inserto de aço.....	76
Tabela 5.2 – Parâmetros de entrada para a simulação no inserto de estereolitografia.....	81
Tabela 5.3 – Tabela comparativa entre as dimensões do sistema de alimentação.....	89
Tabela 5.4 – Parâmetros de entrada para a simulação no inserto de aço.....	99
Tabela A1 – Parâmetros de processo utilizados no CIMJECT.....	114
Tabela A2 – Parâmetros de processo utilizados por GOMIDE (2000).....	114
Tabela A3 – Resultados de testes executados pela 3D Systems.....	115
Tabela A4 – Resultados de testes executados por AHRENS ² (2002).....	115
Tabela A5 – Resultados de testes executados por KREPLIN (2000).....	115
Tabela A6 – Resultados de testes executados por HARRIS & DICKENS (2001).....	116
Tabela A7 – Resultados de testes executados por ARCIPRETE et al. (1999).....	117
Tabela A8 – Resultados de testes executados por CEDORGE & COLTON (2000).....	117
Tabela A9 – Propriedades dos materiais (MATWEB 2002 & DUSEL 1998).....	122
Tabela A10 – Guia genérico de problemas e soluções para o processo de moldagem por injeção.....	126
Tabela A11 – Propriedades dos materiais (MATWEB 2002 & DUSEL 1998).....	130

ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
2D	Bidimensional
ACES™	<i>Accurate Clear Epoxy Solid</i> - estilo de construção na estereolitografia
AIM	<i>ACES Injection Molding</i>
Direct AIM™ tooling	ACES™ Injection Molding
SL	<i>Stereolithography</i> ou Stereolitografia
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i> ou Máquina de Estereolitografia
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> ou Sinterização Seletiva à Laser
STL	<i>Stereolithography Files</i> , formato padrão de arquivos para RP
IGES	<i>International Graphcs Exchange Standard</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> ou Projeto Assistido por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engeneering</i> ou Engenharia Assistida por Computador
RP	Rapid Prototyping ou Prototipagem Rápida
RT	Rapid Tooling ou Ferramental Rápido
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> ou Fusão e Deposição de Materiais
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> ou Fabricação de Objetos por Laminação
ABS	Acrilonitrila – Butadieno – Estireno
PA 6,6	Poliamida 6,6
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
POM	Polioximetileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
UV	Ultra Violeta

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:		
c_p	Calor específico	[J/kgK]
C_p	Capacidade calorífica	[J/m ³ °C]
k	Condutividade térmica	[W/m°C]
Alfabeto Grego:		
ρ	Densidade	[kg/m ³]
λ	Comprimento de onda	[nm]
α	Coeficiente de expansão térmica	[m/m°C]
λ	Difusividade térmica	[m ² /s]

RESUMO

Este trabalho consistiu em avaliar comparativamente os principais parâmetros envolvidos no processo de moldagem por injeção, utilizando os termoplásticos PP, ABS e PA 6,6, em insertos fabricados pelo processo convencional em aço ABNT 1045 e pelo processo de ferramental rápido por estereolitografia. As cavidades selecionadas tiveram todas a mesma forma geométrica, qual seja, a de corpos de prova normalizados para ensaios de tração segundo a norma ASTM D-638m. Para a comparação, os parâmetros: temperatura de injeção do termoplástico, temperatura inicial da cavidade, volume e vazão de injeção, tempo de injeção, contrapressão e rotação da rosca, foram considerados como referência e tiveram o mesmo valor nos dois tipos de ferramental. Como consequência, os parâmetros de resposta variaram em função do tipo de termoplástico e do ferramental utilizado, sendo as vezes superior e as vezes inferior. As exceções foram os parâmetros: tempo de molde aberto, tempo de ciclo e temperatura final da cavidade, que para os três termoplásticos utilizados sempre foram superiores aos da moldagem convencional. Um sistema CAE comercial para a simulação do processo de moldagem por injeção também foi utilizado para comparar os resultados experimentais com os simulados, nos insertos de aço e de estereolitografia. Com relação à pressão máxima de injeção utilizando o ABS, a simulação apresentou valores 15% superiores aos experimentais, nos dois tipos de ferramental e, valores 7% superiores na moldagem convencional com o PA 6,6. A temperatura experimental máxima da cavidade foi 5% superior à temperatura média simulada e 20% inferior à máxima simulada com o ABS no inserto de estereolitografia. O método da injeção progressiva (Anexo 2), as recomendações para a moldagem convencional (Anexo 7) e as recomendações para a moldagem em insertos de estereolitografia (Anexo 3) se demonstraram úteis na fase de determinação dos parâmetros de processo. Além disso, as recomendações para a simulação do processo de injeção em insertos de estereolitografia (Anexo 4), também foram úteis na construção e execução das análises no sistema CAE e para o projeto de insertos, podendo ser utilizadas como base para futuros trabalhos.

Palavras-chave: moldagem por injeção, prototipagem rápida, ferramental rápido.

ABSTRACT

This work consisted in evaluating comparatively the main parameters involved in the injection molding process, using thermoplastics PP, ABS and PA 6,6, in stereolithography and steel (ABNT 1045) molds. The two cavities had the same geometric form, which are, standard dumbbell-shaped test specimens for traction essays according to norm ASTM D-638m. For the comparison, the parameters: melt temperature, initial mold temperature, injection volume, flow rate, injection time, counter-pressure and rotation of the thread, were considered as reference and had the same value in the two types of molds. As a consequence, the response parameters varied due to the type of thermoplastic and mold used, being the times at times superior and at times inferior. The exceptions were the parameters: open mold time, cycle time and final mold temperature, which, for the three thermoplastic used, had always been superior to the conventional molding. A commercial system CAE for the simulation of the injection molding process was also used to compare the experimental results with the simulated ones, in the steel and stereolithography molds. With regard to maximum injection pressure using the ABS, the simulation presented values 15% higher than the experimental in the two types of molds, and values 7% higher than conventional molding with the PA 6,6. The maximum experimental temperature of the cavity was 5% higher than the average temperature simulated, and 20% lower than the maximum simulated with the ABS in the stereolithography mold. The short shot method (Annex 2), the recommendations for the conventional molding (Annex 7) and the recommendations for the molding in stereolithography molds (Annex 3) demonstrated to be useful in the phase of determination of the process parameters. Moreover, the recommendations for the simulation of the injection molding process in stereolithography molds (Annex 4), were also useful in the construction of the model and execution of the analyses in the CAE system and for the design of molds, being able to be used as a basis for future works.

Keywords: injection molding, rapid prototyping, rapid tooling.

1 – INTRODUÇÃO

O projeto e desenvolvimento de moldes, pelos métodos convencionais, além de longo é caro. Visando reduzir tempo e custo, novas tecnologias envolvendo os processos de fabricação por adição de camadas para a confecção de ferramental rápido foram e estão sendo desenvolvidas (GOMIDE, 2000). Com os processos conhecidos como *rapid tooling* ou ferramental rápido é possível desenvolver um molde capaz de produzir de "centenas até milhares de peças protótipos" com custo e prazo de entrega bem menores do que o de um molde definitivo. Este processo é ideal para a produção de pequenos lotes de peças, onde o desenvolvimento de um molde definitivo tornaria inviável o custo do produto. Além disso, também pode ser aplicado na obtenção de um lote piloto, para diversas análises antes da fabricação do molde definitivo (testes de mercado, montabilidade, funcionalidade) e a produção de um protótipo com o mesmo material da peça final.

Dos diversos processos de manufatura por adição de camadas, a estereolitografia é uma das técnicas mais difundidas, apresentando o maior número de máquinas instaladas no mercado (WOHLERS², 2000). Direct AIM™ é o processo padrão em estereolitografia utilizado na construção de insertos na forma de casca, o qual pode ser empregado na moldagem por injeção de termoplásticos. Esse também é o método no qual já foram e estão sendo desenvolvidos vários trabalhos no laboratório CIMJECT. Os insertos fabricados pelo processo de estereolitografia, dependendo da complexidade da geometria e do termoplástico a ser injetado, podem produzir em torno de 200 peças com boa qualidade e precisão dimensional, sendo que o seu tempo de fabricação é de 2 a 3 semanas.

A grande vantagem do processo de ferramental rápido por estereolitografia, comparado ao molde convencional na produção de pequenos lotes de peças injetadas, se encontra no menor tempo de confecção do inserto, baixo custo de produção e a boa precisão dimensional do produto final. Também cabe ressaltar que pequenos problemas de rebarbas não inviabilizam a moldagem, devido ao pequeno tamanho do lote.

Vários são os fatores que influenciam o processo de moldagem por injeção, sendo que para um mesmo molde, diferentes condições de processo podem ser utilizadas de acordo com cada termoplástico ou o resultado que se deseja. Atualmente, o processo de moldagem por injeção é baseado na experiência prática dos operadores e em recomendações de processamento fornecidas por fabricantes de máquinas e de matéria-prima. As recomendações se encontram na forma de

tabelas onde, em função do tipo de material termoplástico, são sugeridas janelas de processamento, ou seja, faixas de parâmetros de processamento tais como: temperatura de injeção, temperatura da cavidade do molde, contração do material, velocidade de injeção. Entretanto, apesar da moldagem convencional de termoplásticos já ser bem difundida e dominada pelos processistas, o processo de moldagem por injeção, em insertos fabricados pelo ferramental de estereolitografia, é um processo novo. Além disso, o ferramental rápido por estereolitografia é construído com uma resina que possui uma condutividade térmica entre 150 e 300 vezes menor do que a condutividade térmica do aço (DUSEL et al, 1998). Como consequência, ocorre um aumento no ciclo de injeção, principalmente devido ao maior tempo necessário para o resfriamento da peça até sua temperatura de extração, e principalmente até o molde atingir a temperatura para um novo ciclo.

Problemas relacionados com a utilização de diferentes materiais no sistema de alimentação do inserto também podem ocorrer. Assim, deve haver uma compensação em função da diferença de condutibilidade térmica entre a bucha de injeção (em aço), o restante do sistema de distribuição e o ponto de injeção (resina SL), para que o ponto de injeção solidifique primeiro, evitando problemas devido à falta de compactação do material da peça injetada.

A baixa temperatura de transição vítrea¹ da resina de estereolitografia, ao ser ultrapassada, promove uma brusca queda de resistência mecânica no inserto. Essa queda na resistência, em conjunto com as solicitações, devido à pressão de injeção do termoplástico no interior da cavidade, aliada à força de extração, geralmente são os maiores responsáveis pela falha do inserto. O critério adotado para o fim da vida do inserto geralmente está relacionado com falhas mecânicas, as quais comumente se manifestam através do lascamento das bordas próximas à linha de fechamento e pela deformação das cavidades do inserto, sendo que esses problemas provocam a perda da forma e da precisão dimensional da peça. Assim, é fato que para o processo de injeção em insertos de estereolitografia, por ser um processo relativamente novo em relação ao processo convencional, ainda não existem estudos comparativos entre as condições de processamento em função do termoplástico injetado.

¹Temperatura de transição vítrea (*t_g*) é aquela acima da qual alguns materiais, como os termofixos, no estado sólido, apresentam um amolecimento e significativas perdas nas propriedades mecânicas.

Atualmente, as recomendações para a moldagem convencional são utilizadas como ponto de partida na moldagem em insertos fabricados por estereolitografia. Porém, devido à limitação das propriedades termomecânicas da resina, em relação ao aço, algumas modificações no projeto do inserto são realizadas com o objetivo de amenizar as altas taxas de pressão e temperaturas que o inserto é submetido durante a moldagem. Desta forma, esse trabalho tem como objetivo comparar a moldagem convencional à moldagem em insertos fabricados pelo processo de estereolitografia, com três tipos de termoplásticos. Um sistema CAE (*Computer Aided Engeneering*), próprio para a simulação do processo de moldagem por injeção, será utilizado como forma de auxílio a visualização do efeito provocado pelas modificações do projeto nos parâmetros de processamento do inserto.

1.1 – ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com o advento dos processos de prototipagem rápida, que utilizam a técnica de fabricação por adição de camadas na confecção de protótipos para visualização e/ou testes de montagem, surgiu a oportunidade de fabricar insertos para a injeção de termoplásticos. Estes insertos têm, como principal vantagem, a redução do tempo de fabricação de um molde para a obtenção de peças injetadas no material final do produto desejado com um custo relativamente baixo, se comparados aos moldes tradicionais.

O ferramental rápido direto, obtido por estereolitografia, é indicado para a obtenção de pequenos lotes de peças para a avaliação da concepção do produto ou até mesmo como produto final. A reduzida vida útil do inserto de estereolitografia, que em média possibilita a obtenção de 200 peças, se deve principalmente à fragilidade ocasionada pela baixa resistência mecânica e à baixa condutibilidade térmica da resina utilizada na sua fabricação. Devido à fragilidade do inserto, algumas modificações no projeto são necessárias, para que a sua vida seja prolongada. Quanto aos parâmetros de injeção, o ponto de partida é a moldagem convencional. Desta forma, apesar do trabalho também tratar da moldagem convencional, ele estará totalmente voltado à comparação dos parâmetros e das condições de processamento de termoplásticos entre a moldagem convencional em aço e o ferramental rápido por estereolitografia. Também deverá avaliar a potencialidade do uso de sistemas CAE (*Computer Aided Engeneering*) na previsão do comportamento dos parâmetros de processo de acordo com as modificações no projeto do inserto.

A motivação para a realização do trabalho encontra-se principalmente na falta de informações referentes ao comportamento do termoplástico e do molde, na moldagem com materiais de maior dificuldade de processamento. A grande dificuldade reside no fato de materiais de engenharia como o ABS e o PA 6,6, utilizarem maiores temperaturas de injeção e de molde quando comparados a *comodities* como PP e o PE, por exemplo. Isso é um inconveniente, pois maiores temperaturas de injeção, além de acarretarem um considerável aumento do ciclo de injeção, também favorecem a falha do inserto por fadiga térmica e mecânica. Como fatores secundários de motivação pode-se citar: a facilidade, o curto espaço de tempo e o baixo custo de produção de pequenos lotes de peças em termoplásticos, utilizando ferramental rápido em estereolitografia. Além disso, deve-se considerar que as peças obtidas pelo processo de moldagem em insertos de estereolitografia fornecem protótipos fabricados com o mesmo material do produto final ou, como no caso de pequenos lotes de peças, o inserto já pode ser utilizado como molde definitivo.

1.2 – DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO

Este trabalho segue uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes Plásticos Injetados (CIMJECT). Graças à infraestrutura disponível ao laboratório, que conta com uma máquina injetora de termoplásticos, uma máquina de prototipagem rápida, estações de trabalho e modernos sistemas CAD e CAE, é possível desenvolver trabalhos de bom nível nestas áreas. Por sua vez, este trabalho tem como objetivo dar seqüência aos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos no CIMJECT, de maneira a comparar a moldagem convencional com a moldagem em insertos fabricados por estereolitografia, no que diz respeito aos parâmetros de processamento. Isso porque, como já comentado, a fragilidade do inserto se agrava quando submetido às adversas condições de processamento durante o preenchimento das cavidades, como também pelos esforços a que é submetido durante o processo de extração da peça. A ocorrência de elevadas forças de extração é consequência da aderência entre a peça e o molde devido ao efeito escada (rugosidade) que é intrínseco ao processo de fabricação por adição de camadas.

Neste trabalho, será utilizado um inserto de aço (ABNT 1045) e um inserto de estereolitografia com uma cavidade para a moldagem de um corpo de prova para ensaio de tração, segundo a norma ASTM D 638m. Os termoplásticos utilizados

serão: PP, ABS e PA 6,6. Um sistema CAE comercial (Moldflow[®] 3.1) também será adequado para auxiliar na previsão dos parâmetros de processamento, comportamento da temperatura do inserto durante o processo de injeção e previsão das modificações de projeto no ferramental rápido por estereolitografia. Assim, o trabalho limitar-se-á a utilizar sistemas CAD e CAE no projeto de insertos de estereolitografia, para a moldagem por injeção de três materiais termoplásticos, entre eles dois materiais de engenharia. Um estudo comparativo das condições de processo entre a moldagem convencional e a moldagem em insertos de estereolitografia também será realizado, pelo fato do processo de injeção nos insertos de estereolitografia ser baseado nas recomendações para a moldagem convencional.

1.3 – OBJETIVOS

Como parte complementar da linha de pesquisa na área de ferramental rápido, que vem sendo desenvolvida no laboratório do CIMJECT, este trabalho tem como objetivo geral comparar o processo de moldagem por injeção em ferramental convencional com o ferramental obtido por estereolitografia, no que diz respeito aos parâmetros de processo.

Adicionalmente, como objetivos específicos, têm-se:

- i. Obter peças de boa qualidade visual e superficial, ou seja, bem preenchidas e livre de defeitos visíveis a olho nu, como rebarbas e rechupes, utilizando materiais de engenharia;
- ii. Aperfeiçoar as recomendações para o processo de moldagem por injeção em insertos de estereolitografia (Anexo 3);
- iii. Aperfeiçoar as recomendações para a simulação do processo de moldagem por injeção em insertos de estereolitografia (Anexo 4), com base na utilização de um sistema CAE comercial;
- iv. Adequar e avaliar a utilização de um sistema CAE comercial para a simulação do processo de moldagem por injeção de termoplásticos no projeto de insertos de estereolitografia;
- v. Avaliar a utilização do método da injeção progressiva (Anexo 2), das recomendações de processamento para a moldagem convencional fornecidas pelos fabricantes de materiais termoplásticos e de máquinas (Anexo 7), na determinação dos parâmetros de injeção em insertos de estereolitografia;

- vi. Promover e documentar uma base de dados (anexo 1) no que tange aos parâmetros do processo de moldagem por injeção em insertos de estereolitografia.

1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento e a apresentação do trabalho foram divididos em cinco capítulos, além do capítulo inicial de introdução e dos anexos. Abaixo segue um resumo do que se encontra em cada um destes capítulos.

- **Capítulo 02 e 03 (Revisão Bibliográfica):** Estes capítulos abordam os principais conceitos referentes ao estado da arte em termos de ferramental rápido por estereolitografia, conceitos básicos sobre moldagem por injeção e algumas considerações sobre a utilização de sistemas CAE na moldagem por injeção.
- **Capítulo 04 (Descrição dos Estudos de Caso):** Neste capítulo são descritos os procedimentos de como foram preparados e executados os estudos de caso realizados neste trabalho. Informações referentes a normas e configuração de máquinas e equipamentos se fazem presentes.
- **Capítulo 05 (Resultados obtidos e Discussões):** São apresentados e discutidos os resultados obtidos com a realização dos estudos de caso.
- **Capítulo 06 (Conclusões e Sugestão para novos trabalhos):** Com base nos resultados obtidos, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado e sugestões para a sua continuação.
- **Anexos:** Nos anexos são apresentados uma pequena base de dados de parâmetros de injeção utilizados em ferramental por estereolitografia, o método da injeção progressiva, recomendações para a moldagem convencional, recomendações para o processo de injeção e simulação em ferramental por estereolitografia, um guia de problemas e soluções na moldagem por injeção e a lista de equipamentos e materiais utilizados nos estudos de caso.

CAPÍTULO 2 – PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS

2.1 – O PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

Segundo a GE Plastics (2003), os termoplásticos são facilmente processados em injetoras convencionais, desde que possuam no mínimo três zonas de aquecimento com controle de temperatura individual, os quais devem ser periodicamente calibrados a fim de manter a precisão necessária ao processo. Cada material possui características reológicas que exigem desenhos de rosca adequados para a obtenção de um moldado de boa qualidade. As roscas devem ser projetadas de forma a fundir o material antes da injeção, promover a homogeneização da temperatura do fundido, a dispersão de pigmentos e/ou aditivos, bem como manter a temperatura, pressão e cisalhamento sob controle para não provocar a degradação do material. Por sua vez, os moldes devem ser projetados com dutos de refrigeração, canais de distribuição e injeção adequados ao bom desempenho e produtividade do processo.

O trinômio tempo, temperatura e pressão sustentam o bom desempenho do processo de moldagem por injeção. Portanto, esses três parâmetros precisam estar bem ajustados para que não danifiquem o produto moldado, o molde e nem a máquina.

2.1.1 – Variáveis de Processo

Segundo a GE Plastics (2003), para se conseguir bons resultados nas peças moldadas por injeção, é conveniente manter sob controle variáveis tais como:

- Pressões (injeção, recalque e contra-pressão);
- Temperaturas (cilindro, massa e molde);
- Velocidade de injeção;
- Rotação da rosca.

– Pressão de injeção:

É a pressão necessária para promover o preenchimento da cavidade pelo material termoplástico fundido. Alguns fatores que influenciam na sua intensidade são:

Tipo de material: resinas termoplásticas com alta viscosidade (baixa fluidez) possuem maior dificuldade para o preenchimento da cavidade, de maneira que uma maior pressão de injeção será necessária para fazer o material fluir. No caso de materiais com fibra de vidro, deve-se procurar trabalhar com uma pressão de injeção baixa, a fim de manter a sua integridade.

Complexidade da peça: curvas, ressaltos, nervuras e paredes finas, além de dificultam o fluxo do material dentro da cavidade, causam o seu resfriamento precoce. Esse resfriamento promove um aumento na viscosidade do termoplástico e reduz a área útil para o escoamento, o que dificulta o fluxo do material e eleva os níveis de pressão no preenchimento da cavidade.

Temperatura do molde: quanto maior a temperatura do molde, mais lenta será a troca de calor entre a peça e molde durante o preenchimento da cavidade, reduzindo assim o aumento da viscosidade do material. Dessa forma, temperaturas de molde maiores proporcionam a utilização de menores pressões de injeção. Porém o tempo de resfriamento e, conseqüentemente, o ciclo de injeção aumentam.

Sistema de injeção: um sistema de alimentação e distribuição, juntamente com pontos de injeção estrangulados, dificultam a passagem do material fundido, o que requer uma maior pressão de injeção para preencher a cavidade. Essa restrição à passagem do material, principalmente no ponto de injeção, pode causar a sua degradação devido ao excessivo aumento de temperatura.

– Pressão de recalque:

A pressão de recalque deve começar a atuar depois que a peça já estiver preenchida. Sua função é manter o material compactado até que ele solidifique. Pressões excessivas de recalque resultam em peças altamente tensionadas e também podem causar problemas de extração, entretanto um recalque insuficiente é responsável por rechupes, linhas de solda e contração não-uniforme (empenamento) (ISLNOTES, 2003). A intensidade da pressão de recalque e o seu tempo de atuação dependem de fatores como:

Temperatura do molde: moldes excessivamente quentes retardam a solidificação e aumentam a contração do material moldado, exigindo maior tempo de atuação e intensidade da pressão de recalque.

Projeto da peça: paredes grossas dificultam o resfriamento do material, portanto a pressão de recalque deve ser regulada para que atue até que o ponto de injeção do material esteja solidificado.

– **Contrapressão:**

A contrapressão é a pressão que se opõe ao retorno da rosca durante a dosagem do material. Quanto maior a contrapressão, maior é a dificuldade do retorno da rosca, aumentando assim o cisalhamento no material. O aumento da contrapressão é conveniente apenas quando se deseja melhorar a homogeneização antes da injeção. Com relação aos materiais termoplásticos, quanto menor o cisalhamento, melhor será a manutenção das propriedades. Recomenda-se, portanto, utilizar baixa contrapressão (máximo 5 bar), o suficiente para garantir que o termoplástico a ser injetado esteja isento de bolhas de ar ou gases (GE Plastics, 2003).

– **Temperatura do cilindro / massa:**

Cada resina em particular possui um perfil médio de temperatura característico, o qual pode apresentar variações em função do tempo de residência do material no cilindro, complexidade da peça e projeto do molde. Quando se dispõe de condições normais de injeção, ou seja, tempo de residência entre 5 e 8 minutos, peso do injetado entre 40 e 80% da capacidade da máquina, molde e rosca bem projetados, utiliza-se perfil de temperatura ascendente. Em casos críticos, quando o peso do moldado se aproxima de 40% da capacidade de injeção ou o tempo de residência é muito alto, deve-se trabalhar no limite mínimo do perfil de temperatura, a fim de se evitar degradação térmica do material (GE Plastics, 2003).

– **Temperatura do molde:**

Os termoplásticos de engenharia geralmente requerem que o molde seja aquecido. O bom controle da temperatura na ferramenta é determinante sobre aspectos como acabamento da peça (brilho e rugosidade), tensões internas, contração e estabilidade dimensional. Para se obter um controle de temperatura

eficiente, é necessário que os canais de refrigeração sejam projetados de forma a distribuir ou retirar uniformemente o calor por todo o molde.

Os termoplásticos conhecidos como *comodities*, ao contrário dos de engenharia, podem ser injetados com o molde a temperatura ambiente.

– **Velocidade de injeção:**

A velocidade de injeção pode ser traduzida como o tempo de preenchimento da cavidade do molde pelo material fundido. Portanto, quanto maior a velocidade de injeção menor será o tempo de preenchimento da cavidade.

– **Rotação da rosca:**

Quanto maior a rotação da rosca, maior será a homogeneização do material e também mais rápida será a etapa de dosagem, o que refletirá em ciclos menores de moldagem. Porém, o maior atrito gerado no material pode causar a degradação do termoplástico. Para garantir a homogeneização e conservar as propriedades do material, recomendam-se rotações de 40 a 80 rpm (GE Plastics, 2003).

2.1.2 – Limpeza do cilindro e início da produção

Devido à alta viscosidade, a maioria dos termoplásticos de engenharia arrastam qualquer depósito de material deixado por injeções anteriores. Se o cilindro e o fuso da injetora não estiverem completamente limpos, poderão surgir problemas como delaminação, degradação da resina, pontos pretos e manchas no moldado. Para limpar a máquina, PS ou PEAD podem ser usados (GE Plastics, 2003). Devem-se evitar os seguintes materiais: PA, PP, POM, PEBD, ABS e PVC por degradarem em altas temperaturas ou reagirem com outras resinas, podendo causar inclusive (no caso do POM) explosões no canhão (GE Plastics, 2003). A temperatura de purga deve ser a mesma utilizada para o processamento da resina em questão.

2.1.3 – Preparação do material

A umidade presente na atmosfera pode afetar as propriedades físicas e prejudicar o acabamento superficial de materiais higroscópicos moldados por injeção. Os problemas mais comuns causados pela presença de umidade nestes materiais são peças com bolhas de ar e manchas causadas pela queima devido à alta temperatura dos vapores de água. Além disso, também existe o risco do operador sofrer queimaduras no momento da regulagem e operação da máquina. O

ABS e o PA 6,6 são materiais que podem sofrer esse tipo de problema (GE Plastics, 2003). Já o PP, PE e o PS não absorvem umidade, portanto não necessitam da operação de desumidificação.

O processo de desumidificação pode ser realizado por estufas de ar circulante (forno comum), secador de ar forçado e desumidificadores. A estufa de ar circulante é um forno com várias bandejas dispostas umas sobre as outras de modo que o ar quente circula e seca o material depositado no seu interior. Esse equipamento é ideal para secar pequenas quantidades de material. Devido à secagem irregular dos grânulos, eles devem ser distribuídos uniformemente na bandeja, de forma que não ultrapassem 3,0 cm de altura. A distância entre as bandejas deve ser no mínimo de 5,0 cm, a fim de garantir a livre circulação do ar quente. O tempo de secagem depende do tipo de material e ele deve ser misturado a cada 30 ou 60 minutos para que seque de maneira uniforme (GE Plastics, 2003). Já o secador de ar forçado e o desumidificador são utilizados para a secagem de grande quantidade de material. A diferença entre eles fica por conta de que o desumidificador retira a umidade do ar antes que o mesmo seja aquecido e insuflado no silo, ou seja, o ar quente que entra em contato com o termoplástico já está seco, possuindo, portanto, maior eficiência de secagem.

2.1.4 – O ciclo de moldagem por injeção

O ciclo de moldagem por injeção pode ser dividido em: fechamento do molde, preenchimento da cavidade, recalque, refrigeração e nova dosagem, abertura do molde e extração da peça. A Figura 2.1 mostra e comenta essas fases.

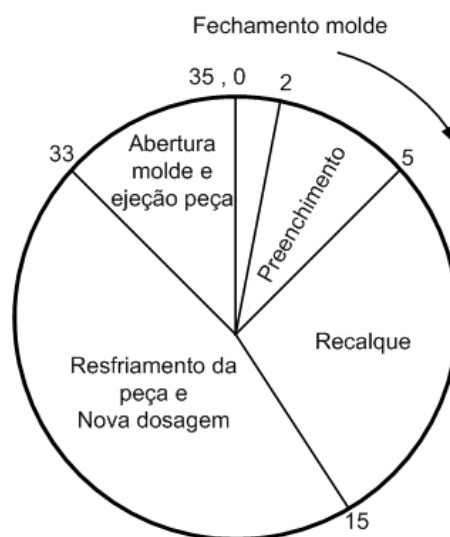


Figura 2.1 – Ciclo de moldagem por injeção convencional (ISLNOTES, 2003).

2.1.5 – Curvas de pressão e temperatura no ciclo de moldagem por injeção

A Figura 2.2 mostra um perfil típico da curva pressão versus tempo num ciclo de moldagem por injeção convencional. Neste exemplo, o tempo total de ciclo é de 35 segundos. A fase de preenchimento requer apenas alguns segundos; após a cavidade estar preenchida tem início a fase de compressão, quando um ligeiro aumento de pressão ocorre devido à maior resistência que o material sofre para ser acomodado. A fase de preenchimento e compactação acaba quando o ponto de comutação é alcançado (ponto de maior pressão dentro da cavidade). A partir desse ponto, tem início a fase de recalque, quando a pressão é reduzida para um nível entre 40 e 70% da pressão inicial de injeção durante o tempo necessário para que o ponto de injeção solidifique. Após a solidificação do ponto de injeção, não é mais possível introduzir material para dentro da cavidade, a partir daí o nível de pressão dentro da cavidade cai rapidamente. Quando a peça atinge sua temperatura de extração, o molde é aberto e a peça é ejetada.

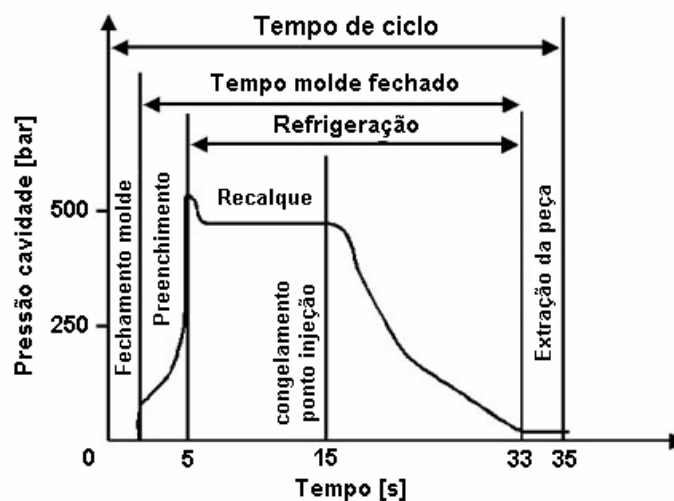


Figura 2.2 – Curva de pressão versus tempo no ciclo de injeção convencional (ISLNOTES, 2003).

A fase de refrigeração, teoricamente, começa logo que o polímero entra em contato com o sistema de alimentação e a cavidade do molde. Porém, essa fase possui um tempo definido e geralmente é atuante após a fase de recalque. Nesse período, o sistema de refrigeração é ativado e, na maioria das vezes, água circulada através destes canais para resfriar a peça até a sua temperatura de extração. Em outros casos, água ou óleo aquecido circula de forma contínua durante todo o ciclo para manter o molde numa faixa de temperatura adequada para injeção.

A Figura 2.3 mostra um típico histórico de temperatura versus tempo na cavidade durante o ciclo de moldagem por injeção. São mostradas duas curvas, sendo que a linha contínua representa a temperatura dentro da peça, e a linha tracejada representa a temperatura próxima ao ponto de injeção.

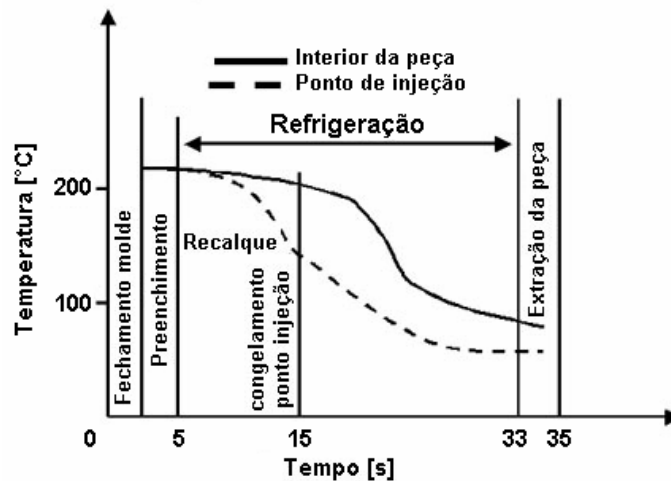


Figura 2.3 – Curva de temperatura versus tempo no ciclo de injeção convencional (ISLNOTES, 2003).

Como pode ser observado na Figura 2.4, o ponto de injeção é porta de entrada para a cavidade do molde e proporciona uma conexão entre o sistema de alimentação e a cavidade do molde. Geralmente, como a espessura do ponto de injeção é menor do que a espessura da peça, ele solidifica primeiro durante o recalque. Assim, não é possível adicionar mais material na cavidade do molde após esta fase. Quando a temperatura da linha central da peça alcança a temperatura da extração, a peça já pode ser ejetada.

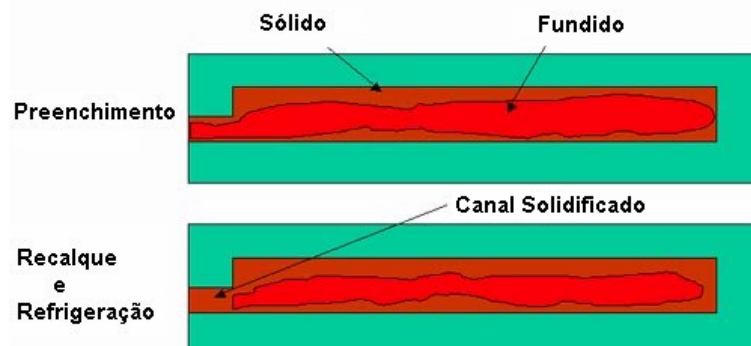


Figura 2.4 – Situação da peça e do ponto de injeção durante o ciclo de injeção (ISLNOTES, 2003).

2.1.6 – Representação das fases do processo de moldagem por injeção

O início do ciclo de injeção, mostrado na Figura 2.5, inicia com a plastificação do termoplástico por cisalhamento devido ao atrito gerado pela rotação da rosca. O material plastificado é então acumulado na parte frontal do fuso, sendo que as cintas de aquecimento são responsáveis por mantê-lo na temperatura ideal até o momento da injeção. Em seguida, a unidade injetora avança até a bucha de injeção, o molde é fechado e a cavidade está pronta para ser preenchida.

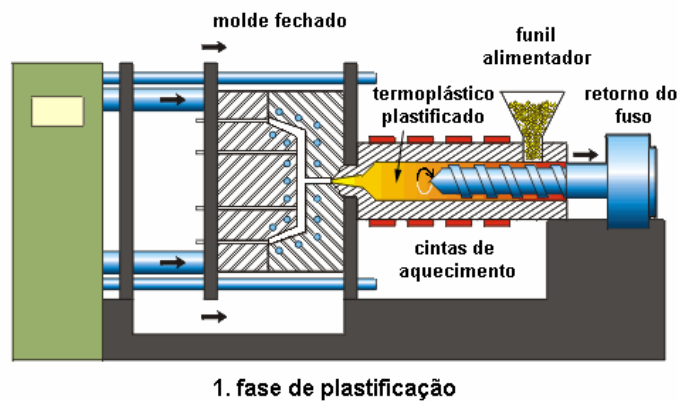


Figura 2.5 – Fase de plastificação (IDSA, 2003).

A Figura 2.6 mostra a fase em que o material é rapidamente injetado dentro da cavidade do molde, após o material ter sido dosado e plastificado. O tempo de injeção depende do volume da peça e do sistema de alimentação, mas geralmente em peças de tamanho pequeno a médio é de 1 a 3 segundos. Na medida em que o termoplástico preenche a cavidade, o ar presente neste local é forçado a sair através de espaços existentes entre o molde e os pinos ejetores, pela linha de fechamento do molde e por frestas especialmente projetadas para a sua retirada.

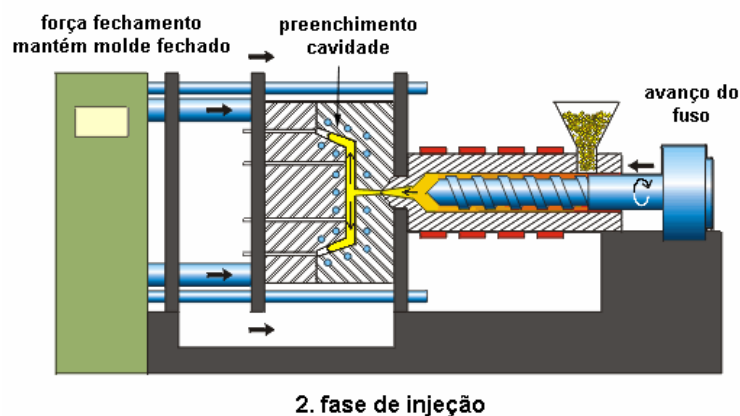


Figura 2.6 – Fase de injeção (IDSA, 2003).

A Figura 2.7 mostra a fase de resfriamento. Essa é a fase mais longa do ciclo de injeção convencional. Depois que a cavidade foi preenchida, compactada e recalçada, a peça precisa ser resfriada até a sua temperatura de extração. Paralelo à fase de resfriamento ocorre também o retrocesso da unidade de injeção, e a dosagem e plastificação de uma nova quantidade de material para o próximo ciclo.

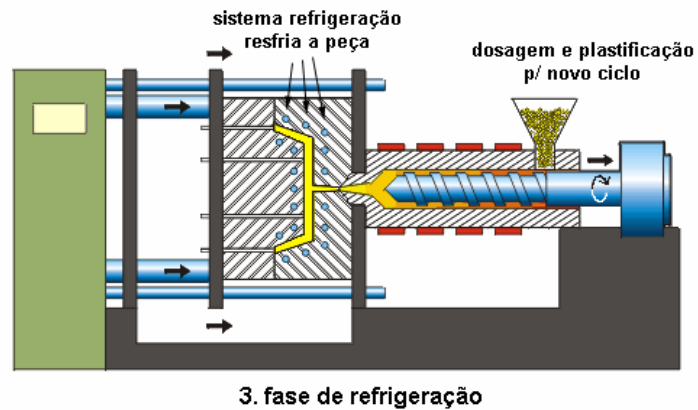


Figura 2.7 – Fase de resfriamento da peça (IDSA, 2003)

Uma vez que a peça atingiu a sua temperatura de extração (temperatura abaixo da qual ela não sofre mais variação dimensional tanto por contração, diferença de temperatura ou deformação pela ação dos pinos ejetores), o molde pode ser aberto. A Figura 2.8 mostra o momento em que a abertura do molde aciona os pinos ejetores que são responsáveis pela extração da peça do interior da cavidade.

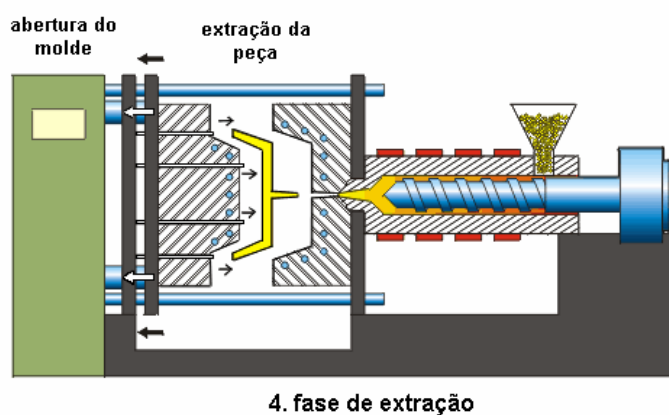


Figura 2.8 – Fase de extração (IDSA, 2003)

2.2 – SISTEMAS CAE NO PROJETO DE PEÇAS E MOLDES PARA TERMOPLÁSTICOS

O advento e a evolução das ferramentas computacionais, no auxílio ao projeto de peças e moldes para termoplásticos, possibilitaram um considerável avanço no processo de moldagem por injeção. Juntamente com os sistemas CAD (*Computer Aided Design*), os sistemas CAE (*Computer Aided Engineering*) permitem aos usuários determinar a combinação ideal entre a geometria de uma peça, o material em que será produzido, o projeto do molde e as condições de processamento que produzirão peças de qualidade (MOLDFLOW, 2001). Isso é possível porque esses *softwares* têm a capacidade de prever com uma boa margem de acerto o comportamento reológico do termoplástico no interior da(s) cavidade(s) do molde.

Para a previsão do comportamento reológico do termoplástico deve-se partir de certos parâmetros de entrada como: temperatura de injeção e do molde, temperatura do fluido de refrigeração, tipo de material do sistema de refrigeração, velocidade de injeção, tipo de termoplástico utilizado, localização e geometria do sistema de alimentação e ponto(s) de injeção. No caso dos parâmetros de saída, os principais são: pressão de injeção, força de fechamento, distribuição de temperatura ao longo do ciclo no molde, na peça e no sistema de alimentação, taxa e tensão de cisalhamento, tempo de resfriamento da peça e do sistema de alimentação e injeção, nível de tensões internas.

Além dos parâmetros de processamento, também é possível a previsão de defeitos devido a condições impróprias de moldagem ou projeto, tais como pontos onde podem ocorrer contrações, tensões internas, empenamentos, hesitação, bolhas de ar e pontos com concentração de calor.

Juntamente com os parâmetros de entrada, outro fator que pode influenciar grandemente nos resultados e no seu tempo de processamento computacional é o modelo a ser analisado. Com relação ao modelo, deve-se levar em consideração o tipo e a qualidade do arquivo CAD (*Computer Aided Design*) importado; geralmente extensões “.stl e .iges” são utilizadas. Além disso, o tipo de malha e a quantidade de elementos gerados no CAE (*Computer Aided Engineering*) são fatores determinantes na precisão do modelo. Se o modelo a ser analisado não for confiável, pode “mascarar” os resultados, ou seja, pode distorcer e apresentar resultados com pequenos e até grandes erros. Na maioria das vezes, o maior tempo necessário para uma análise em *software* de CAE (*Computer Aided Engineering*), está relacionado com a preparação de um modelo confiável.

Considerando os resultados, dois tipos de análises podem ser realizadas. Análises qualitativas, empregadas principalmente na fase inicial do projeto da peça, que tem como principal objetivo a visualização do comportamento do termoplástico dentro da cavidade, sem se preocupar em quantificá-las, sendo que para isso só necessitam de um modelo e o tipo de material a ser injetado. Já as análises quantitativas possuem não só o objetivo de visualizar o comportamento reológico do termoplástico, mas também determinar a influência dos parâmetros de projeto e de processamento nas condições finais da peça, ou seja, simular as condições experimentais de processamento. Nesse caso, a análise necessita de um modelo, sistema de alimentação, sistema de refrigeração, mesmo termoplástico ou um contratipo, condições de processamento e demais recomendações que serão abordadas em capítulos subseqüentes.

No caso de moldes metálicos, a ferramenta CAE pode ser utilizada na otimização do molde e da peça injetada na fase de projeto ou para auxílio na correção de problemas de dimensionamento. Quando utilizado o processo de estereolitografia na fabricação de insertos para injeção de termoplásticos, todo o projeto do molde e os parâmetros do processo de injeção precisam ser modificados e otimizados devido à diferença entre os materiais.

Uma maneira efetiva e barata de obter-se informações experimentais é através do uso dos sistemas para a simulação do processo de injeção (ALURU et al 2001, DUSSEL et al 1998). Em relação ao projeto de peças, seu uso ainda não é tão importante devido à simplicidade das geometrias utilizadas em estereolitografia. Porém o seu emprego na otimização dos insertos pode ocorrer principalmente no sistema de alimentação e no ponto de injeção.

Segundo ARCIPRETE et al (1999), a simulação computacional está se tornando um método aceito e largamente utilizado para a determinação dos parâmetros de processamento. Além disso, se for bem sucedida, uma análise pode aumentar em aproximadamente vinte peças à vida de um inserto devido à redução do número de ciclos para a determinação dos parâmetros de injeção.

Deve ficar claro que a ferramenta de simulação não substitui a experiência do projetista de peças e/ou moldes, ou a do processista. Pelo contrário, deve ser utilizada preferencialmente por um usuário que reúna as principais qualificações presentes nestes profissionais. Outro fator importante no processo de simulação é o conhecimento por parte do usuário das limitações do *software* decorrentes das simplificações do processo de injeção e nas equações que o regem. Essa não é

uma tarefa muito fácil, haja visto que os manuais de operação do *software* se preocupam basicamente em auxiliar o usuário a inserir um modelo juntamente com os parâmetros de processamento e interpretar os resultados. Assim, fica por conta do usuário buscar informações adicionais.

Como principais possíveis fatores de erro entre o processo experimental e a simulação, pode-se citar as incertezas causadas pelo uso de contratipos, a não presença da resina termofixa utilizada na confecção dos insertos, as simplificações utilizadas para o modelamento do comportamento reológico do termoplástico pelo *software*, as simplificações feitas na geometria, a imprecisão da máquina injetora devido a desgastes e perdas mecânicas, a imprecisão dos aparelhos utilizados na instrumentação da máquina e dos moldes, como também a falta de experiência na interpretação e validação das simulações no processo real.

DUSSEL et al (1998) realizaram experimentos comparando análises de simulação entre a moldagem convencional e a moldagem em insertos fabricados por estereolitografia. Segundo esses autores, os ensaios demonstraram não existirem diferenças significativas entre o tempo de preenchimento e a taxa de cisalhamento. As principais diferenças ficaram por conta da pressão de injeção, que é um pouco menor nos moldes de resina e o tempo de ciclo que é bem maior devido à baixa condutividade térmica da resina. Os autores ainda comentam que a influência do material do molde será mais significativa no caso de longos caminhos de fluxo.

Apesar de outros autores comentarem sobre a utilização do sistema CAE como auxílio na moldagem em insertos de estereolitografia, não são apresentados maiores detalhes sobre a sua utilização e nem sobre suas limitações e resultados.

CAPÍTULO 3 – PROTOTIPAGEM E FERRAMENTAL RÁPIDO

3.1 – PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Segundo GARCIA (2001), uma abordagem bastante comum consiste em subdividir as tecnologias de prototipagem em dois grandes grupos: aquelas que trabalham com remoção de material (usinagem HSC, métodos manuais) e as que trabalham por adição de material (FDM, estereolitografia, SLS, LOM).

O termo prototipagem rápida ou *rapid prototyping* (RP) refere-se a uma classe de tecnologias que podem automaticamente construir modelos físicos a partir de um modelo gerado num sistema CAD (GARCIA, 2001). Essas "impressoras tridimensionais" permitem que os projetistas criem protótipos palpáveis de seus projetos, ao invés de simplesmente figuras em 2D ou 3D. Tais modelos têm inúmeras utilizações, tornando-se excelente apoio visual para a troca de informações entre as equipes de trabalho e os clientes. Além disso, protótipos também são úteis na fase de teste de um produto para a verificação de seu desempenho e avaliação da necessidade de possíveis modificações.

Os projetistas sempre testaram protótipos, mas a prototipagem rápida aumenta suas capacidades, de forma que agora é possível executar testes repetitivos, tais como construir um protótipo, testar, reprojetar, construir e testar novamente. Entretanto, "rápido" é um termo relativo, pois o tempo de construção pode variar entre 3 e 72 horas, dependendo do modelo da máquina, do tamanho e da complexidade do protótipo (GORNÍ, 2003). Isso parece ser lento, mas é muito mais rápido do que semanas ou até meses necessários para se fazer um protótipo por métodos tradicionais.

Na maioria dos equipamentos de estereolitografia, o volume da cuba de construção não ultrapassa $0,125 \text{ m}^3$, ou seja, dimensões de $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}$. Porém, a dimensão do equipamento não é fator limitante para a construção de um modelo físico maior que essas dimensões, pois o objeto pode ser construído em partes e posteriormente colado de forma simples e precisa. No caso da estereolitografia, a colagem entre as partes geralmente é feita com a mesma resina de construção ou com cola Araldite®.

Segundo a ROBTEC (2002), o ciclo de desenvolvimento de um produto pode ser reduzido de 50 a 80% quando utilizando a prototipagem rápida. Dessa forma, a prototipagem é uma ferramenta competitiva e muito valiosa para empresas que desejam reduzir custos e ganhar tempo para levar seus produtos rapidamente ao

mercado.

As máquinas de estereolitografia (SLA) têm sido fabricadas desde 1988 pela empresa 3D Systems. Segundo a ROBTEC (2002), atualmente a 3D Systems é a líder no mercado de equipamentos para prototipagem rápida.

As principais vantagens do processo de estereolitografia são: boa precisão dimensional, alto nível de detalhes, obtenção de formas complexas, boa velocidade de construção, bom acabamento superficial e baixo peso. As suas principais desvantagens são: baixa resistência mecânica, baixa temperatura de transição vítrea e a baixa dureza superficial BENTON (2001).

3.1.1 – Aplicações da prototipagem rápida por estereolitografia

Segundo a ROBTEC (2002), entre as aplicações da prototipagem rápida por estereolitografia destacam-se:

- Desenvolvimento de produtos: ferramental rápido;
- Projetos: modelos conceituais, análises de montagem e de forma;
- *Marketing*: modelos de demonstração, apresentações ao cliente, teste de mercado;
- Modelos: para a técnica de núcleo perdido, fundição e microfusão;
- Engenharia simultânea: auxilia a comunicação, evitando erros de interpretação;
- Medicina e Odontologia: planejamento de cirurgias.

3.1.2 – Etapas do processo de prototipagem rápida

Todos os sistemas de prototipagem rápida passam por etapas similares durante a obtenção de um protótipo. No geral, pode-se considerar um total de nove etapas, porém algumas podem não existir ou serem executadas automaticamente em alguns sistemas. As etapas são:

- Modelagem no sistema CAD (obtenção do modelo 3D);
- Conversão do modelo CAD para o formato “.stl” (linguagem utilizada pelas máquinas de prototipagem rápida);
- Verificação da conversão (verificar se não houve erro durante a tradução);
- Criação dos suportes (tipos e localização dos suportes);
- Orientação da construção (horizontal, vertical);

- Fatiamento e preparação para construção (parâmetros de construção e programa de comando numérico);
- Construção (execução do modelo na máquina de estereolitografia);
- Pós-processamento (retirada dos suportes e excesso de resina, pós-cura e acabamento superficial).

3.1.3 – Princípio de funcionamento do processo de prototipagem rápida por estereolitografia

Segundo PALM (2003), o processo de prototipagem rápida por estereolitografia foi patenteado em 1986, e a partir desta data iniciou uma revolução na forma de obtenção de protótipos. Esta técnica constrói modelos tridimensionais a partir de um fotopolímero acrílico que se solidifica quando exposto ao traçado de um laser ultravioleta de baixa potência. A Figura 3.1 mostra um modelo sendo construído sobre uma plataforma situada logo abaixo da superfície em uma cuba contendo a resina de estereolitografia. Um laser de raios UV de baixa potência e foco preciso traça a primeira camada, solidificando a seção transversal do modelo, de forma que as áreas em excesso continuam na forma líquida. Na seqüência, um elevador baixa a plataforma dentro da cuba com a resina líquida, numa profundidade referente à espessura da camada de construção. A espessura da camada de construção pode variar entre 0,05 e 0,25 mm, dependendo do equipamento utilizado. Uma espécie de vassoura passa sobre a peça no sentido de ida e volta, com o objetivo de nivelar a resina que recobre a camada solidificada. Em seguida, o laser proporcionará a solidificação dessa camada sobre a anterior. Esse processo se repete até que todo o protótipo seja construído. Na seqüência, a peça sólida é removida de dentro da cuba, o excesso de líquido é eliminado, os suportes são removidos e o modelo é então levado a um forno de raios ultravioleta e/ou num forno com aquecimento por resistências elétricas para completar o processo de cura da resina. Por último, o protótipo passa por um processo de acabamento superficial.

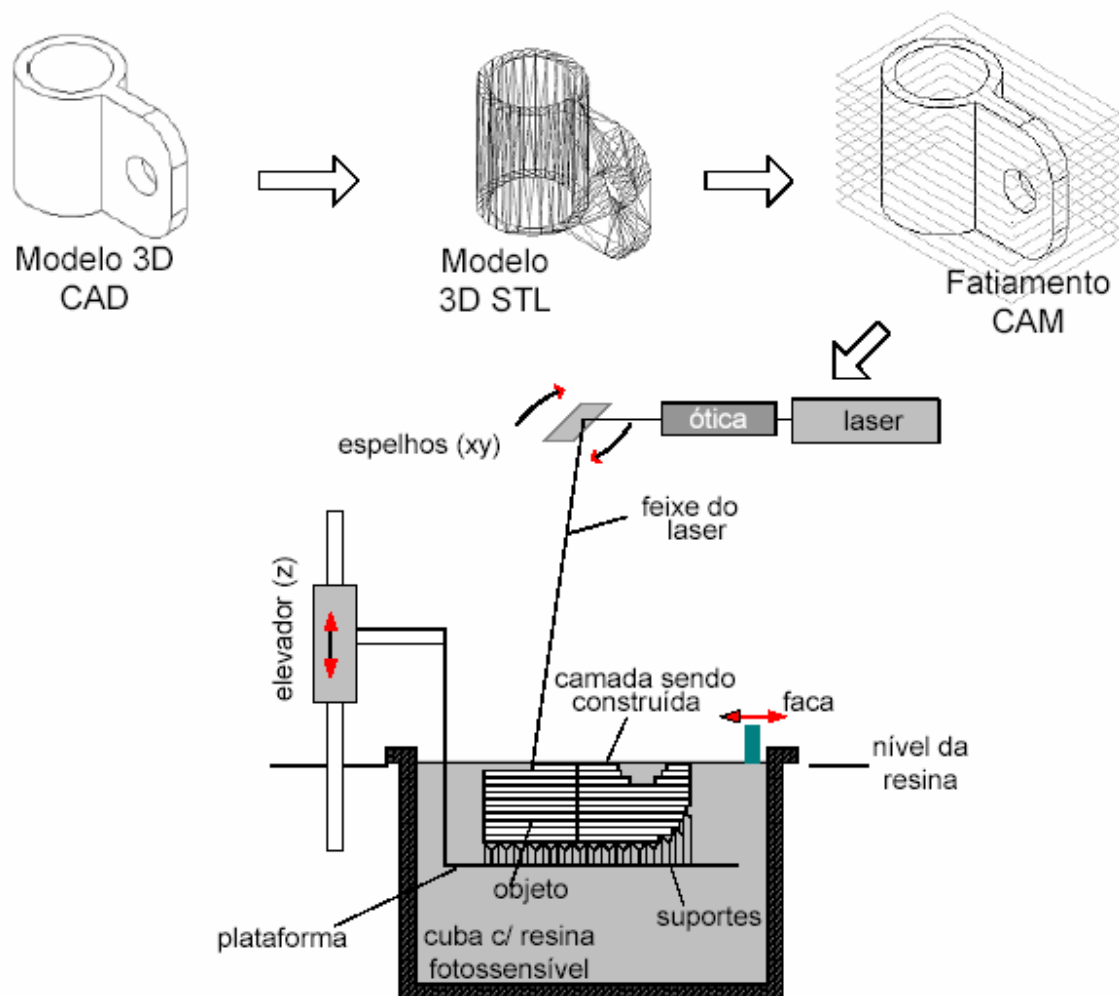


FIGURA 3.1 – Representação esquemática do processo de estereolitografia (AHRENS et al, 2002)

3.1.4 – O futuro e as conclusões sobre a técnica de prototipagem rápida

Segundo JONES (2003), o futuro da prototipagem rápida é muito promissor. Os benefícios para a maioria das aplicações compensam de longe as desvantagens, especialmente quando são utilizadas nas situações corretas. Os preços e o tamanho dos equipamentos estão reduzindo rapidamente a um ponto que logo serão comuns nas empresas de desenvolvimento de produtos.

Para PALM (2003) & GARCIA (2001), a evolução das técnicas de prototipagem rápida deve ocorrer principalmente nos seguintes aspectos:

- Aumento da velocidade de construção;
- Melhoria da precisão e do acabamento superficial;
- Desenvolvimento de novos polímeros menos sujeitos ao empenamento;
- Introdução de materiais não-poliméricos (metais, cerâmicas, compósitos);
- Aumento no tamanho dos protótipos construídos.

Parece haver uma divergência nas aplicações da prototipagem rápida, pois enquanto muitas companhias se concentram na aplicação de produzir “modelos físicos” não inteiramente funcionais, outras estão tendendo para a produção de componentes funcionais. Quando isso ocorre, esse processo é chamado de manufatura rápida ou *rapid manufacturing (RM)*. Segundo PALM (2003) & GARCIA (2001), isso está ocorrendo devido à introdução de materiais não poliméricos, incluindo metais, cerâmicas e compósitos. Esses materiais permitirão aos usuários da prototipagem rápida produzir modelos funcionais.

Atualmente, protótipos em plástico funcionam bem para visualização e testes de montagem, mas são normalmente fracos para testes funcionais (JACOBS, 1996 & PALM, 2003). Materiais mais fortes irão favorecer a obtenção de protótipos que poderão ser sujeitos a condições de funcionamento real. Ainda, materiais compósitos e metais irão expandir bastante o leque de produtos que poderão ser produzidos pelo processo de manufatura rápida.

Outras empresas e institutos de pesquisa estão fabricando insertos (moldes) e modelos mestres utilizando-se dos processos prototipagem rápida. Esta aplicação é denominada de ferramental rápido ou *rapid tooling* e será abordado no capítulo seguinte. Desta forma, pode-se concluir que a tecnologia da prototipagem rápida está avançando para além da produção dos modelos protótipos para a qual foi inicialmente pensada.

3.2 – FERRAMENTAL RÁPIDO

Segundo MIERITZ et al (1996), a pressão, com relação ao tempo de desenvolvimento, qualidade e custos juntamente com o aumento da variedade de produtos e a competição mundial entre as empresas, tem tornado a tecnologia de prototipagem rápida (*rapid prototyping*), parte integrante do planejamento estratégico tecnológico e de negócios das empresas, e atualmente é vista como uma das mais importantes ferramentas no desenvolvimento de produtos da última década.

Derivada da prototipagem rápida, surgiu uma técnica chamada de ferramental rápido (*rapid tooling*). Segundo GARCIA (2001), ferramental rápido é a denominação dada para a produção rápida de ferramentas utilizadas na moldagem por injeção, direta ou indiretamente, através de prototipagem rápida.

Para JANAES et al (2000), a prototipagem e o ferramental rápido são tecnologias que, se unidas e gerenciadas estrategicamente de forma adequada, devem permitir as empresas a colocar seus produtos no mercado mais rapidamente.

ROSOCHOWSKI et al (2000), comentam que essa aplicação promete grandes avanços para a área, pois a fase de produção de ferramental é considerada uma das fases mais demoradas e onerosas no processo de desenvolvimento produtos. Entretanto, os desafios para a implementação do ferramental rápido são mais rígidos do que para a prototipagem, pois o desempenho do inserto quanto ao número de peças está relacionado com fatores intrínsecos à suas propriedades térmicas e mecânicas. Dessa forma, o maior desafio na construção e utilização do ferramental rápido está em aliar resistência mecânica, precisão dimensional e acabamento superficial (RADSTOK, 1999).

Segundo a ROBTEC (2002), o processo de ferramental rápido é ideal para:

- Fabricação de pequenos lotes de peças, nos quais o desenvolvimento de um molde definitivo tornaria inviável o custo do produto;
- Lote piloto para análises de funcionalidade, durabilidade, manufaturabilidade e testes de mercado;
- Produção de um protótipo no mesmo material da peça final;
- Redução nos custos de produção ou de alteração de ferramentas.

3.2.1 – Classificação das técnicas de ferramental rápido

Segundo WOHLERS (1999), as técnicas de ferramental rápido são classificadas pelo método de construção da ferramenta (Direto ou Indireto) e pela quantidade de peças que podem produzir (*Soft, Bridge e Hard Tooling*).

A Tabela 3.1 mostra uma comparação entre alguns tipos de ferramental rápido, considerando o tempo de fabricação e a quantidade de peças obtidas.

Tabela 3.1 – Comparação entre alguns tipos de ferramental rápido (ROBTEC, 2002).

Processo	Quantidade possível	Tempo de execução (aproximado)	Material das peças
Direct AIM	20-200	3 semanas	Termoplásticos
Epoxi Tooling	20-500	3 semanas	Termoplásticos
Prototooling	20-1000	3 semanas	Termoplásticos
Al. Usinado	50-3000	4-5 semanas	Termoplásticos
3D Keltool	500.000 ou mais	3 semanas	Termoplásticos

3.2.2 – Classificação do ferramental rápido segundo o método de construção

– **Método direto:** o processo de ferramental direto envolve a construção dos moldes ou insertos diretamente pelo equipamento de prototipagem rápida, ou seja, como pode ser visto na Figura 3.2, o resultado ou produto fabricado pelo sistema de prototipagem rápida é a própria ferramenta (WOHLERS, 1999).

Exemplos de técnicas de ferramental rápido fabricados pelo método direto, segundo WOHLERS (1999), são: Direct AIM™ da 3D Systems , RapidTool™ (DTM – Corp.), Direct Metal Laser Sintering (DMLS™), ProMetal™, Laminated Tooling, Direct Metal Laser Sintering – DMLS (EOS), Laser-Engineered Net Shaping, LOMComposite e Sand Molding.

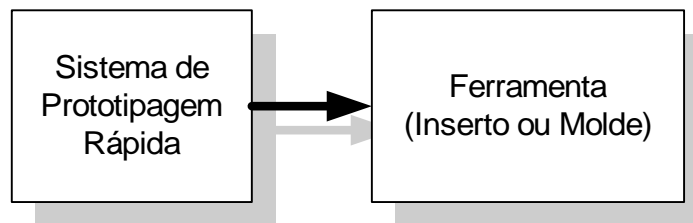


Figura 3.2 – Método direto de construção de ferramental rápido (GRELMAMM, 2001).

– **Método indireto:** o método indireto utiliza a prototipagem rápida na construção de um modelo mestre que será utilizado por um processo secundário na fabricação da ferramenta definitiva (WOHLERS, 1999 & GARCIA, 2001). Segundo PALM (2003), atualmente a maior parte do ferramental rápido utilizado é indireto. A Figura 3.3 mostra um esquema do processo de ferramental rápido indireto.

Exemplos de técnicas de ferramental rápido fabricados pelo método indireto, segundo WHOLERS (1999), PALM (2003) & GARCIA (2001) são: QuickCast Tooling, 3D Keltool™ da empresa 3D Systems, Aluminium-filled epoxy, moldes de silicone, Spray Metal Tooling, PolySteel™, CEMCOM tooling™, Express Tool™, SwiftTool™, PHAST™, Sand Casting e Vacuum Casting.

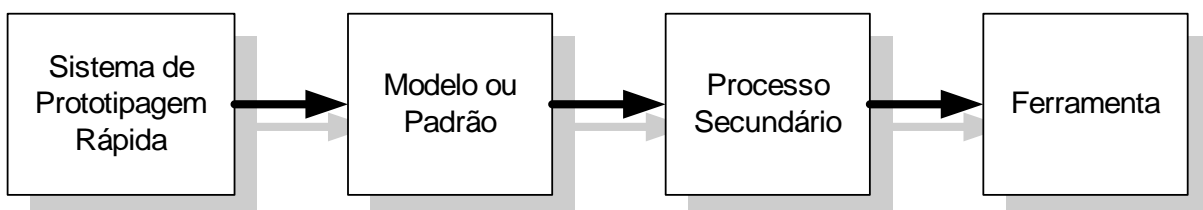


Figura 3.3 – Método indireto de construção de ferramental rápido (GRELMAMM, 2001).

3.2.3 – Classificação do ferramental rápido segundo a quantidade de peças produzidas

Segundo JACOBS (1996), quanto ao número de peças produzidas, o ferramental rápido pode ser classificado da seguinte forma:

– **Ferramental Macio (*Soft Tooling*):** essas técnicas de ferramental produzem em média 50 peças, e entre elas estão: RTV (Room Temperature Vulcanizing) – molde de silicone, PHAST™, PolyStell™, SwiftTool™ (JACOBS, 1996 & GRELMAMM, 2001).

– **Ferramental Médio (*Bridge Tooling*):** esse tipo de ferramental caracteriza-se pela capacidade de produzir de 50 a 1000 peças, dependendo do material injetado e das condições de injeção (CHUA et al, 1997). Nesta categoria situa-se a maioria das técnicas de ferramental rápido, entre elas: Direct AIM™, moldes de epóxi preenchidos com alumínio, moldes fabricados com *spray* de metal, RapidSteel™, DMLS™.

– **Ferramental Duro (*Hard Tooling*):** as ferramentas classificadas nessa faixa são capazes de produzir lotes que variam de 1.000 a mais de 50.000 peças, dependendo do material injetado e das condições de injeção (CHUA et al, 1997). Nessa categoria estão as técnicas 3D Keltool™ e o QuickCast Tooling.

3.2.4 – Ferramental rápido versus Ferramental convencional

Segundo KREPLIN (2000), as principais características do ferramental rápido e do ferramental convencional são:

– Ferramental rápido:

- Tempo e custo de fabricação não são afetados pela complexidade do modelo;
- Boa precisão e excelente acabamento superficial;
- Pouca preocupação sobre modificações na ferramenta;
- Utilização direta do arquivo CAD significa nenhum erro de interpretação;
- Produção de ferramentas *Soft*, *Bridge* e *Hard*.

– Ferramental convencional:

- Altamente preciso e excelente acabamento superficial;

- Capacidade de alto volume de produção;
- Peças nos materiais finais desejados;
- Alto custo e maior tempo de fabricação.

3.2.5 – O ferramental rápido por estereolitografia

Dentre as tecnologias de prototipagem rápida utilizadas na fabricação de moldes destaca-se a estereolitografia (SL), que possibilita a construção da cavidade do molde (inserto) com rapidez e excelente acabamento superficial, fatores esses indispensáveis para o processo de fabricação de peças plásticas moldadas por injeção (AHRENS et al, 2002).

As principais etapas na obtenção do ferramental por essa técnica são:

- Modelamento CAD dos insertos na forma de casca;
- Fabricação dos insertos na máquina;
- Pós-cura e acabamento superficial;
- Montagem do sistema de refrigeração;
- Preenchimento da parte posterior dos insertos;
- Montagem e ajustamento dos insertos no porta-moldes;
- Montagem do porta-moldes na máquina injetora;
- Injeção das peças.

Segundo AHRENS et al (2002), alguns dos objetivos das pesquisas em ferramental rápido por estereolitografia são:

- Prolongar a vida útil dos insertos;
- Estender a gama de materiais possíveis de serem moldados;
- Aumentar a complexidade geométrica das peças moldadas;
- Ampliar o campo de aplicação dessas tecnologias;
- Reduzir o tempo de produção dos insertos.

3.2.6 – Tipos de insertos utilizados em ferramental rápido por estereolitografia

Atualmente são empregados quatro tipos de construção para esses insertos, que são:

– Inserto sólido:

Esse foi um dos primeiros tipos de insertos utilizados na fabricação de

ferramental rápido por estereolitografia. Ele caracteriza-se por ter ambas as metades, cavidade macho e fêmea, construídas de forma maciça. Por não necessitar de preenchimento na parte posterior, o problema de empenamento das cavidades, devido ao calor liberado pelo material de preenchimento, é evitado. As suas principais desvantagens são o maior custo de fabricação devido ao maior consumo de material e tempo de máquina para sua confecção e os maiores ciclos de injeção devido à falta de um sistema de refrigeração. A Figura 3.4 mostra de forma esquemática um inserto maciço, e a Figura 3.5, o mesmo tipo de inserto, no qual é possível visualizar as cavidades macho e fêmea, a peça e o sistema de alimentação.

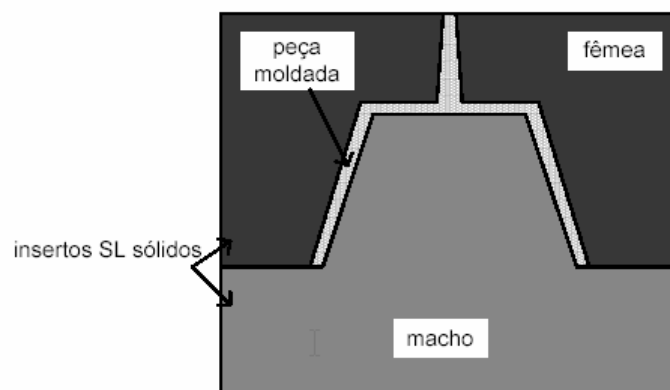


Figura 3.4 – Representação esquemática do inserto sólido (AHRENS et al, 2002).

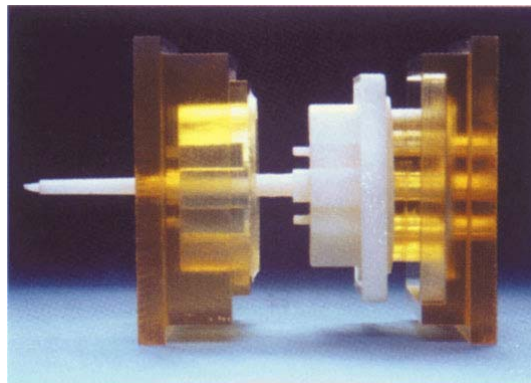


Figura 3.5 – Inserto sólido.

– Insertos com canal de refrigeração incorporado:

Os insertos com canais de refrigeração incorporados, ou *conformal cooling*, são uma variação dos insertos sólidos. A diferença entre eles dá-se pela presença do sistema de refrigeração, o qual é modelado em sistema CAD na fase de projeto e construído juntamente com o restante do inserto na máquina de prototipagem rápida.

AHRENS² et al (2001), citam como problemas para esta técnica, a ocorrência de vazamento do líquido refrigerante na interface de ligação entre os canais incorporados e as mangueiras para a refrigeração. Também ocorre uma dificuldade quanto à espessura de parede, a qual deve ser a menor possível para otimizar a eficiência térmica do sistema de refrigeração. Entretanto, deve-se tomar cuidado, pois pequenas espessuras de parede podem sofrer influência das altas temperaturas e pressões do processo de injeção, as quais podem ser deformadas e até rompidas.

A Figura 3.6 mostra de forma esquemática um inserto *conformal cooling*; já na Figura 3.7 pode-se ver um inserto *conformal cooling* com cavidade para geometria plana e algumas peças injetadas em PP.

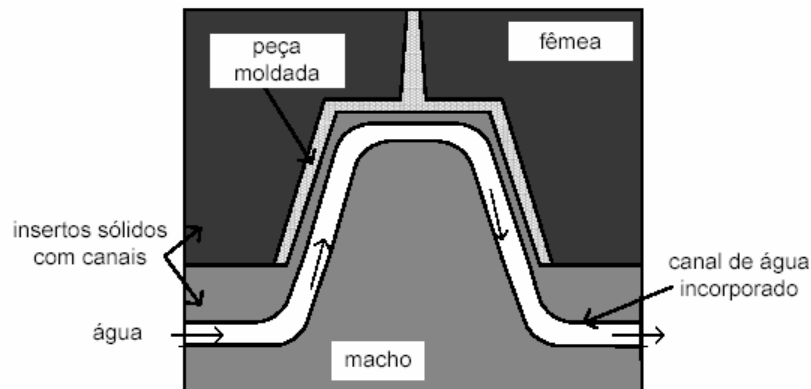


Figura 3.6 – Representação esquemática de um inserto *conformal cooling* (AHRENS et al, 2002).

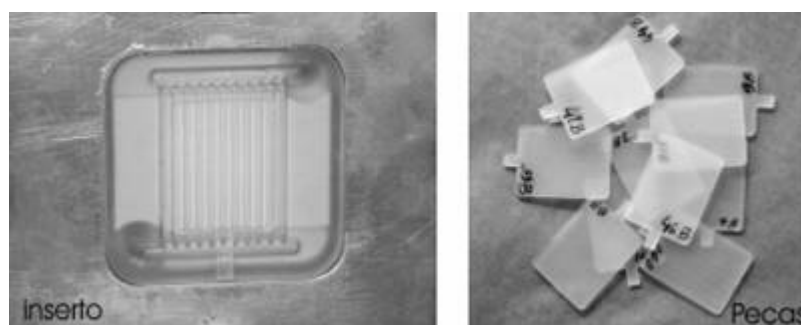


Figura 3.7 – Inserto *conformal cooling* e peças injetadas (AHRENS et al, 2002).

Uma variação da utilização do inserto *conformal cooling channels* é o sistema chamado de “Canais de Refrigeração Incorporados Autopressurizados”. Esse sistema utiliza válvulas controladoras de vazão posicionadas na entrada e na saída dos canais de refrigeração, as quais são fechadas durante a fase de injeção do termoplástico na cavidade e abertas durante a fase de refrigeração da peça. A água

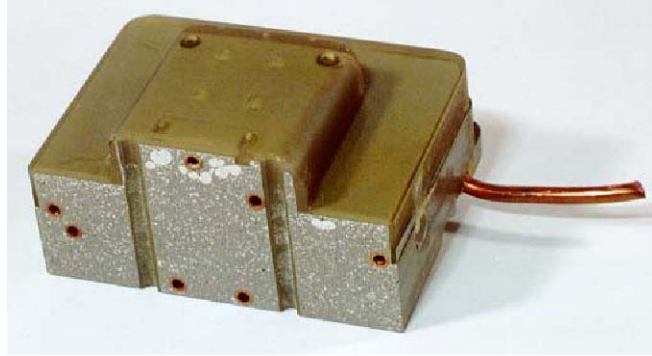


Figura 3.9 – Inserto em casca com canais de refrigeração (KREPLIN, 2000).

– Inserto aletado:

Esse tipo de inserto é construído com um sistema de aletas ou canais de fluxo de calor (*heat flux canals*), que são estrategicamente posicionadas em locais de concentração térmica ao longo da cavidade. Os pontos mais quentes de uma cavidade podem ser determinados com o auxílio de *softwares* de CAE como o Moldflow[®].

Este tipo de inserto permite manter um contato direto entre o material de preenchimento da parte posterior do inserto e o material termoplástico injetado (AHRENS² et al, 2001). O inserto é construído de forma que nos pontos onde serão posicionados os canais de fluxo de calor ou aletas, exista uma saliência onde, após o preenchimento da parte posterior, ela é lixada e removida, possibilitando assim um contato direto entre a peça moldada e o material de preenchimento.

Segundo AHRENS² et al (2001), após a realização de um experimento para determinar a relação entre diâmetro da aleta e a espessura da casca do inserto, concluiu-se que os melhores resultados encontram-se com diâmetros maiores que 2 mm, sendo que os diâmetros menores que 2 mm são de difícil preenchimento devido à rápida solidificação da liga. Quanto ao tipo de liga de baixo ponto fusão a ser utilizado neste tipo de inserto, AHRENS² et al (2001) recomendam que sejam utilizadas as que possuem temperatura de fusão acima de 100°C, pois os autores comentam que ao utilizar uma liga com ponto de fusão de 70°C na injeção de polipropileno (PP) a 220°C, a aleta apresentou derretimento. Esse fato pode causar marcas e deformações na peça injetada e conseqüentemente a inutilização do inserto.

Essa nova técnica de construção, se corretamente utilizada pode aumentar a quantidade de peças fabricadas pelos insertos de estereolitografia, reduzindo o

tempo em que a cavidade do inserto fica sujeita às altas temperaturas do processo e moldagem por injeção. Além disso, a aplicação de um recobrimento metálico na superfície do inserto pode ajudar a evitar o aparecimento das marcas das aletas nas peças, assim como promover uma retirada de calor mais uniforme da peça, evitando problemas como empenamento e rechupe (AHRENS² et al, 2001).

AHRENS et al (2002) comprovaram após uma análise de simulação térmica em um sistema CAE (Ansys[®] 5.6.1) comparando um modelo de inserto sólido, um em casca e um com aletas, que a temperatura do inserto aletado atinge valores inferiores a temperatura de transição vítrea (DSM Somos 7110[®] Tg=65°C) mais rapidamente do que os outros tipos de insertos analisados. Desta forma, este tipo de inserto permanece menos tempo exposto às altas temperaturas de injeção, devido à maior eficiência térmica do inserto com aletas em relação aos outros tipos de insertos analisados. Contudo, a introdução destes orifícios na casca de estereolitografia pode levar à concentração de tensões no inserto. Assim, quando trabalhando com estes tipos de insertos os autores sugerem que seja utilizada uma espessura de casca superior àquela proposta por DECELLES & BARRITT (1997).

Segundo AHRENS et al (2002), esse tipo de inserto é indicado para a moldagem de materiais que requerem elevadas temperaturas de injeção, como por exemplo o policarbonato (PC) e a poliamida (PA), já que a combinação das aletas com um sistema de refrigeração maximiza a retirada de calor da peça e do inserto.

A Figura 3.10 mostra de forma esquemática um inserto aletado; já na Figura 3.11 pode ser visto um inserto aletado com suas cavidades e algumas peças injetadas. Ao lado pode-se visualizar o detalhe das aletas e do pino extrator.

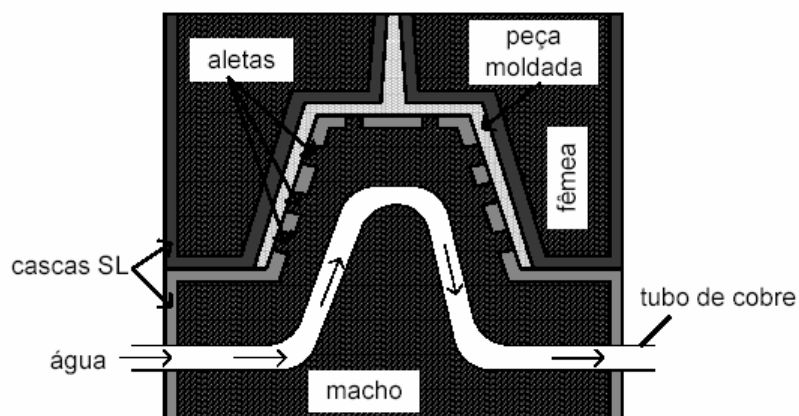


Figura 3.10 – Representação esquemática do inserto aletado (AHRENS et al 2002).

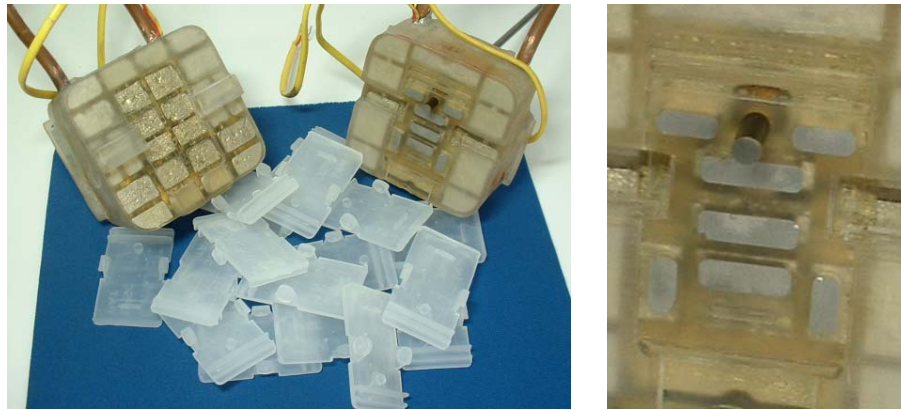


Figura 3.11 – Inseto aletado (AHRENS, 2002).

3.2.7 – Principais características do ferramental rápido por estereolitografia

– Características térmicas

Segundo DUSEL et al, (1998) & JACOBS (1996), a condutividade térmica dos insertos curados fabricados por estereolitografia é cerca de 300 vezes menor do que moldes de aço. Como consequência, os ciclos de injeção são da ordem de 4 a 5 minutos, contra os, em média, 30 a 40 segundos da moldagem convencional.

COLTON & LEBAUT (1999), comentam que a temperatura do molde de 50°C é uma boa temperatura e aproximadamente a maior temperatura que o inserto (Somos[®] 7110) pode suportar continuamente sem que comprometa sua vida durante o processo de injeção.

– Espessura de casca

Insertos em casca com paredes finas necessitam de um menor tempo de construção e aumentam a taxa de transferência de calor. Entretanto, se a parede do inserto for muito fina, ela se tornará suscetível a distorções durante as subseqüentes fases de processamento (JACOBS, 1996). A espessura de parede ótima depende das propriedades térmicas e mecânicas da resina de estereolitografia utilizada, tanto quanto da geometria do inserto, sendo que o uso de paredes de 1,5 a 2 mm de espessura tem funcionado bem para as resinas SL 5170 e SL 5180 (JACOBS, 1996).

Com relação à superfície dos insertos fabricados por estereolitografia, elas são relativamente macias, e por consequência possuem baixa resistência à erosão (JACOBS, 1996).

– Pós-cura

Segundo COLTON & LEBAUT (1999), somente o processo de pós-cura de uma hora em um forno de UV não é suficiente para curar completamente o inserto. Assim, esses autores recomendam que após a construção do inserto, o processo de pós-cura seja feito com uma hora de forno UV e em seguida mais 30 minutos de cura térmica a 150°C.

– Agentes desmoldantes

Segundo JACOBS (1996), os agentes desmoldantes podem reduzir a aderência entre a peça e a cavidade do inserto, reduzindo a tendência de quebra durante a extração.

– Ângulos de saída

JACOBS (1996), comenta que a utilização de ângulos de saída adequados na construção dos insetos é de suma importância, pois em moldes metálicos a consequência da ausência ou insuficiência de um ângulo de saída é uma peça deformada ou estragada durante a extração. No caso dos insertos fabricados por estereolitografia, a consequência pode ser a falha do inserto. Outro relato é que quanto melhor o acabamento superficial do inserto, menor será a necessidade da utilização de um ângulo de saída.

– Falha do inserto

A falha do inserto de estereolitografia é facilitada pela queda da resistência mecânica da resina (DSM Somos 7110[®] Tg=65°C), causada pelo aumento de temperatura durante o processo de injeção. Aliado a isso, a contração da peça moldada sobre as saliências da cavidade do inserto faz com que uma força de atrito seja criada no momento da extração. A falha na forma de quebra ou lascamento ocorre quando a força de atrito supera a resistência à tração do inserto (SCHMIDT et al 1996, HARRIS & DICKENS 2001 & JACOBS 1996). Outro tipo de falha que pode ser observado é a perda dimensional das peças devido ao afundamento das cavidades durante o processo de injeção (JACOBS, 1996).

Segundo SCHMIDT et al (1996), aparentemente, um longo ciclo de injeção permite que a peça moldada na cavidade tenha um maior resfriamento, reduzindo assim a tendência de aderir no inserto, na fase de extração.

– Material de preenchimento da parte posterior dos insertos

Os insertos em forma de casca geralmente são preenchidos na parte posterior com ligas de baixo ponto de fusão à base de estanho ou resinas epóxi com carga de alumínio e massa plástica. Segundo GOMIDE (2000), os principais objetivos do preenchimento são:

- Dar ao inserto em forma de casca, maior resistência mecânica para que ele suporte os esforços durante o processo de injeção;
- Promover uma retirada de calor mais eficiente devido à baixa condutividade térmica da resina de estereolitografia.

Segundo JACOBS (1996) e GOMIDE (2000), as vantagens do preenchimento da parte posterior do inserto são:

- O menor consumo de resina na construção dos insertos implica em menores custos, já que os materiais de preenchimento são mais baratos que a resina de estereolitografia;
- As ligas de baixo ponto de fusão possuem uma condutividade térmica que chega a ser três vezes maior do que a resina de estereolitografia;
- As ligas de baixo ponto de fusão podem ser reaproveitadas;
- O ciclo de injeção pode ser reduzido de 5 para aproximadamente 3 minutos, se um sistema de refrigeração for utilizado.

Segundo JACOBS (1996), as desvantagens do preenchimento da parte posterior do inserto são:

- O processo não é mais direto, já que o preenchimento da parte posterior do inserto é agora necessária;
- O ativador colocado na resina de preenchimento provoca uma reação exotérmica capaz de deformar o inserto antes da sua utilização. O calor liberado durante a solidificação da liga de baixo ponto de fusão também pode deformar o inserto.

– Efeito escada

É característico dos processos de construção por adição de camadas um fenômeno conhecido como “efeito escada” (Figura 3.12). O efeito escada ocorre em paredes verticais devido à sobreposição das camadas. Quanto menor a espessura das camadas, menor será este efeito e, conseqüentemente, menor a rugosidade.

Segundo CEDORGE & COLTON (2000), o efeito da rugosidade, devido ao efeito escada combinado com a contração da peça durante o resfriamento sobre a cavidade macho, levam a altas forças de extração que podem danificar a peça e/ou o molde.

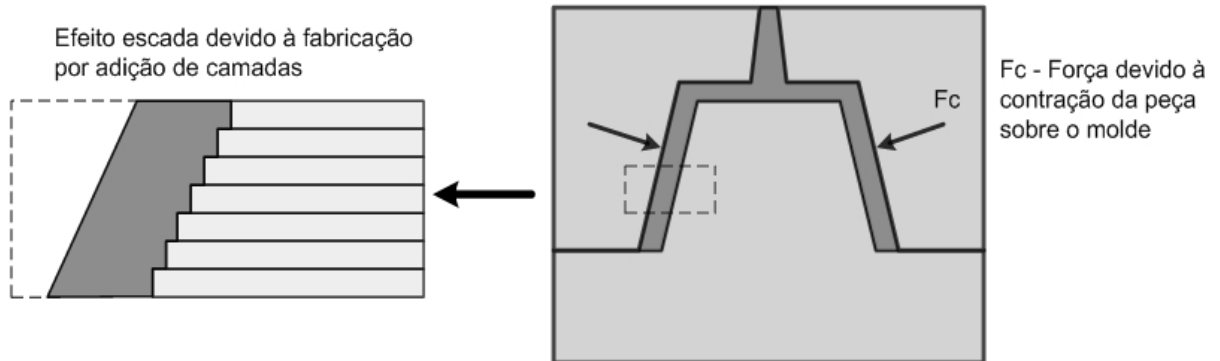


Figura 3.12 – Origem comum de falha em insertos de estereolitografia (PHAM & COLTON, 2000).

3.2.8 – Diferença da força de extração entre PP, ABS e PA 6,6

HARRIS & DICKENS (2001) investigaram a influência da espessura da camada e do ângulo de saída na força de extração de insertos fabricados com a resina SL5190. Os termoplásticos utilizados foram PP, ABS e PA 6,6. Segundo os autores, as espessuras de camada de 0,15, 0,1 e 0,05 mm resultaram em valores de rugosidade (R_a) de 15, 10 e 3 μm respectivamente. Para os ângulos de saída $0,5^\circ$, 1° e $1,5^\circ$ utilizando uma mesma espessura de camada, a rugosidade média ficou em 10 μm . Após a injeção de 15 peças com ambos os termoplásticos, a rugosidade da cavidade dos insertos permaneceu inalterada.

Segundo HARRIS & DICKENS (2001), maiores espessuras de camada resultam em níveis mais elevados de forças de extração, pois quanto maior a irregularidade da superfície da cavidade maior será a aderência do termoplástico. A Figura 3.14. mostra o comportamento da força de extração em relação à espessura da camada de 0,1 mm para o PP, ABS e o PA 6,6.

O ângulo de saída é utilizado com o objetivo de reduzir a força necessária para a extração da peça e, segundo HARRIS & DICKENS (2001), o aumento do ângulo de saída reduziu a força de extração para os três termoplásticos analisados. A Figura 3.13 mostra o comportamento da força de extração em relação à espessura da camada de 0,1 mm para o PP, ABS e o PA 6,6.

As Figuras 3.13 e 3.14 mostram que a utilização de um desmoldante também ajudou a reduzir a força de extração, sendo que sua ação se prolonga por mais de

um ciclo, pois nota-se um gradual aumento na força de extração nos ciclos consecutivos a sua aplicação (ciclos 1 e 10).

HARRIS & DICKENS (2001) afirmam que o efeito da espessura da camada é maior do que o efeito do ângulo de saída na força de extração.

Segundo HARRIS & DICKENS (2001), as forças de extração experimentadas por cada material podem ser devido às suas características de contração e propriedades mecânicas. HARRIS & DICKENS (2001) também comentam que apesar dos materiais semicristalinos apresentarem um maior índice de contração do que os materiais amorfos, as menores forças de extração do PP, observadas nas Figuras 3.13 e 3.14, são justificadas como consequência de que a maior parte de sua contração ocorre após a extração (devido à baixa condutividade térmica do inserto). Outro fato é que este material é bastante flexível quando comparado ao PA 6,6. Esta flexibilidade facilita que a peça se deforme durante a extração, de maneira que o atrito entre a peça e a superfície do inserto seja reduzido, resultando em menores forças de extração.

Também pode ser observado nas Figuras 3.13 e 3.14 que as maiores forças de extração na moldagem dos três materiais investigados variam do PA até o PP, sendo que o ABS tem um comportamento intermediário.

HARRIS & DICKENS (2001) afirmam que o tempo de refrigeração antes da extração da peça afeta a força de reação normal entre a peça e o molde e, portanto afeta a força de extração.

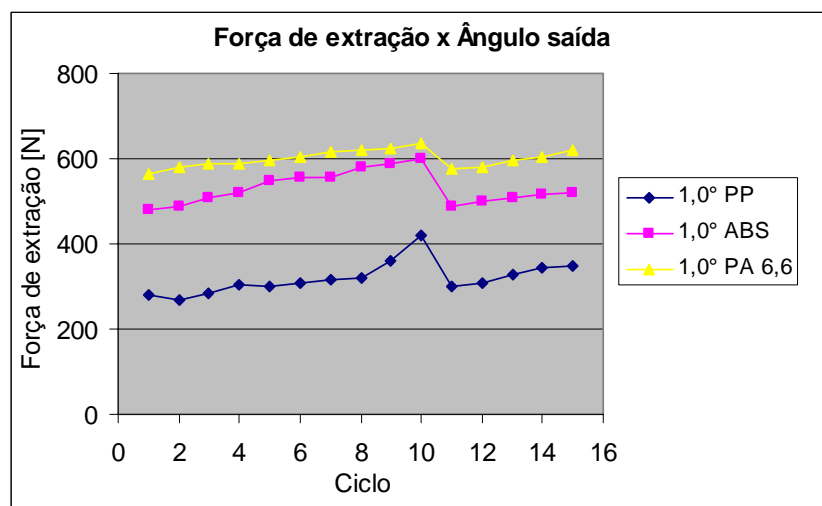


Figura 3.13 – Força de extração versus ângulo de saída para PP, ABS e PA (adaptado de HARRIS & DICKENS, 2001).

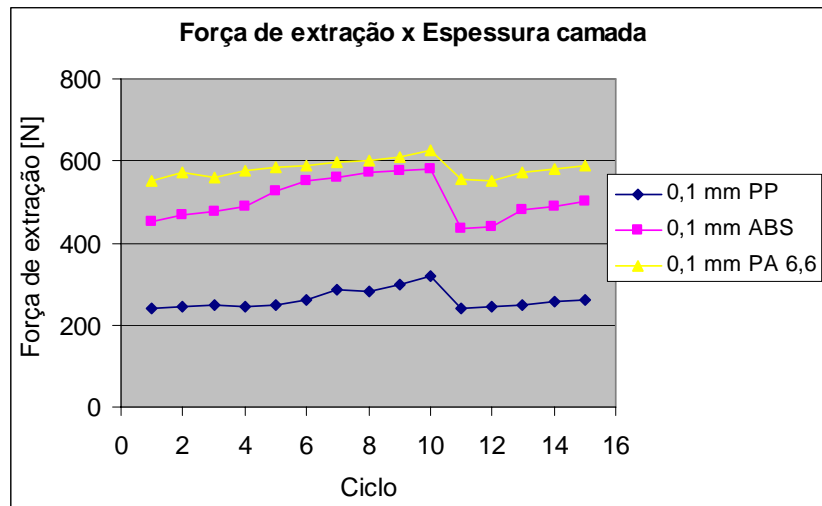


Figura 3.14 – Força de extração versus espessura de camada para PP, ABS e PA (adaptado de HARRIS & DICKENS, 2001).

Segundo CEDORGE & COLTON (2000), a alta rugosidade dos insertos fabricados por estereolitografia provoca um grande atrito entre a peça e o inserto, o qual aumenta a força e a probabilidade de falha durante a extração da peça. CEDORGE & COLTON (2000) ainda afirmam que o aumento do ângulo de saída nem sempre facilita a extração da peça, porque a rugosidade é influenciada por este ângulo, e com o aumento da rugosidade a força de extração também aumenta. Segundo estes autores, existe uma relação de compromisso entre a rugosidade e o ângulo de saída. A Figura 3.15 mostra como o aumento do ângulo de saída pode influenciar no aumento da rugosidade devido ao efeito escada.

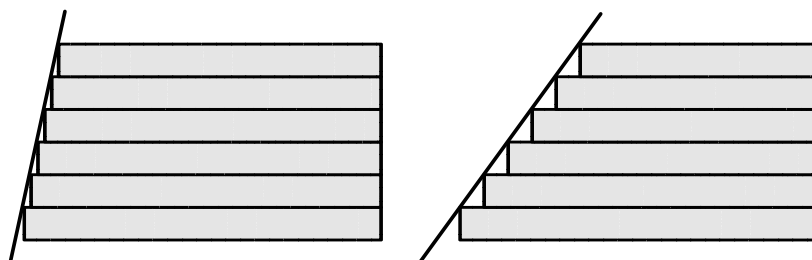


Figura 3.15 – Efeito escada em superfícies inclinadas (CEDORGE & COLTON, 2000).

CAPÍTULO 4 – DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

4.1 – ESCOPO DA PESQUISA

Visando realizar a comparação entre os parâmetros de injeção utilizados na moldagem por injeção utilizando-se ferramental convencional com os do ferramental rápido por estereolitografia, foram realizados três estudos de caso. Um inserto fabricado pelo processo convencional em aço e um pelo processo de estereolitografia foram utilizados na moldagem de um corpo de prova para ensaio de tração.

O material termoplástico utilizado nos dois tipos de inserto, no estudo de caso 1, 2 e 3, foram respectivamente PP, ABS e PA 6,6. Um sistema CAE para a simulação do processo de moldagem por injeção também foi utilizado para a comparação entre os parâmetros do processo experimental com a simulação, nos estudos de caso 2 e 3.

4.2 – DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA – ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3

A geometria escolhida para a realização dos estudos de caso foi a de um corpo de prova para ensaio de tração. Tanto o inserto de aço quanto o de estereolitografia foram confeccionados segundo a norma ASTM D 638m, tipo IV (ASTM, 1986). A forma geométrica do corpo de prova de tração é considerada relativamente simples, tanto do ponto de vista de fabricação do inserto quanto do processo de moldagem por injeção.

Além da simplicidade geométrica e da facilidade de fabricação e processamento, outros fatores que também contribuíram para a escolha deste corpo de prova foram: a ausência de um inserto metálico com esta geometria no laboratório, a possibilidade da sua utilização em outros trabalhos de pesquisa, como também as restrições relativas à máquina de prototipagem rápida (250x250x250 mm) e do porta-moldes utilizado (130x260 mm), com bucha de injeção disposta no centro.

4.3 – PROJETO DOS INSERTOS – ESTUDOS DE CASO 1, 2 E 3

Apesar dos dois insertos utilizados na realização do trabalho possuírem a mesma geometria da cavidade, existem algumas diferenças construtivas que serão comentadas nos itens 4.3.1 e 4.3.2.

4.3.1 – Projeto do inserto de aço – Estudos de caso 1, 2 e 3

O inserto metálico foi fabricado em aço ABNT 1045, sendo que o mesmo não sofreu tratamento térmico após a usinagem, somente o polimento da cavidade. Foi considerado um índice de contração de 2% nas dimensões da cavidade para a compensação da contração do material. Este valor foi escolhido porque, anteriormente à realização deste estudo de caso, este inserto foi projetado e utilizado por LAFRATTA (2003), que utilizou polipropileno em seus experimentos. A cavidade do inserto também não apresenta ângulo de saída. As principais dimensões nominais do corpo de prova são: comprimento total de 120 mm, espessura de 3,0 mm, largura da região central (região útil) de 6,0 mm, comprimento da região central de 33,0 mm. A Figura 4.1 mostra a geometria do corpo de prova utilizado.



Figura 4.1 – Corpo de prova de tração modelado em CAD.

Da mesma forma que utilizado por LAFRATTA (2003), o projeto dos canais de refrigeração seguiram as recomendações contidas em CEFAMOL (1995), e na norma ASTM, já citada. As principais características do sistema de refrigeração são: diâmetro dos canais de 8,0 mm, distância entre os canais de 20,0 mm e distância do centro dos canais até a cavidade de 22,0 mm. A Figura 4.2 ilustra o posicionamento dos canais no inserto móvel.

LAFRATTA (2003) também comenta que as dimensões do ponto de injeção estão de acordo com as recomendações da norma ASTM, já referenciada e que suas dimensões são: largura de 6,0 mm e profundidade de 3,0 mm. Porém, na realidade, o sistema de alimentação semicircular possui largura de 8 mm e profundidade de 4 mm, e o ponto de injeção largura de 8 mm e profundidade de 3 mm. Outra observação é que devido a restrições de espaço do porta-molde disponível, o ponto de injeção teve que ser posicionado na lateral do corpo de prova, como ilustra a Figura 4.2.

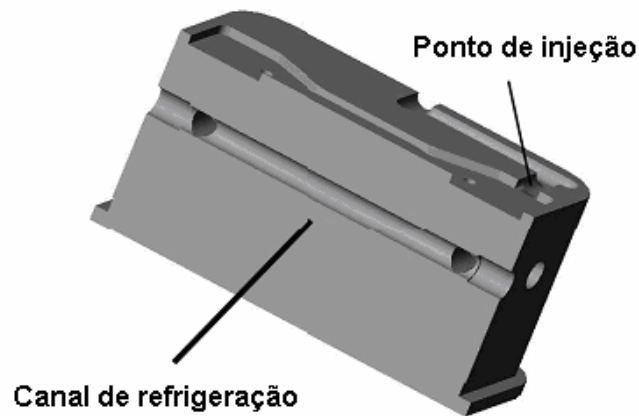


Figura 4.2 – Corte longitudinal do inserto em aço (LAFRATTA, 2003).

A linha de fechamento do inserto coincide com a linha de fechamento do portamoldes. O inserto possui dois orifícios por onde dois pinos extratores são responsáveis pela extração da peça moldada.

Para a realização das medições da temperatura na cavidade do inserto de aço durante o ciclo de injeção, foi utilizado um termômetro digital com um termopar tipo K. O posicionamento do termopar na cavidade do inserto foi realizado com a utilização de uma peça cilíndrica de alumínio perfurada, que foi fixado de maneira forçada na posição do pino extrator mais próximo ao ponto de injeção. A Figura 4.3 mostra o detalhe do posicionamento do termopar. A extração da peça não foi comprometida, pois como também pode ser visto na Figura 4.3, esse processo era realizado pelo segundo extrator da cavidade juntamente com o extrator da bucha de injeção.

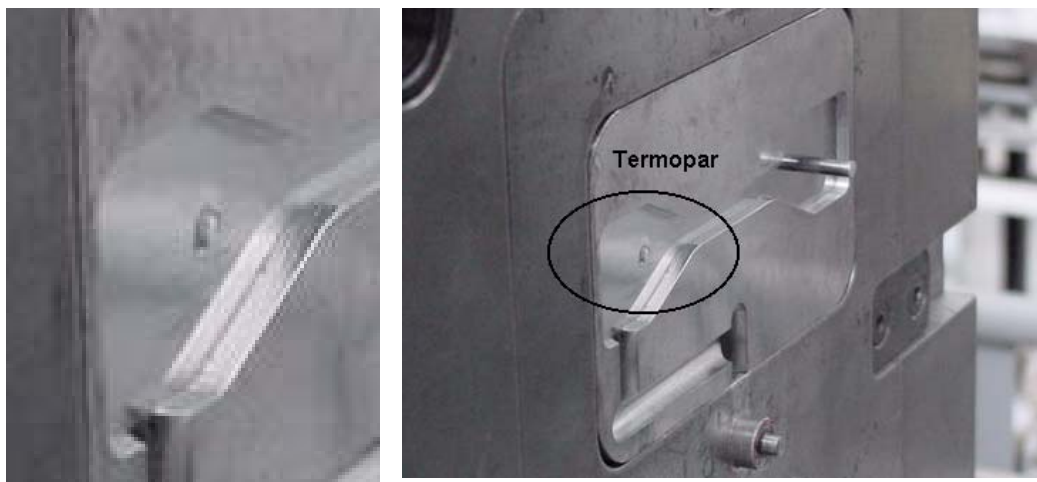


Figura 4.3 – Detalhe do posicionamento do termopar no inserto de aço.

O fluido utilizado no sistema de refrigeração do inserto foi água, sendo que para o caso do polipropileno a sua fonte era a própria máquina injetora, a qual estava diretamente ligada a uma torre de resfriamento. No caso dos materiais termoplásticos ABS e PA 6,6, os quais necessitam que o inserto seja aquecido a uma temperatura de pelo menos 50°C antes do seu processamento, um equipamento auxiliar teve que ser utilizado. Este equipamento é conhecido comercialmente como “banho térmico” e possibilita uma variação de temperatura da água circulante de 0 até 99°C. Para o caso de pequenos insertos, como o utilizado neste experimento, este equipamento funcionou de maneira satisfatória. A Figura 4.4 mostra em detalhes as mangueiras de saída e de retorno de água ligadas no banho térmico e no porta-moldes. Na Figura 4.4 da direita também pode ser visualizado o equipamento utilizado para fazer as leituras da temperatura proveniente da bucha de alumínio na cavidade do inserto de aço.



Figura 4.4 – Detalhes do equipamento de aquecimento (esquerda superior), equipamento para medição de temperatura do inserto (direita superior) e do conjunto inserto de aço e sistema de medição de temperatura.

4.3.2 – Projeto do inserto de estereolitografia – Estudos de caso 1, 2 e 3

O inserto de estereolitografia na forma de casca foi construído a partir de um modelo CAD importado num formato de um arquivo “.stl” pela máquina de estereolitografia e pós-curado em forno ultravioleta por uma hora. Para a cavidade

do inserto, foi utilizado um ângulo de saída de 1° para facilitar a desmoldagem da peça injetada e um acréscimo de 2% nas dimensões da cavidade para compensar a contração do material, da mesma forma que o inserto de aço. A espessura de casca utilizada para as paredes do inserto foi de 2,0 mm. O sistema de alimentação era composto pela bucha de injeção do porta-moldes, um canal de alimentação circular com diâmetro de 6 mm e um ponto de injeção também circular com variação de 6 para 3 mm no local da entrada de material. O sistema de extração e as dimensões do corpo de prova foram mantidas iguais às do inserto em aço.

Para efetuar a leitura e gravação dos valores de temperatura enviados pelos termopares, foi utilizado o sistema de aquisição de sinais PicoLog TC-08 (PICO, 2003), mostrado na Figura 4.5. Este sistema possibilita a leitura e armazenamento de dados recebidos por até oito termopares simultaneamente.



Figura 4.5 – Sistema de aquisição de sinais Pico Log – TC 08 (PICO, 2003).

A Figura 4.6 mostra o local onde os dois termopares do tipo K foram instalados para realizar a medição de temperatura no inserto de estereolitografia durante a moldagem. A instrumentação possibilita identificar o momento exato do início do ciclo e, a obtenção das temperaturas máxima e mínima da cavidade, as quais serão comparadas com os resultados obtidos por simulação. O termopar foi posicionado a uma distância de 1 mm da cavidade, ou seja, como o inserto possuía espessura de casca de 2 mm, então as medições correspondem à temperatura na região da espessura média da casca. Apesar de dois termopares terem sido instalados, somente as leituras efetuadas pelo termopar próximo do ponto de injeção foram levadas em consideração por terem medido os maiores valores de temperatura no inserto.

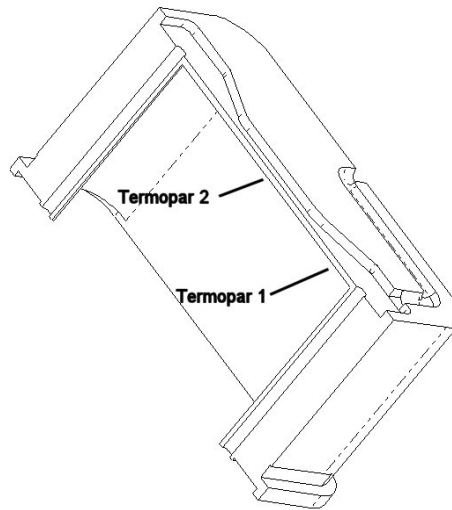


Figura 4.6 – Corte no inserto móvel de estereolitografia mostrando a localização dos termopares (LAFRATTA, 2003).

Após a construção do inserto pela máquina de estereolitografia, a parte posterior foi preenchida inicialmente com uma camada de cerca de 20 mm de resina epóxi com carga de alumínio e o restante com massa plástica. O uso do preenchimento da parte posterior deste tipo de inserto é necessária principalmente para lhe dar suporte estrutural durante o processo de injeção. Entretanto, nenhum tipo de reforço interno como nervuras, geralmente utilizadas para aumentar a resistência do inserto às deformações sofridas pela liberação de calor da resina epóxi durante o preenchimento da parte posterior, foi empregado. Por este motivo, as deformações sofridas pelo inserto provocaram empenamento em regiões críticas, que foram niveladas e ajustadas através de um processo de lixamento. Neste caso, duas ou três tentativas de ajustamento, que compreendem lixamento, montagem do conjunto, injeção das peças, desmontagem do conjunto, novo ajustamento etc, foram necessárias antes que o conjunto de insertos estivesse pronto para ser utilizado. O fechamento inadequado do conjunto de insertos com o porta-moldes pode levar ao surgimento de rebarba nas peças e a possibilidade de quebra de algumas partes do inserto. Para melhorar o fechamento dos insertos, eles foram dimensionados de maneira que suas faces de contato tivessem uma interferência de cerca de 0,1 mm em relação à linha de fechamento do porta-moldes.

O conjunto de insertos utilizados não possuía nenhum tipo de sistema de refrigeração, sendo que o calor absorvido pelo mesmo durante o processo de injeção, poderia ser trocado com o ambiente e o porta-moldes, somente por

condução e convecção, ou com a utilização de jatos de ar aplicados diretamente sobre a cavidade do inserto.

4.4 – MODELOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO – ESTUDOS DE CASO 2 E 3

A criação dos modelos para a simulação do processo de moldagem por injeção foi realizada de acordo com as recomendações do Anexo 4. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram respectivamente o modelo utilizado no processo de simulação do inserto de aço e de estereolitografia. Os detalhes a respeito do projeto do sistema de alimentação e refrigeração são descritos no item 4.3.

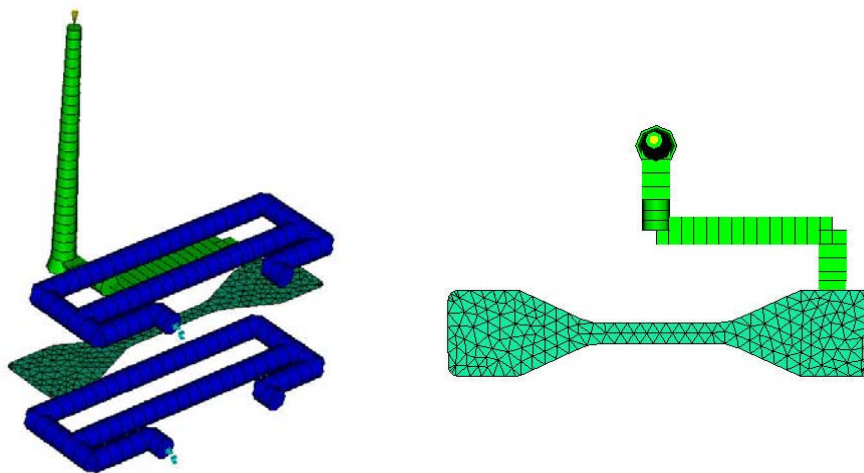


Figura 4.7 – Vistas do modelo CAE com sistema de alimentação e de refrigeração para o inserto de aço.

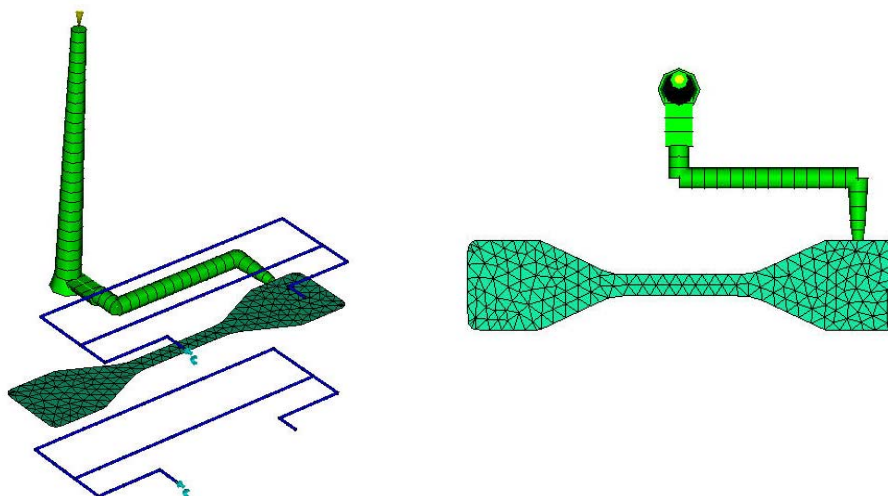


Figura 4.8 – Vistas do modelo CAE com sistema de alimentação e refrigeração para o inserto de estereolitografia.

Na seqüência são comentados os procedimentos e cuidados tomados na criação dos modelos.

4.4.1 – Importação do modelo CAD

Criado o modelo da peça no sistema CAD, esse foi traduzido e exportado para o sistema CAE através de um arquivo no formato “.stl”.

4.4.2 – Tipo de malha e número de elementos

Devido à simplicidade inerente à forma plana da geometria utilizada, optou-se pela utilização de uma malha do tipo *midplane* com 522 elementos. A escolha do número de elementos foi baseada em testes realizados num mesmo modelo com diferente número de elementos. O objetivo do teste mostrado na Tabela 4.1 foi verificar a influência do número de elementos na precisão e no tempo de processamento da análise. O material utilizado foi o ABS Cyclic GPM 6300 da GE Plastics.

Tabela 4.1 – Comparação entre o número de elementos e a precisão dos resultados do modelo CAE.

N° elementos	1208	796	522
Tempo processamento (s)	80,5	34,8	17,4
Tempo injeção (s)	1,43	1,44	1,44
Pressão injeção (bar)	362	362	363
Tempo resfriamento (s)	11,8	11,8	11,8
Taxa cisalhamento (1/s)	5932	5049	4663
Tensão cisalhamento (MPa)	0,36	0,34	0,33

Como pode ser verificado na Tabela 4.1, não existe diferença significativa entre os principais resultados da fase de preenchimento e refrigeração. A exceção é a taxa de cisalhamento do modelo com 1208 elementos, que é em torno de 27% maior do que o modelo com 522 elementos. Porém, como o limite máximo para a taxa de cisalhamento do material empregado (50.000 1/s) é bem superior aos valores encontrados, essa pequena variação não invalida o modelo com o menor número de elementos. Com relação ao tempo de processamento, o modelo com 522 elementos é cerca de 4,6 vezes mais rápido que o modelo com 1208 elementos, fato que torna mais ágil o processo de interatividade entre a modificação dos parâmetros de

entrada e a análise dos resultados. Baseado nestes fatos, optou-se pela utilização do modelo com 522 elementos devido ao menor tempo de processamento e boa precisão dos resultados.

Segundo a MOLDFLOW (2001), empresa desenvolvedora do *software* CAE comercial utilizado neste trabalho, o raio de aspecto é a relação entre o maior lado do elemento triangular e a sua altura, e por motivos de precisão da análise, esse valor não deve ser maior do que 6. O raio de aspecto dos modelos utilizados nos estudos de caso do inserto de aço e de estereolitografia pode ser visualizado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação entre raio de aspecto dos modelos utilizados.

Modelo	Aço	Estereolitografia
Raio de aspecto mínimo	1,16	1,16
Raio de aspecto máximo	3,09	3,18
Raio de aspecto médio	1,56	1,56

4.4.3 – Seleção da resina termoplástica para os estudos de caso 1, 2 e 3

A Figura 4.9 mostra a janela para seleção da resina termoplástica no banco de dados do *software* de simulação. Nos estudos de caso 2 e 3, os materiais termoplásticos ABS Cycolac GPM 6300 da GE Plastics e a poliamida Technyl A216 da Rhodia foram selecionados para a execução das análises, porém o polipropileno H301 da Braskem não estava presente neste banco de dados.

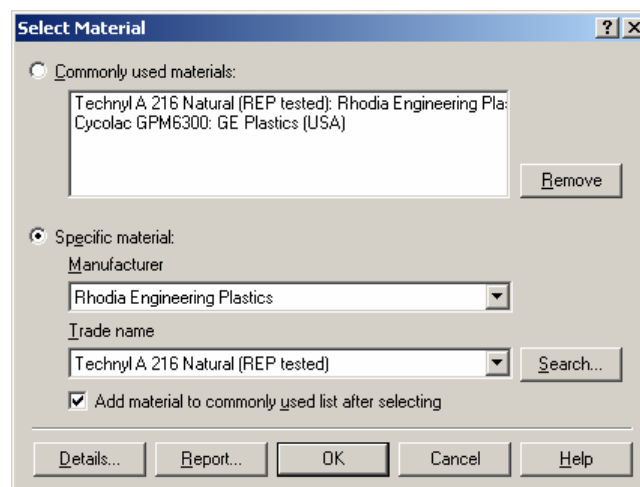


Figura 4.9 – Janela para a seleção da resina termoplástica no banco de dados do *software* de simulação.

4.4.4 – Seleção do tipo de análise

Para a realização da simulação do processo de injeção, foram utilizados os módulos de preenchimento, recalque e refrigeração do sistema CAE Moldflow 3.1. As análises foram executadas na seguinte seqüência: *Flow – Cool – Flow*, onde *Flow* = preenchimento + recalque e *Cool* = refrigeração. A utilização da segunda análise de *Flow*, após a análise de *Cool*, tem como objetivo a obtenção de um resultado mais preciso para a fase de preenchimento e recalque, já que nesta segunda análise o *software* leva em conta a temperatura da cavidade calculada pela análise de refrigeração.

4.4.5 – Adequação dos diferentes materiais do molde na peça e no sistema de alimentação

Tanto para o modelo do inserto em aço quanto para o de estereolitografia, a região do sistema de alimentação compreendida pela bucha de injeção foi relacionada como sendo fabricada em aço ABNT 1020.

Para o modelo do inserto em aço, a região compreendida pela peça, canal de alimentação e ponto de injeção foram relacionadas como sendo fabricados em aço ABNT 1045. Os valores referentes às propriedades do aço 1020 já estavam presentes no banco de dados do *software*, não sendo necessária a sua inclusão, porém as propriedades para o aço ABNT 1045 foram introduzidas manualmente.

Para o modelo do inserto de estereolitografia, a região compreendida pela peça, canal de alimentação e ponto de injeção foram relacionadas como sendo fabricadas pela resina de estereolitografia Somos 7110[®]. Sendo que a inserção das propriedades do inserto também foi realizada manualmente devido a sua ausência no banco de dados do *software*. A Figura 4.10 mostra as janelas do *software* de simulação com os valores dos três diferentes materiais utilizados.

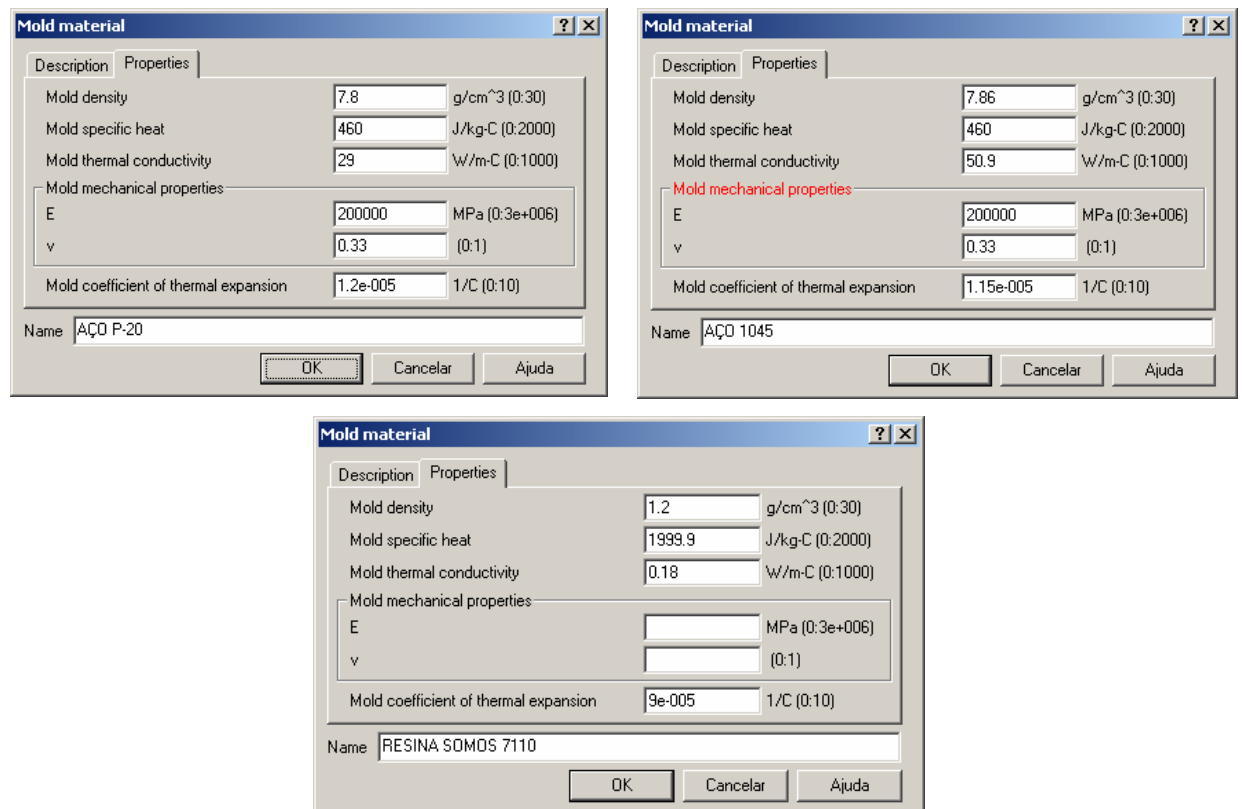


Figura 4.10 – Janelas com parâmetros dos diferentes materiais de molde utilizados.

4.4.6 – Modelagem do sistema de alimentação

O sistema de alimentação do modelo CAE, tanto para o inserto de aço como para o de estereolitografia, foram modelados da maneira mais fiel possível ao da peça real. Entretanto, pequenas simplificações freqüentemente utilizadas nesta atividade que, no entanto, não comprometem a precisão dos resultados, foram realizadas com o objetivo de reduzir o tempo de obtenção do modelo CAE.

4.4.7 – Modelagem do sistema de refrigeração

O modelo do sistema de refrigeração utilizado na simulação do processo de injeção do inserto em aço possui pequenas simplificações, porém as demais características como vazão e temperatura do fluido refrigerante foram mantidas as mesmas do processo experimental.

Devido à necessária presença de um sistema de refrigeração para a utilização do módulo de refrigeração do *software* de simulação, um sistema de refrigeração igual ao utilizado no inserto de aço foi construído para o inserto de estereolitografia. Entretanto, a utilização de canais de refrigeração com diâmetro de 1 mm e vazão de fluido refrigerante de 0,01 l/min com temperatura igual à do inserto no início do ciclo de injeção foram tomadas para torná-lo ineficiente. Esse artifício foi baseado no fato

de que a baixa condutividade térmica da resina de estereolitografia aliada à baixa vazão de fluido refrigerante tendem a garantir a ineficiência do sistema de refrigeração. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram respectivamente os modelos dos sistemas de refrigeração para os insertos em aço e estereolitografia.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as janelas do *software* com as configurações do sistema de refrigeração utilizados nos insertos de aço, sendo que as suas principais características são: canal circular com diâmetro de 8 mm fabricados em aço ABNT 1045, utilização de água como fluido refrigerante com vazão igual a 2 l/min na cavidade fixa e 2 l/min na cavidade móvel.

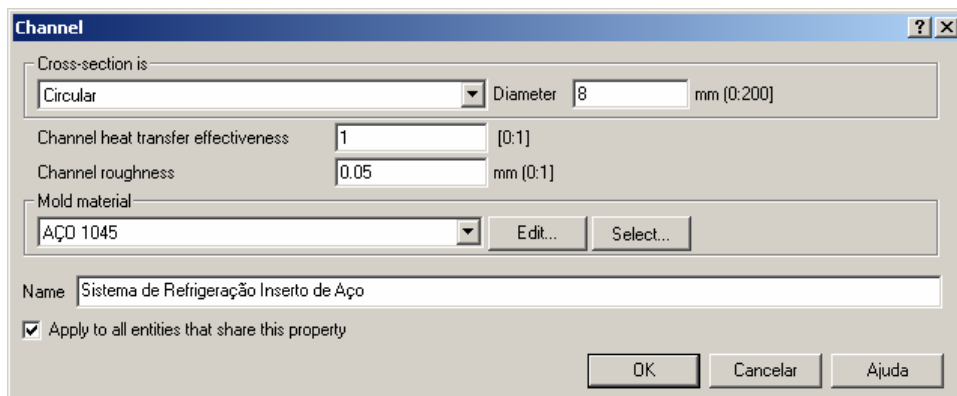


Figura 4.11 – Parâmetros dos canais de refrigeração – inserto de aço.

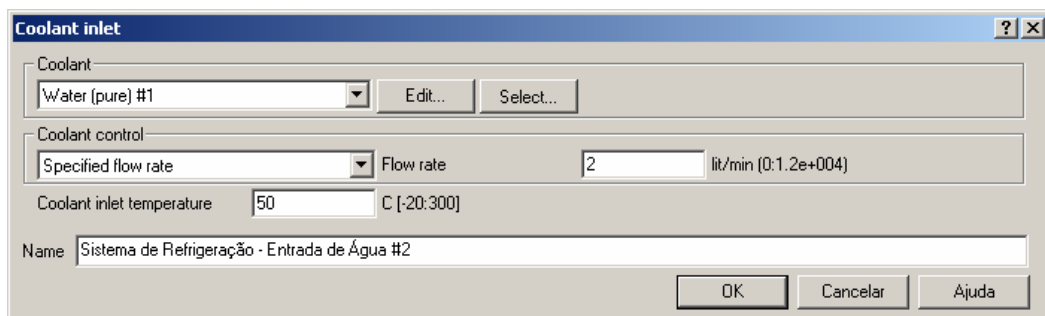
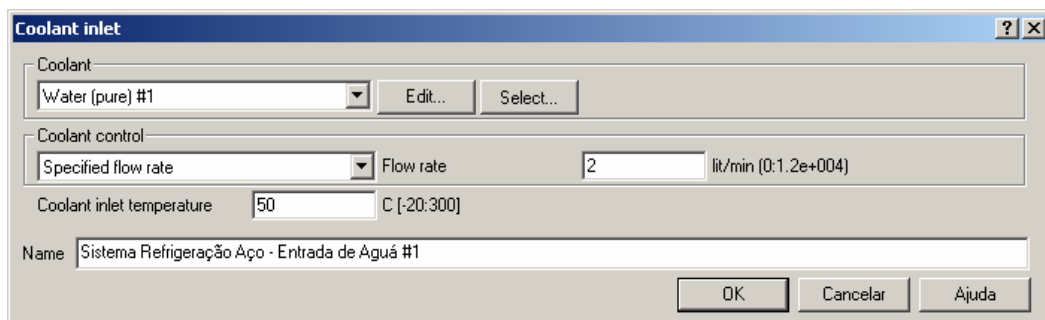


Figura 4.12 – Parâmetros do fluido refrigerante – inserto de aço.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram as janelas do *software* com as configurações do sistema de refrigeração utilizados nos insertos de estereolitografia, sendo que as suas principais características são canal circular com diâmetro de 1 mm fabricados com a resina de estereolitografia Somos 7110[®] e utilização de água como fluido refrigerante com vazão igual a 0,01 l/min na cavidade fixa e 0,01 l/min na cavidade móvel.

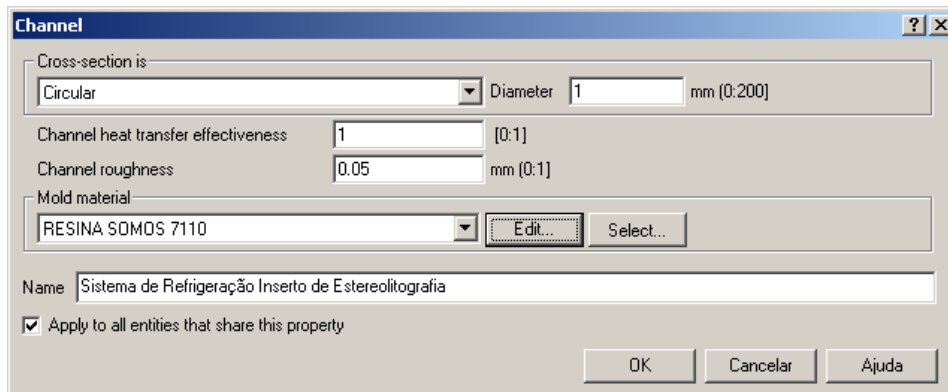


Figura 4.13 – Parâmetros dos canais de refrigeração – inserto de estereolitografia.

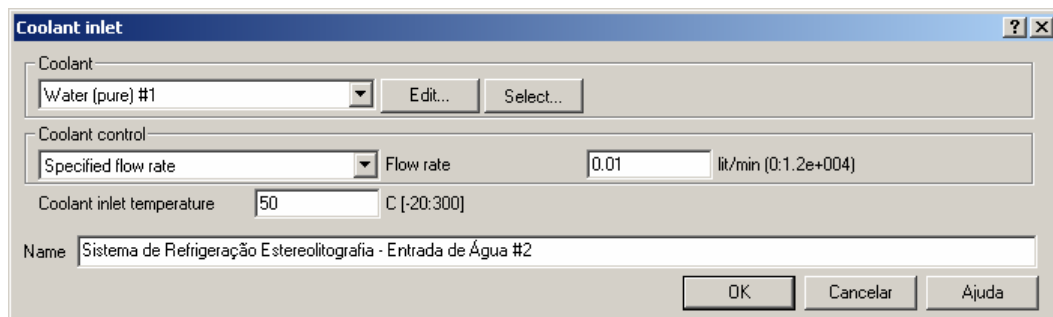
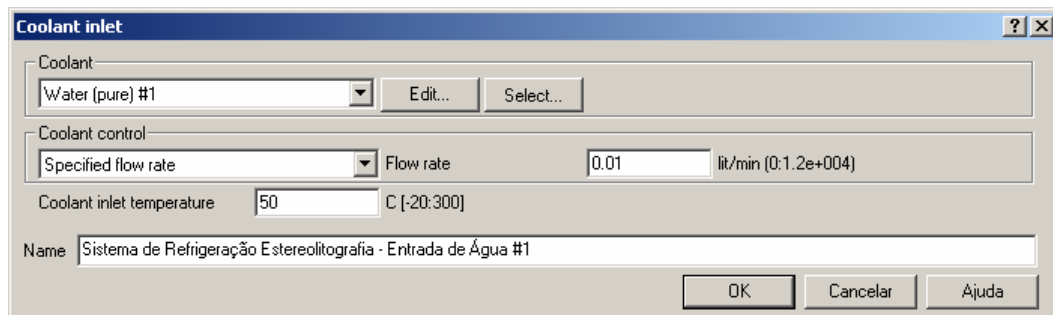
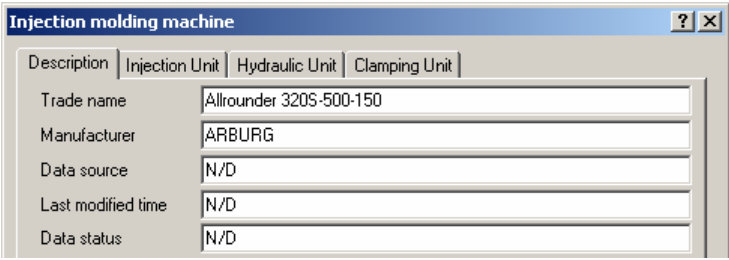


Figura 4.14 – Parâmetros do fluido refrigerante – inserto de estereolitografia.

4.4.8 – Procedimento para a configuração da máquina injetora no *software*

Visto que a máquina injetora não está presente no banco de dados do *software*, alguns dos parâmetros físicos e de capacidade de operação precisaram ser especificados. A entrada destes dados é indicada principalmente nos casos onde o controle da fase de preenchimento é realizado por um perfil de velocidade de injeção versus deslocamento, velocidade de injeção versus tempo ou um perfil de deslocamento versus tempo. Além disso, caso algum parâmetro como a velocidade de injeção, pressão de injeção ou força de fechamento exceder o limite da máquina durante a fase de simulação, o *software* emitirá uma mensagem de alerta sobre o problema ocorrido, facilitando a interpretação dos resultados.

A Figura de 4.15 mostra a janela inicial contendo a descrição do modelo e do fabricante da máquina injetora. Todos os dados contidos nas Figuras de 4.15 até 4.18 foram retirados do manual do usuário da máquina injetora (ARBURG, 1999).



The screenshot shows a software window titled "Injection molding machine" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). Below the title bar is a tabbed interface with four tabs: "Description", "Injection Unit", "Hydraulic Unit", and "Clamping Unit". The "Description" tab is currently selected. The form contains the following fields:

Description	Injection Unit	Hydraulic Unit	Clamping Unit
Trade name	Allrounder 320S-500-150		
Manufacturer	ARBURG		
Data source	N/D		
Last modified time	N/D		
Data status	N/D		

Figura 4.15 – Descrição da máquina injetora.

A Figura de 4.16 mostra a janela onde são configurados o máximo curso, a máxima velocidade e o diâmetro do fuso de injeção. Nesta mesma janela também é possível escolher o tipo de controle da fase de preenchimento que no caso da máquina utilizada foi o deslocamento versus velocidade de injeção, como também o número de pontos para o perfil de velocidade de injeção e pressão de recalque.

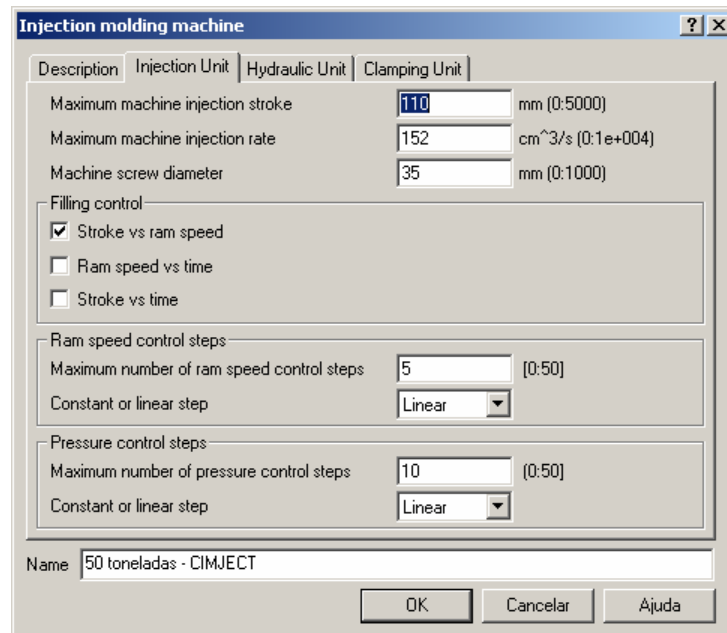


Figura 4.16 – Descrição da unidade de injeção da máquina injetora.

A Figura de 4.17 mostra a janela onde são configuradas a máxima pressão de injeção, a relação entre a pressão de injeção e pressão hidráulica e o tempo de resposta hidráulica da máquina.

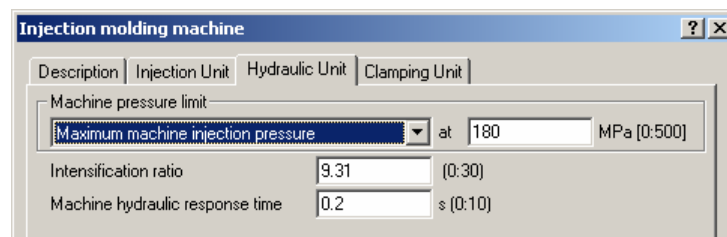


Figura 4.17 – Descrição da unidade hidráulica da máquina injetora.

A Figura de 4.18 mostra a janela onde são configuradas a máxima força de fechamento da máquina injetora e a opção para que este valor não seja excedido.

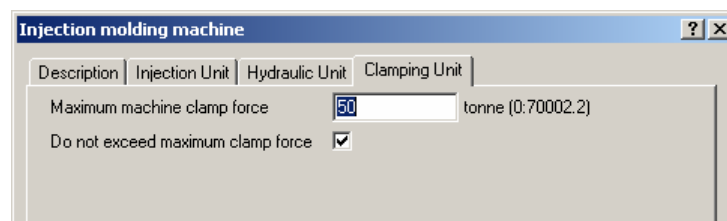


Figura 4.18 – Descrição da unidade de fechamento da máquina injetora.

4.4.9 – Procedimento para configuração do ciclo de injeção

As Figuras 4.19 a 4.22 mostram as janelas utilizadas para a configuração do processo de moldagem por injeção no *software* de simulação. A Figura 4.19 mostra que existem quatro tipos de controle para a fase de preenchimento da cavidade (*Filing control*), sendo eles: automático, por tempo de injeção, por vazão de injeção e com a utilização de perfil de velocidade de injeção versus deslocamento do fuso. Entretanto, como o objetivo da análise foi verificar qual o comportamento dos principais parâmetros de injeção enquanto o processo era simulado no mesmo tempo do processo real, optou-se pela utilização do tempo de injeção como controle da fase de preenchimento da cavidade.

Os parâmetros de entrada para a realização das análises de simulação foram: tempo de injeção, tempo e pressão de recalque, tempo de refrigeração, tempo de molde aberto, temperatura de injeção do termoplástico e temperatura do inserto no início do ciclo de injeção.

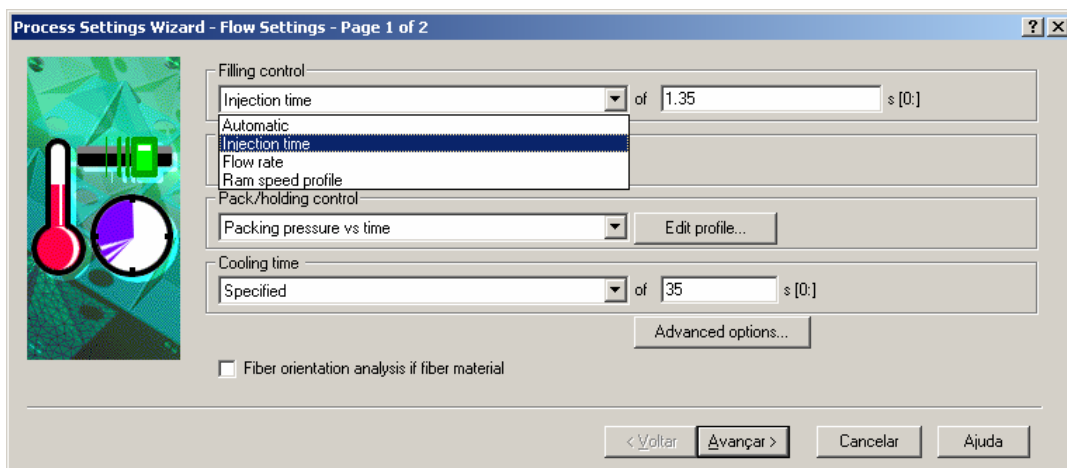


Figura 4.19 – Configuração para o controle da fase de preenchimento e refrigeração.

Com relação à fase de recalque, existem várias maneiras de identificar o ponto de comutação (*velocity/pressure switch-over*), ou seja, a passagem da fase de injeção para recalque. Como mostra a Figura 4.20, nos experimentos realizados foi adotado o método automático, o qual realizava a mudança para a fase de recalque quando a cavidade estava entre 97 e 98% preenchida. Durante a fase de definição dos parâmetros de injeção no processo real, esse também foi o critério adotado para a identificação do ponto de comutação, conforme sugestão do método da injeção progressiva descrito no Anexo 2. A Figura 4.20 também mostra as opções disponíveis para o controle da fase de recalque (*Pack/holding control*). Para todos os

experimentos realizados, tanto na simulação quanto no processo real foram adotados perfis de pressão de recalque constantes. A Figura 4.21 mostra a janela para a entrada do perfil da fase de recalque. Com relação à fase de refrigeração, existem duas opções, definição automática do melhor tempo de refrigeração ou entrada manual deste parâmetro. A opção utilizada em todos os estudos de caso foi a entrada manual do tempo de refrigeração (*cooling time*), conforme pode ser visualizado na Figura 4.19.

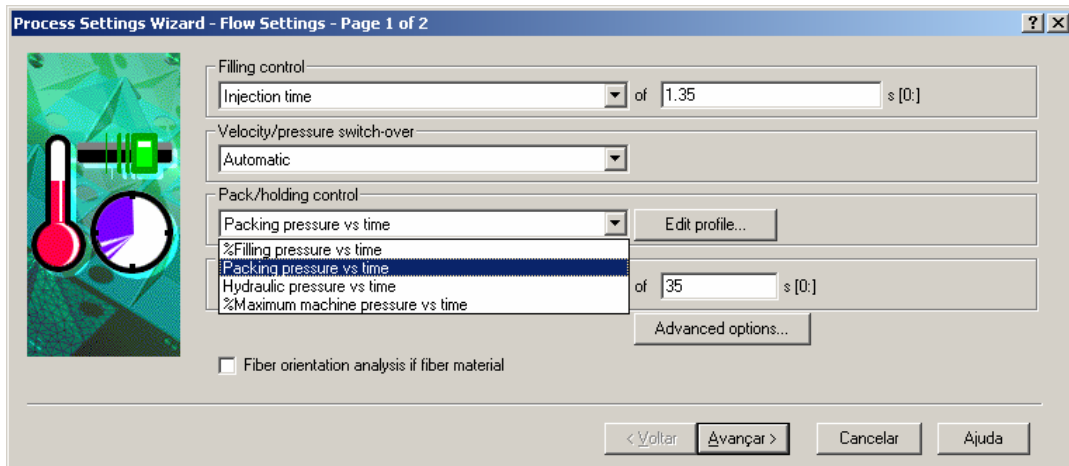


Figura 4.20 – Configuração para o controle da fase de recalque.

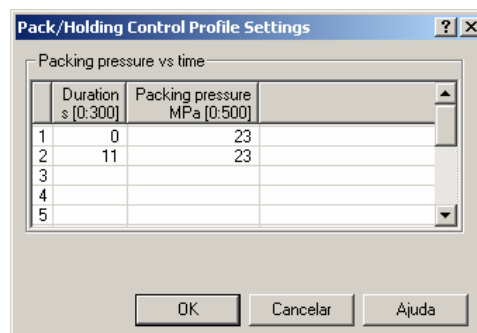


Figura 4.21 – Perfil de pressão de recalque para a fase de recalque.

A Figura 4.22 mostra a janela com os campos disponíveis para a entrada dos parâmetros referentes à temperatura do molde (*mold surface temperature*), temperatura de injeção (*melt temperature*) e tempo de molde aberto (*mold-open time*). O tempo referente ao período de molde aberto compreende o tempo para a abertura do molde após a fase de refrigeração, o tempo de atraso na extração e o tempo necessário para que o inserto atinja a temperatura para o início de um novo ciclo.

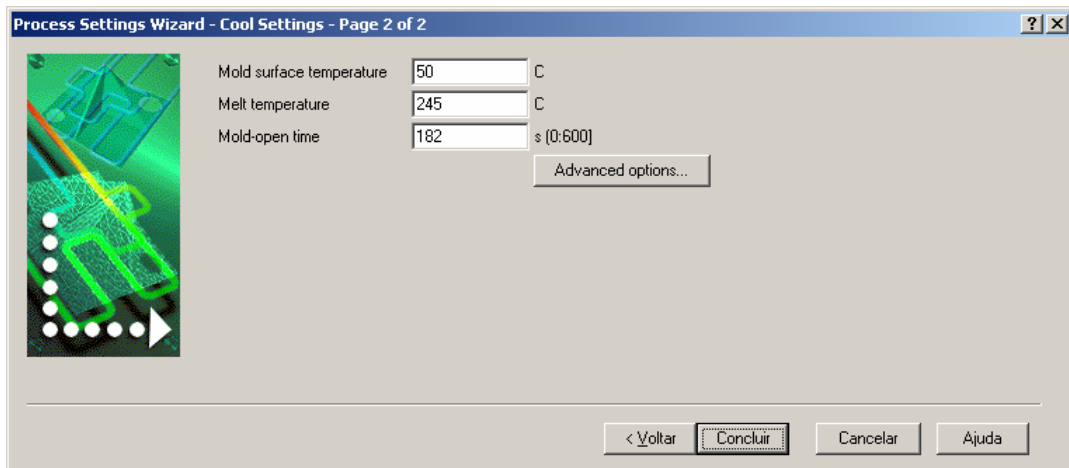


Figura 4.22 – Configuração para o controle da temperatura de injeção, do molde e o tempo de molde aberto.

4.5 – PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM COMUNS AOS ESTUDOS DE CASOS

Para a realização do processo de moldagem por injeção, tanto no inserto de aço quanto no de estereolitografia, foi utilizada uma máquina injetora ARBURG, modelo 320S 500-150 com um fuso universal para termoplásticos de 35 mm de diâmetro. A escolha das temperaturas de processamento foi baseada nas recomendações para o processo de moldagem convencional (Anexo 7) e nas recomendações para o processo de moldagem em insertos de estereolitografia (Anexo 3). O fato de que altas temperaturas de injeção provocam um aumento nos já longos ciclos de moldagem e também provocam a redução das propriedades mecânicas dos insertos de estereolitografia, foram os principais fatores observados nestas recomendações. A determinação dos parâmetros de injeção, utilizando o inserto de aço e de estereolitografia, foi auxiliada pelo método da injeção progressiva (Anexo 2). Como a moldagem para um mesmo material foi realizada primeiro no inserto de aço e depois no de estereolitografia, os parâmetros de moldagem utilizados no inserto de aço também foram levados em conta na moldagem com o inserto de estereolitografia.

A comparação entre os parâmetros obtidos na moldagem por injeção, utilizando o ferramental convencional e o ferramental por estereolitografia para um mesmo termoplástico, foi baseada, sempre que possível, na utilização dos seguintes parâmetros de referência:

- Temperatura de injeção;
- Temperatura do molde;

- Temperatura de refrigeração;
- Vazão de injeção;
- Tempo de injeção;
- Volume de injeção;
- Contrapressão;
- Rotação da rosca.

A utilização dos parâmetros de referência possibilita a obtenção dos demais principais parâmetros de injeção, como função do projeto e material de construção do ferramental, assim como do termoplástico utilizado.

4.5.1 – Moldagem do PP – Estudo de caso 1

O primeiro estudo de caso consistiu na injeção do polipropileno H301 da Braskem, inicialmente no inserto de aço e depois no inserto de estereolitografia. Na seqüência, são comentados os procedimentos empregados na realização dos experimentos e, no capítulo 05, os resultados e discussões. A Tabela 4.3 mostra os principais parâmetros de injeção utilizados neste estudo de caso.

Não foi realizada a simulação em CAE do processo de moldagem por injeção no primeiro estudo de caso, pois o material termoplástico utilizado e seus contratipos não faziam parte do banco de dados da versão do *software* utilizado.

Tabela 4.3 – Parâmetros de injeção de referência utilizados com o PP H301.

Parâmetros de Injeção	Unidade	Aço	SL
Temperatura de injeção (Zonas)	(°C)	205/200/195/ 190/185	205/200/195/ 190/185
Temperatura da cavidade inserto	(°C)	30	40
Temperatura de refrigeração	(°C)	28	N/D*
Volume de injeção	(cm ³)	19	19
Vazão de injeção (Velocidade)	(cm ³ /s)	50	50
Tempo de injeção médio	(s)	1,8	1,8
Força de fechamento	(ton)	5	5
Contrapressão	(bar)	5	5

Rotação da rosca	(rpm)	50	50
------------------	-------	----	----

* N/D – não disponível

– Moldagem com o inserto de aço – PP

A definição dos parâmetros de injeção do PP foi baseada em valores recomendados no Anexo 7 e pela ficha técnica fornecida pelo fabricante do material termoplástico. O método da injeção progressiva (Anexo 2) também foi utilizado na determinação dos demais parâmetros de processo.

O processo de injeção dos corpos de prova no inserto de aço apresentou peças de boa qualidade, entretanto os problemas de rechupe só foram solucionados com a utilização de longos tempos de recalque. Para a definição dos parâmetros e a estabilização do processo de injeção, foram injetados aproximadamente 30 corpos de prova.

Inicialmente, fez-se a tentativa de realizar o processo de injeção com uma temperatura máxima, no bico, de 200°C, porém essa temperatura se mostrou inadequada pelo freqüente entupimento do bico de injeção causado pelo congelamento do termoplástico. Dessa forma, a temperatura foi elevada para 205°C e as demais quatro zonas receberam valores decrescentes de cinco em cinco graus.

A temperatura utilizada no inserto, inicialmente, foi de 40°C, porém com essa temperatura houve a formação de rechupes, na forma de pequenas bolhas no centro do corpo de prova (região útil), o qual só foi completamente eliminado com a redução desta temperatura para 30°C. A leitura da temperatura da cavidade foi realizada com o auxílio de um termopar instalado na posição do pino extrator próximo ao canal de injeção, como já comentado no item 4.3.1 e mostrado na Figura 4.3. O molde foi refrigerado com água, a 28°C, proveniente de uma torre de resfriamento.

– Moldagem com o inserto de estereolitografia – PP

O processo para a definição dos parâmetros de injeção do polipropileno no inserto de estereolitografia mostrou ser mais difícil do que para o inserto de aço, por dois motivos. O primeiro problema já era esperado, pois como ocorreu no inserto de aço, os problemas de rechupe também se fizeram presentes, porém de maneira mais intensa. Como pode ser verificado no Anexo 3, Tabela A9, a resina de estereolitografia é um material que possui um baixo coeficiente de condutibilidade térmica quando comparado ao aço ABNT 1020 (0,18 x 30 (W/m°C)) e, mais baixo

ainda quando comparado ao aço ABNT 1045 (0,18 x 50 (W/m°C)). Além disso, o inserto de estereolitografia utilizado nos experimentos não possuía sistema de refrigeração, o que tornou mais lenta a transferência de calor tanto da peça injetada quanto do inserto para o ambiente. Como consequência, os problemas de rechupe nas peças moldadas no inserto de resina aumentaram tanto que o tempo de recalque necessário, para garantir que o ponto de injeção solidificasse antes do fim do recalque, quase triplicou.

O segundo problema esteve relacionado com o aparecimento de rebarbas nas peças injetadas, devido ao empenamento de uma das cavidades do inserto durante a fase de preenchimento da parte posterior. O acerto dos parâmetros só foi possível depois de um processo de ajuste do fechamento do inserto, devido à quebra dos seus suportes durante as primeiras tentativas de ajuste dos parâmetros, o que possibilitava que a linha de fechamento do inserto ficasse num nível abaixo da linha de fechamento do porta-moldes. Esse problema de fechamento favorecia a formação de rebarbas, as quais aumentaram de maneira progressiva, até provocarem o preenchimento incompleto da peça.

Depois de solucionado o problema de ajuste, no fechamento do inserto, foram injetados aproximadamente 50 corpos de prova para a definição e estabilização dos parâmetros e do processo de injeção. Esse é um valor considerável, se for levado em consideração que este tipo de ferramental tem uma vida útil que gira entre 200 a 300 peças, para a resina Somos 7110[®]. A temperatura do inserto utilizada para o início do processo de injeção foi de 40°C. Não foi possível utilizar a mesma temperatura empregada no inserto de aço, devido ao excessivo aumento dos ciclos de injeção. A temperatura da cavidade do inserto foi controlada por um sistema de aquisição de sinais (Figura 4.5), que recebia informações de um termopar instalado próximo ao ponto de injeção (Figura 4.6).

A regulagem do processo de injeção do inserto de estereolitografia foi realizada com base no processo de injeção do PP no inserto de aço e também nos procedimentos descritos nos Anexos 2, 3 e 7.

4.5.2 – Moldagem e Simulação do ABS – Estudo de caso 2

O segundo estudo de caso consistiu na moldagem do ABS Cylolac GPM 6300 da GE Plastics, nos insertos de aço e de estereolitografia. Como este material termoplástico estava presente no banco de dados do *software* de CAE, também

foram realizadas simulações do processo de moldagem no inserto de aço e no de estereolitografia.

Na seqüência, são comentados os procedimentos empregados no processo experimental e na simulação do processo de moldagem por injeção, nos ferramentais de aço e de estereolitografia. Os resultados e discussões deste estudo de caso são apresentados no capítulo 05. A Tabela 4.4 mostra os principais parâmetros de injeção utilizados no processamento do polipropileno ABS Cyclac GPM 6300 da GE Plastics.

Tabela 4.4 – Parâmetros de injeção de referência utilizados com o ABS Cyclac GPM 6300 da GE Plastics.

Parâmetros de Injeção	Unidade	Aço	SL
Temperatura de injeção (Zonas)	(°C)	245/240/235/ 230/225	245/240/235/ 230/225
Temperatura da cavidade inserto	(°C)	50	50
Temperatura de refrigeração	(°C)	53	N/D*
Volume de injeção	(cm ³)	18,7	18,7
Vazão de injeção (Velocidade)	(cm ³ /s)	50	50
Tempo de injeção médio	(s)	1,4	1,4
Força de fechamento	(ton)	5	5
Contrapressão	(bar)	5	5
Rotação da rosca	(rpm)	50	50
Vazão da refrigeração	(l/s)	4	N/D*

* N/D – não disponível

– Moldagem com o inserto de aço – ABS

O processo de regulagem dos parâmetros de injeção para o processamento do ABS foi relativamente simples. Mais uma vez a utilização do método da injeção progressiva (Anexo 2) e das recomendações para a moldagem convencional (Anexo 7) auxiliaram o ajuste dos parâmetros de processo. Foram injetados aproximadamente 30 corpos de prova até a definição dos parâmetros e estabilização do processo.

Com relação à temperatura de injeção, inicialmente decidiu-se manter a mesma temperatura empregada no processamento do polipropileno (205°C), pois este valor está dentro da faixa de temperatura de processamento de ambos os materiais. No entanto, esse nível de temperatura exigiu uma pressão de 600 bar para o preenchimento da cavidade, ou seja, um nível de pressão de injeção mais de duas vezes superior ao utilizado no PP. Visto que esse nível de pressão é superior ao comumente utilizado no ferramental por estereolitografia, decidiu-se pelo aumento progressivo da temperatura de injeção até que a pressão atingisse níveis comuns para este tipo de ferramental. Neste caso, a temperatura de injeção utilizada foi de 245°C com uma pressão de injeção de 300 bar.

Apesar do processo estar ocorrendo no inserto de aço, a regulagem da temperatura de injeção foi realizada de maneira a procurar um equilíbrio entre temperatura e pressão de injeção, já que o próximo passo seria a injeção dos corpos de prova no inserto de estereolitografia. Deve-se salientar que os únicos valores comuns num mesmo estudo de caso deveriam ser pelo menos a temperatura e o tempo de injeção.

Devido ao ABS ser um material higroscópico, é necessário submetê-lo a um processo de desumidificação, antes do seu processamento. Isso deve necessariamente ocorrer para que sejam evitadas queimas na peça e/ou acidentes com o operador, devido aos vapores gerados pela umidade presente no material. Para a desumidificação do material, ele foi submetido por três horas a uma temperatura de 90°C. Como não se dispunha de um equipamento adequado para realizar esta operação, foi utilizado um processo “caseiro”, onde foram utilizados uma forma e um forno elétrico com controle de temperatura. A aferição da temperatura do forno foi realizada por um termopar de imersão. O material termoplástico foi movimentado dentro da forma a cada uma hora para que ocorresse uma retirada de umidade homogênea.

Para o aquecimento do inserto até a temperatura de injeção (50°C), foi utilizado um equipamento que promovia a circulação de água pelo sistema de refrigeração. O controle de temperatura na cavidade do inserto de aço foi o mesmo utilizado na moldagem do PP. Tanto o equipamento para o aquecimento e circulação de água quanto o sistema de medição de temperatura podem ser visualizados na Figura 4.4.

Para que o processo de injeção pudesse ser comparado com a simulação, além dos parâmetros de referência que podem ser vistos na Tabela 4.4, as curvas experimentais de pressão de injeção, vazão de injeção e deslocamento do fuso

fornecidas pela máquina injetora foram levantadas. A comparação entre as curvas experimentais de processo e as curvas geradas pela simulação serão mostradas e comentadas no capítulo 5.

– Moldagem com o inserto de estereolitografia – ABS

A regulagem do processo de injeção do inserto de estereolitografia foi realizada com base no processo de injeção do ABS no inserto de aço e também nos procedimentos descritos nos Anexos 2, 3 e 7.

A pressão de injeção ajustada inicialmente foi a mesma do inserto de aço, ou seja, 300 bar, porém, com essa pressão, o tempo de injeção ficou em 1,1 s, contra os 1,4 s do inserto de aço. Dessa forma, foi necessário reduzir a pressão até que os tempos de injeção se igualassem, o que levou a pressão necessária para injetar a peça em 1,4 s para o valor de 290 bar.

O tempo de recalque necessário para que a peça fosse bem preenchida e ficasse livre de defeitos visíveis a olho nu foi de 11 s, entretanto esse período de recalque ainda permitia que a peça aderisse na cavidade, porém sem sofrer deformações permanentes devido à extração.

O inserto de estereolitografia apresentou o rompimento de uma parte muito pequena do canal de alimentação durante o processo de injeção do ABS. No entanto, o processo de determinação dos parâmetros de injeção continuou sem sofrer influência significativa desta falha.

Como já comentado, o inserto não possuía sistema de refrigeração e a temperatura da cavidade para o início de ciclo foi 50°C. A medição da temperatura do inserto foi realizada por um termopar e um sistema de aquisição de sinais, mostrado na Figura 4.5. Através do painel da máquina injetora, também foram retiradas (ponto a ponto em função do tempo) as curvas de processo para a pressão de injeção, pressão de recalque e vazão de injeção para posterior comparação com as curvas geradas por simulação. O material termoplástico também passou pelo mesmo processo de desumidificação utilizado na moldagem com o inserto de aço. Ocorreram poucos problemas durante a regulagem do processo, pois o inserto estava bem ajustado, o que não favorecia o aparecimento de rebarbas.

– Simulação com os modelos do inserto de aço e estereolitografia – ABS

Após a criação do modelo para a realização da simulação do processo de moldagem por injeção, o próximo passo foi selecionar o material termoplástico, a

seqüência de análises e as configurações do processo. A criação dos modelos CAE utilizados seguiram as recomendações do Anexo 4, sendo que uma descrição mais detalhada sobre a fase de criação é descrita no item 4.4.

Foram realizadas análises comparativas entre os principais parâmetros do processo experimental e da simulação do processo de moldagem por injeção nos insertos de aço e de estereolitografia. Além disso, também foram comparadas as curvas de pressão e vazão de injeção experimentais com as obtidas por simulação, comparação entre a forma geométrica do sistema de alimentação dos modelos utilizados na simulação do inserto de aço e de estereolitografia e, por fim, uma avaliação da possibilidade da utilização deste sistema CAE no projeto de insertos fabricados por estereolitografia.

Os principais resultados obtidos com a simulação do processo de moldagem por injeção do ABS no inserto de aço e de estereolitografia são demonstrados e comentados no capítulo 5.

4.5.3 – Moldagem e Simulação do PA 6,6 – Estudo de caso 3

O terceiro estudo de caso consistiu na tentativa da moldagem por injeção da poliamida Technyl A216 da Rhodia nos insertos de aço e de estereolitografia. Tal qual no segundo estudo de caso, a presença do termoplástico no banco de dados do software CAE permitiu a simulação do processo de moldagem.

Os procedimentos empregados no processo experimental e na simulação serão comentados na seqüência. Os resultados e discussões deste estudo de caso serão apresentados no capítulo 05. A Tabela 4.5 mostra os principais parâmetros de injeção utilizados neste estudo de caso.

Tabela 4.5 – Parâmetros de injeção de referência utilizados com a poliamida Technyl A216 da Rhodia.

Parâmetros de Injeção	Unidade	Aço	SL
Temperatura de injeção (Zonas)	(°C)	280/280/275/ 270/265	280/280/275/ 270/265
Temperatura da cavidade inserto	(°C)	60	54
Temperatura de refrigeração	(°C)	84	N/D*
Volume de injeção	(cm ³)	17	17
Vazão de injeção (Velocidade)	(cm ³ /s)	50	50

Tempo de injeção médio	(s)	1,7	indeterminado
Força de fechamento	(ton)	5	5
Contrapressão	(bar)	5	5
Rotação da rosca	(rpm)	50	50
Vazão da refrigeração	(l/s)	4	N/D*

* N/D – não disponível.

– Moldagem com o inserto de aço – PA 6,6

A temperatura de injeção foi baseada em valores recomendados no Anexo 7 e pela ficha técnica, fornecida pelo fabricante do material termoplástico. O método da injeção progressiva (Anexo 2) também foi utilizado na determinação dos demais parâmetros de processo.

Pelo fato da poliamida (PA 6,6) trabalhar com faixas de temperaturas de injeção e de molde superiores às utilizadas no PP e no ABS, as quais são altamente prejudiciais aos insertos de estereolitografia, os níveis de temperatura ajustados no inserto de aço foram os menores com que se conseguiu plastificar e injetar este material. Antes do início do processo de injeção, o PA 6,6, por ser higroscópico, passou por um processo de desumidificação, da mesma forma que o ABS.

O processo de moldagem teve início com a utilização de uma temperatura de injeção de 270°C, porém este nível de temperatura não promovia a completa plastificação do PA 6,6, de forma que os grânulos eram injetados quase que inteiros. Por outro lado, temperaturas pouco inferiores a 280°C provocavam o entupimento do bico de injeção a cada ciclo de moldagem. Dessa forma, a temperatura de 280°C foi a menor com que se conseguiu resolver os problemas de entupimento.

Pelo fato do bico de injeção não ser adequado à moldagem do PA 6,6, a dosagem automática do material pela máquina não conseguia armazenar o material na frente do fuso, de forma que durante a plastificação o material era expelido pelo bico. A solução foi retroceder o fuso manualmente e então realizar a fase de dosagem e plastificação. A poliamida também se mostrou sensível à alteração da temperatura ambiente e pela incidência de correntes de ar sobre a unidade de plastificação, as quais provocavam o desequilíbrio do processo.

A temperatura do molde, no início do processo, foi definida em 60°C (valor mínimo para este material). Água a 84°C circulava de maneira intermitente durante todo o processo, para manter o molde na temperatura mínima de 60°C.

As curvas de pressão, vazão e deslocamento do fuso, durante o processo de injeção, foram levantadas para posterior comparação com os valores da simulação.

– Moldagem com o inserto de estereolitografia – PA 6,6

A prematura falha do inserto de estereolitografia no início do processo não permitiu que os parâmetros de injeção e as curvas de processo fossem levantadas. Assim, optou-se por não realizar a simulação do processo de injeção para a poliamida no inserto de estereolitografia pela falta de dados comparativos.

As temperaturas de injeção e do molde inicialmente foram as mesmas utilizadas no inserto de aço. Entretanto, os demais parâmetros que estavam sendo ajustados, com o auxílio do método da injeção progressiva (Anexo 2), não puderam ser determinados.

No total foram moldadas 12 peças, sendo que o processo de falha do inserto teve início no primeiro ciclo e se desenvolveu ao longo de todo o processo. Com o objetivo de tentar amenizar os danos causados, a temperatura do inserto para o início do ciclo sofreu uma redução, entretanto, após o 12º ciclo, o processo foi interrompido devido ao seu avançado processo de falha.

Como já comentado, o inserto não possuía sistema de refrigeração, e a leitura da temperatura da sua cavidade era realizada com o auxílio do sistema de aquisição de sinais mostrado na Figura 4.5.

– Simulação com os modelos do inserto de aço e estereolitografia – PA 6,6

Após a criação do modelo para a realização da simulação do processo de moldagem por injeção, o próximo passo foi selecionar o tipo de material, seqüência de análises e as configurações do processo. A criação do modelo CAE seguiu as recomendações do Anexo 4, sendo que uma descrição mais detalhada sobre a sua criação é descrita no item 4.4.

Os principais resultados obtidos com a simulação do processo de injeção da poliamida (PA 6,6) no inserto de aço são demonstrados e comentados no capítulo 5.

Devido à falha prematura do inserto, no início da fase de determinação dos parâmetros de injeção da poliamida (PA 6,6), optou-se por não realizar a simulação do processo de moldagem por injeção para este material termoplástico no inserto de estereolitografia, pela falta de parâmetros de entrada e de comparação entre eles.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

5.1 – MOLDAGEM DO PP – ESTUDO DE CASO 1

No primeiro estudo de caso, apenas um pequeno número de peças foi produzido pelo processo de moldagem por injeção, com o uso de um inserto de aço e um de estereolitografia. Como não foi possível realizar a simulação do processo de injeção pela falta do material termoplástico no banco de dados do *software*, o experimento teve como objetivo apenas a comparação dos parâmetros de processamento entre a moldagem convencional e a moldagem em ferramental rápido por estereolitografia.

5.1.1 – Comparação entre os parâmetros de processo utilizados nos inserto de aço e de estereolitografia

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram uma comparação entre os principais parâmetros de processo utilizados na moldagem por injeção do polipropileno com o inserto de aço e de estereolitografia.

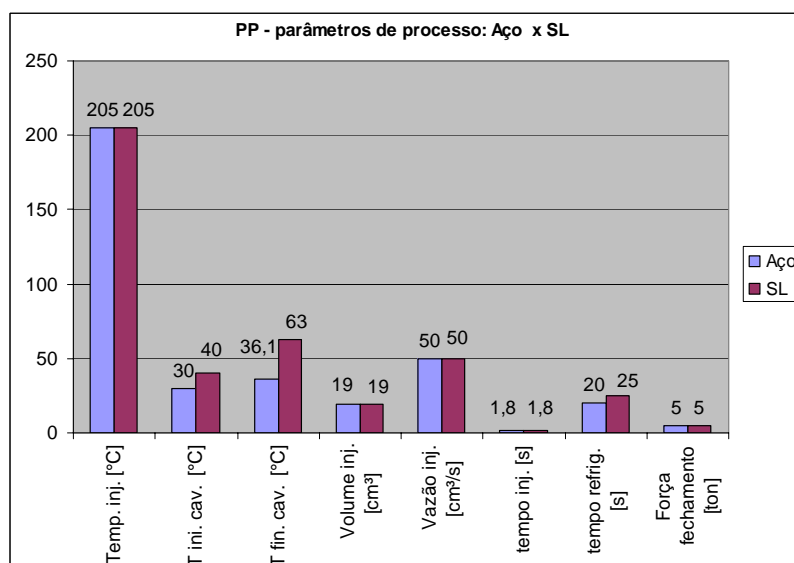


Figura 5.1 – Comparação entre os parâmetros de injeção do polipropileno no inserto de aço e estereolitografia.

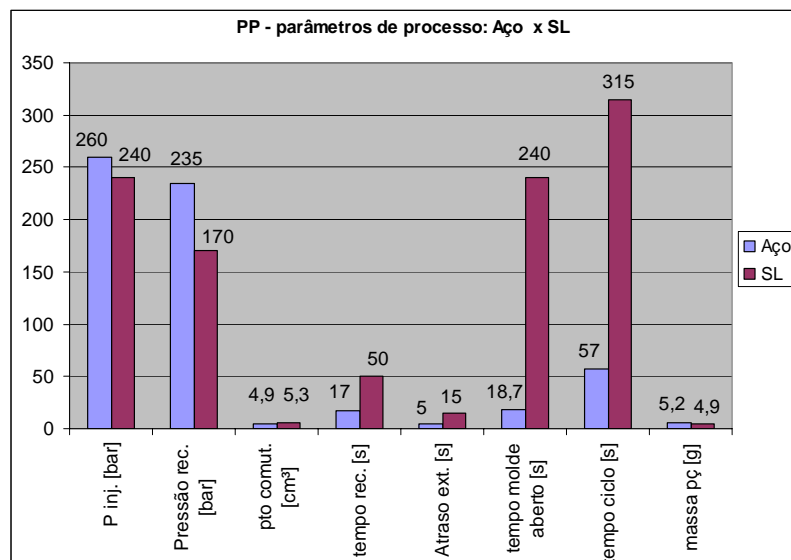


Figura 5.2 – Comparação entre os parâmetros de injeção do polipropileno no inserto de aço e estereolitografia.

Para que os parâmetros utilizados nos dois tipos de inserto pudessem ser comparados, os parâmetros de temperatura de injeção, volume de injeção, vazão de injeção e tempo de injeção foram os mesmos nos dois tipos de inserto. Com exceção da temperatura do inserto, que por motivos de qualidade da peça não pode ser a mesma, os demais parâmetros deveriam ser consequência das propriedades térmicas e das características de projeto intrínseco a cada tipo de inserto. Na seqüência são comentados um a um todos os principais parâmetros de processo.

Temperatura de injeção: baseada nas recomendações do fabricante e no Anexo 7, esse foi um parâmetro de referência. O valor escolhido foi o mínimo possível para que não houvesse entupimento do bico de injeção. Entretanto, o valor da temperatura de injeção poderia ser maior para ambos os casos. O inconveniente seria o aumento do ciclo de injeção no inserto de estereolitografia e o possível aparecimento ou agravamento dos problemas de rechupe nas peças moldadas nos dois tipos de inserto.

Temperatura inicial da cavidade: a temperatura inicial da cavidade do inserto de aço e de estereolitografia não puderam ser as mesmas devido aos problemas de processamento encontrados no decorrer da definição do processo como um todo. Como descrito no item 4.5.1, os problemas de rechupe no centro do corpo de prova do inserto de aço só foram eliminados com a redução da sua temperatura de 40°C

para 30°C. Com relação ao inserto de estereolitografia, a utilização de temperaturas inferiores a 40°C aumentaria consideravelmente os já longos ciclos de injeção. Porém, quando utilizando temperaturas inferiores a 40°C, seria recomendável utilizar um sistema de refrigeração para auxiliar na redução do tempo de molde aberto.

Temperatura final da cavidade: os resultados para a temperatura final da cavidade refletem a diferença entre a condutividade térmica do aço e da resina de estereolitografia. Como pode ser visto na Figura 5.1 o inserto de aço sofreu uma variação de 6,1°C contra os 23°C do inserto de estereolitografia. Entretanto, apesar do inserto de estereolitografia ter atingido um valor máximo de 63°C, ele ainda é inferior ao valor da temperatura de transição vítrea da resina utilizada (DSM Somos 7110®), que segundo AHRENS et al (2002) é de $T_g = 65^\circ\text{C}$.

Volume de injeção e ponto de comutação: apesar do projeto do sistema e alimentação ser diferente, as peças possuíam as mesmas dimensões. Dessa forma, o volume de injeção utilizado foi o mesmo para os dois tipos de inserto, entretanto o ponto de comutação foi diferente. As Figuras 5.1 e 5.2, mostram que o inserto de aço recebeu um volume maior durante a fase de preenchimento ($19 - 4,9 = 14,1 \text{ cm}^3$) contra ($19 - 5,3 = 13,7 \text{ cm}^3$). Isso pode estar relacionado à diferença geométrica do sistema de alimentação e também pela redução da espessura da cavidade durante a fase de ajustamento do inserto de aço.

Vazão de injeção: a vazão de injeção utilizada foi igual para ambos os tipos de inserto. Segundo as recomendações do Anexo 7, a vazão de injeção para o polipropileno deve ser alta. Entretanto, altos valores de vazão de injeção tendem a danificar o ponto de injeção devido ao alto atrito gerado durante a fase de preenchimento; assim, optou-se por um valor médio/baixo para ambos os insertos.

Tempo de injeção: como a pressão de injeção é função principalmente do tempo de injeção, o processo ocorreu de maneira que fossem iguais nos dois insertos, pois caso contrário não seria possível a comparação dos valores de pressão. Porém pode-se deduzir que se a pressão de injeção do inserto de estereolitografia fosse elevada para o mesmo nível de pressão do inserto de aço, o seu tempo de injeção seria reduzido para um nível inferior ao do inserto de aço.

Tempo de refrigeração: apesar do inserto de estereolitografia possuir uma condutividade térmica quase 300 vezes menor do que a do inserto de aço, a Figura 5.1 mostra que a diferença entre o tempo de refrigeração dos insertos foi somente de 5 s. Isso ocorreu porque o ajuste do tempo de refrigeração buscou reduzir ao máximo o tempo de molde fechado do inserto de estereolitografia, pois a abertura do inserto aumenta a troca térmica com o ambiente e ajuda a reduzir o tempo de ciclo.

Força de fechamento: como a força de fechamento depende da área do moldado e da pressão de injeção, o valor de 5 toneladas foi adotado por não apresentar problemas de rebarba em ambos os insertos.

Pressão de injeção: com relação aos insertos utilizados, a pressão de injeção no inserto de estereolitografia foi menor do que a utilizada no de aço. Como a temperatura, o tempo e a vazão de injeção foi a mesma nos dois tipos de inserto, isso pode ter ocorrido por três motivos. Primeiro pelo fato da temperatura do molde do inserto de aço ser menor do que a do inserto de estereolitografia. A menor temperatura do inserto de aço aliada a sua maior condutividade térmica pode causar um congelamento mais rápido da frente de fluxo, provocando o uso de maiores pressões para realizar o preenchimento da cavidade. O segundo motivo é pelo fato da resina de estereolitografia agir de modo a reduzir a formação da camada congelada devido a sua baixa condutividade térmica, o que minimizaria a pressão de injeção. O terceiro fator pode estar relacionado com a forma geométrica do sistema de alimentação.

Tempo de recalque: apesar da temperatura do inserto de estereolitografia ser maior do que a temperatura do inserto de aço no início do ciclo de injeção, e dos sistemas de alimentação e injeção possuírem projetos diferentes, os tempos de recalque utilizados demonstram que o projeto destes sistemas não é adequado para a moldagem do polipropileno H301. Nesse caso, soluções alternativas e mais adequadas poderiam ser geradas com a utilização de sistemas CAE para a simulação do processo de injeção. Além disso, o tempo de recalque, que no caso do inserto de estereolitografia foi quase 3 vezes maior do que no inserto de aço, mostra a influência da temperatura do molde, do sistema de refrigeração e das propriedades térmicas do inserto no processo de moldagem por injeção

Atraso na extração: a diferença entre os tempos de atraso na extração, que para o aço foi de 5 s e para a estereolitografia de 15 s, representa a maior capacidade de troca de calor do inserto de aço. O tempo de atraso na extração foi utilizado para reduzir o tempo de refrigeração, ou seja, ao final da refrigeração a peça não poderia mais sofrer deformações pela falta da ferramenta moldante. Porém, após o período de refrigeração ela não possuía rigidez suficiente para resistir aos esforços induzidos pelos pinos extratores sem sofrer deformações permanentes.

Tempo de molde aberto: o tempo de molde aberto representa o somatório do tempo de atraso na extração com o tempo de espera até que o inserto atinja a temperatura para um novo ciclo. A diferença entre esses valores representa a maior capacidade de troca de calor do inserto metálico. Enquanto o inserto de aço iniciava um novo ciclo em aproximadamente 14 segundos após a peça ser extraída, o inserto de estereolitografia permanecia durante quase 4 minutos num processo de resfriamento por convecção natural até a temperatura para o início de um novo ciclo.

Tempo de ciclo: compreende o somatório dos tempos de todas as fases do processo de injeção. Da mesma forma que o tempo de molde aberto, ele representa a capacidade de troca de calor dos materiais utilizados. No caso do inserto de estereolitografia ele foi aproximadamente 6 vezes maior do que o inserto de aço. Segundo REES (1995), o PP não é sensível ao tempo de residência, dessa forma os longos tempos de ciclo não degradam o material que fica exposto a altas temperaturas no cilindro de injeção.

Massa da peça: esse parâmetro mostra que apesar de todas as diferenças entre os demais parâmetros, o resultado final foi uma peça com aproximadamente 6% de variação na sua massa. Essa diferença pode ser devido aos parâmetros de ponto de comutação, pressão de injeção, pressão e tempo de recalque, como também pela redução de espessura durante a fase de ajustamento do inserto de estereolitografia.

Qualidade da peça: foram obtidas peças de boa qualidade visual após o ajustamento do inserto. As peças não possuíam mais problemas como rechupe e rebarbas, porém devido o lixamento de uma das cavidades durante a fase de ajustamento, uma das faces da peça perdeu um pouco a característica de brilho. A

Figura 5.3 mostra as peças obtidas no inserto de resina antes e depois do processo de ajustamento.



Figura 5.3 – Peças em polipropileno antes e após a fase de ajustamento.

5.2 – MOLDAGEM E SIMULAÇÃO DO ABS – ESTUDO DE CASO 2

No segundo estudo de caso, da mesma forma que no primeiro, apenas um pequeno número de peças foi produzido pelo processo de moldagem por injeção nos insertos de aço e de estereolitografia. O objetivo do experimento foi a comparação entre as condições de processamento desses dois tipos de ferramental.

Um *software* de simulação também foi utilizado com o objetivo de comparar os principais parâmetros obtidos entre a simulação e o processo experimental de moldagem nos dois tipos de ferramental. Também foram comparados os resultados obtidos pelos modelos do inserto de aço e de estereolitografia, considerando que ambos eram insertos fabricados em aço. Além disso, uma última análise foi realizada com o objetivo de avaliar a possibilidade da utilização do *software* de simulação no projeto de insertos de estereolitografia.

5.2.1 – Comparação entre os parâmetros de processo utilizados no inserto de aço e de estereolitografia

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram uma comparação entre os principais parâmetros de processo utilizados na moldagem por injeção do ABS com o inserto de aço e de estereolitografia. Semelhante ao primeiro estudo de caso, para que os parâmetros utilizados nos dois tipos de inserto pudessem ser comparados, os parâmetros de temperatura de injeção, temperatura do inserto, volume de injeção, vazão de injeção

e tempo de injeção foram os mesmos. Assim, os demais parâmetros são consequência das propriedades térmicas e das características de projeto intrínseco a cada tipo de inserto. Na seqüência são comentados um a um todos os principais parâmetros de processo.

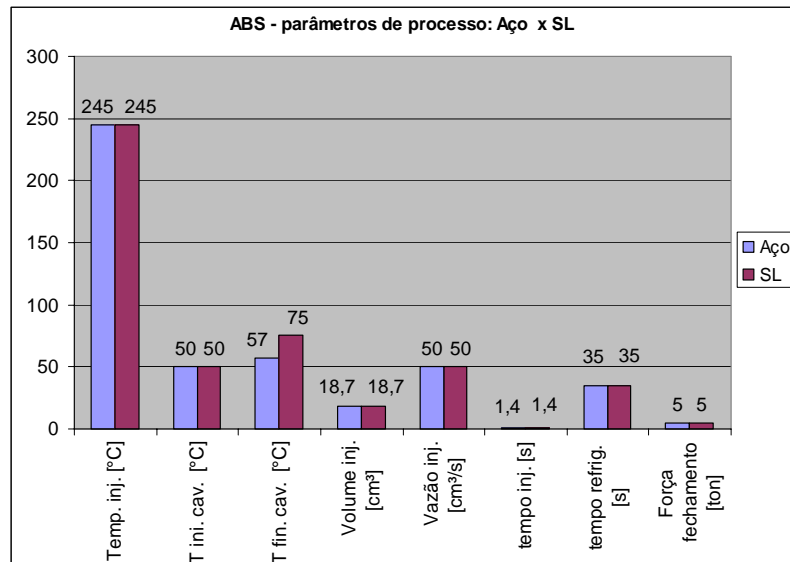


Figura 5.4 – Comparação entre os parâmetros de injeção do ABS no inserto de aço e estereolitografia.

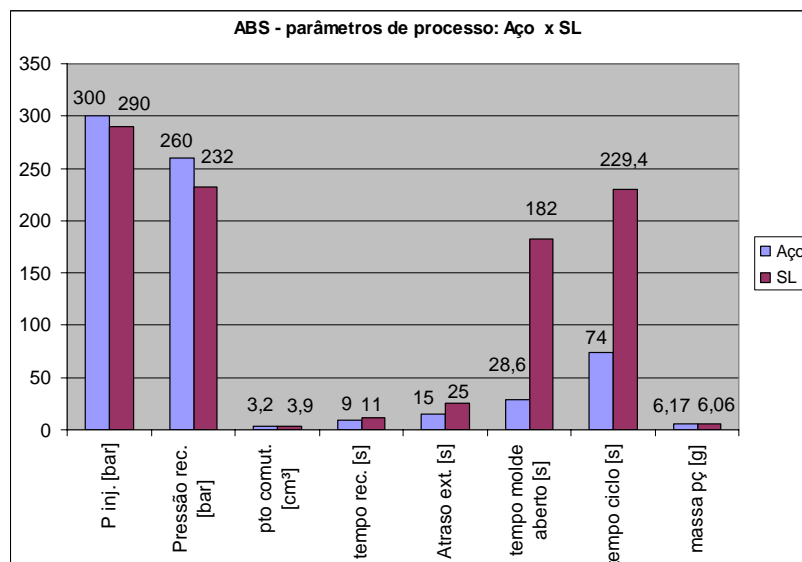


Figura 5.5 – Comparação entre os parâmetros de injeção do ABS no inserto de aço e estereolitografia.

Temperatura de injeção: baseado nas recomendações do fabricante e no Anexo 7, esse foi um parâmetro de referência. Não foi possível a utilização do valor mínimo de temperatura de injeção recomendado para este material devido ao

elevado nível de pressão necessário para o preenchimento da cavidade. Porém, o inserto de aço suportaria sem problemas o aumento da pressão de injeção devido à redução da temperatura de injeção.

Temperatura inicial da cavidade: da mesma forma que a temperatura de injeção, a temperatura do inserto também foi um parâmetro de referência e nesse caso foi possível a utilização do menor valor recomendado pelo fabricante. Apesar da utilização do valor mínimo recomendado, a temperatura de 50°C foi superior à temperatura do inserto utilizada na moldagem do PP (40°C). A utilização de baixas temperaturas de injeção e de molde tem como objetivo o prolongamento do número de ciclos obtidos pelo inserto e a redução do tempo total de ciclo.

Temperatura final da cavidade: da mesma forma que no primeiro estudo de caso, o inserto de estereolitografia sofreu a maior variação de temperatura. A Figura 5.4 mostra que o inserto de aço teve uma variação de 7°C contra os 25°C do inserto de estereolitografia. Apesar do inserto de estereolitografia não ter apresentado maiores indícios de falha, a sua temperatura máxima de trabalho nesse caso 75°C foi superior a sua temperatura de transição vítrea (65°).

Volume de injeção e ponto de comutação: como mostram as Figuras 5.4 e 5.5, o volume de injeção utilizado foi o mesmo nos dois tipos de inserto, porém o ponto de comutação foi diferente. Como no primeiro estudo de caso, a diferença entre o ponto de comutação pode ser devido ao projeto do sistema e alimentação ser diferente, o que foi responsável pela diferença de volume no preenchimento do conjunto como um todo, já que as peças inicialmente possuíam as mesmas dimensões. Além da diferença de projeto do sistema de alimentação, como já justificado no primeiro estudo de caso, o processo de ajustamento do inserto pode ter reduzido a espessura da peça auxiliando na diferença encontrada para o ponto de comutação.

Vazão de injeção: a vazão de injeção utilizada foi igual para ambos os tipos de inserto. Segundo as recomendações do Anexo 7, a vazão de injeção para o ABS deve ser alta e, pelos mesmos motivos do primeiro estudo de caso optou-se por um valor médio/baixo para ambos os insertos. Apesar dos valores de vazão de injeção terem sido ajustados em 50 cm³/s, as Figuras 5.9 e 5.14 mostram que o ABS atingiu

uma velocidade máxima de injeção 35 cm³/s no inserto de aço contra 40 cm³/s no inserto de estereolitografia. Porém, o tempo da vazão máxima nos dois casos não foi superior a 0,2 s. A maior vazão encontrada no inserto de estereolitografia pode ser função da maior fluidez do ABS devido ao longo tempo de ciclo e de residência do material no cilindro de plastificação, pela formação de uma menor camada congelada devido o efeito de isolamento térmico da resina e pela geometria do canal de alimentação.

Tempo de injeção: da mesma forma que no primeiro estudo de caso, a pressão de injeção foi ajustada de maneira a igualar o tempo de injeção nos dois tipos de inserto. Assim, no caso do ABS também pode-se deduzir que se a pressão de injeção do inserto de estereolitografia fosse elevada para o mesmo nível de pressão do inserto de aço, o seu tempo de injeção seria inferior ao do inserto de aço.

Tempo de refrigeração: a Figura 5.4 mostra que o tempo de refrigeração foi o mesmo para ambos os insertos quando utilizando o ABS. Isso mostra que o fato do inserto de estereolitografia trabalhar em altas temperaturas não dificulta a solidificação das peças moldadas em ABS.

Força de fechamento: como no primeiro estudo de caso, o valor de 5 toneladas foi mantido por não apresentar problemas de rebarba em ambos os insertos.

Pressão de injeção: como no primeiro estudo de caso, a pressão de injeção no inserto de estereolitografia foi menor do que a utilizada no de aço. Como os parâmetros de temperatura de injeção, temperatura do inserto, vazão e tempo de injeção foram os mesmos nos dois tipos de inserto, isso só pode ter ocorrido por dois motivos. Primeiro devido ao projeto do sistema de alimentação e de injeção ser diferente, o que causaria diferentes níveis de perda de carga durante a fase de injeção. Outra hipótese é o fato da baixa condutividade térmica da resina de estereolitografia reduzir a formação da camada congelada durante a fase de preenchimento, aumentando a área de fluxo do material e possibilitando o uso de menores pressões de injeção.

Tempo de recalque: a Figura 5.5 mostra uma pequena diferença entre o tempo de recalque aplicado nos insertos. Esse fato vem de encontro com o que foi

comentado a respeito do tempo de refrigeração. Ou seja, apesar do inserto de estereolitografia trabalhar em altas temperaturas, isso não dificulta a solidificação das peças moldadas em ABS. O sistema de alimentação com um ponto de injeção com a mesma espessura da peça demonstrou ser mais adequado para o ABS do que para o PP.

Atraso na extração: tal como no primeiro estudo de caso, a diferença entre os tempos de atraso na extração, que para o aço foi de 15 s e para a estereolitografia foi de 25 s, representa a maior capacidade de troca de calor do inserto de aço. Como se pode perceber, a peça moldada no inserto de aço levou 10 s a menos que a do inserto de estereolitografia para atingir a temperatura de extração. Isso pode estar relacionado com o fato do inserto de estereolitografia atingir uma temperatura final maior (75°C) do que o inserto de aço (57°C). A maior temperatura do inserto de estereolitografia aliada ao seu baixo coeficiente de condutibilidade térmica age de forma a aumentar o tempo até a peça ter rigidez suficiente para a extração.

Tempo de molde aberto: o tempo de molde aberto é um dos parâmetros que melhor representa a diferença entre a moldagem entre os dois tipos de ferramental utilizados. Como no primeiro estudo de caso, os valores deixam clara a baixa condutividade térmica da resina de estereolitografia e a necessidade de um artifício, como por exemplo um sistema de refrigeração, para auxiliar na retirada de calor do inserto.

Tempo de ciclo: da mesma forma que o tempo de molde aberto, o tempo de ciclo representa a capacidade de troca térmica dos ferramentais. No caso do inserto de estereolitografia ele foi aproximadamente 3 vezes maior do que o inserto de aço. Segundo a GE Plastics (2003), o ABS utilizado tem um limite de tempo de residência de 8 minutos, portanto apesar do longo ciclo de moldagem do inserto de estereolitografia, este valor ainda está dentro do limite para o tempo de residência do ABS utilizado, não provocando a sua degradação.

Massa da peça: a Figura 5.5 mostra que a diferença entre a massa das peças obtidas pelos ferramentais foi inferior a 2%. Como no primeiro estudo de caso, essa variação pode ser atribuída à diferença dos parâmetros de ponto de comutação,

pressão de injeção, pressão e tempo de recalque, como também pela redução da espessura durante a fase de ajustamento do inserto de estereolitografia.

Qualidade da peça: as peças produzidas em ABS possuíam boa qualidade visual. A principal diferença entre as peças moldadas pelos dois tipos de ferramental ficou por conta do maior brilho obtido pelo inserto de aço. Como no primeiro estudo de caso, o fato de uma das cavidades de estereolitografia ter passado pelo processo de lixamento também teve influência na moldagem do ABS. A Figura 5.6 mostra as peças moldadas por estes dois ferramentais.

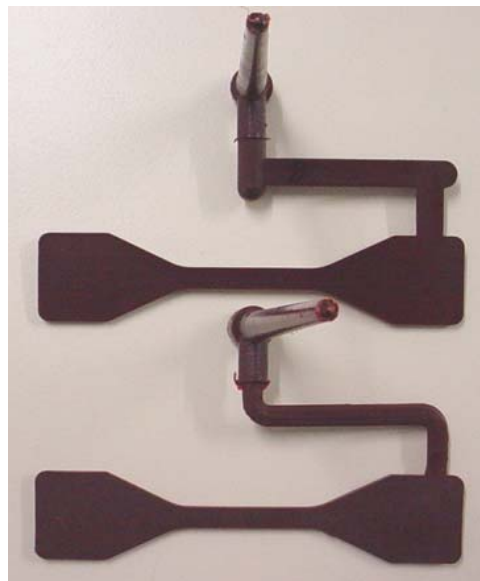


Figura 5.6 – Peças moldadas em ABS nos ferramentais de aço e estereolitografia.

5.2.2 – Comparação entre os resultados experimentais e os obtidos pela simulação no inserto de aço

A simulação do processo experimental no inserto de aço foi realizada tendo o tempo de injeção como controle da fase de preenchimento e um perfil de pressão em função do tempo para o controle da fase de recalque. A Tabela 5.1 mostra todos os parâmetros utilizados na simulação do processo de injeção do inserto de aço.

Tabela 5.1 – Parâmetros de entrada para a simulação no inserto de aço.

Parâmetros de injeção	Unidade	Aço Simulação
Temperatura de injeção	(°C)	245

Temperatura da cavidade do inserto	(°C)	50
Temperatura de refrigeração	(°C)	53
Vazão da refrigeração	l/min	4
Pressão de recalque	(Bar)	260 (86%)
Tempo de recalque	(s)	9
Tempo de injeção médio	(s)	1,4
Tempo de refrigeração	(s)	35
Tempo de molde aberto $t_{ma} = t_{atraso\ ext} + t_{ocioso}$	(s)	28,6

A Figura 5.7 mostra a comparação entre a curva experimental e a obtida por simulação no inserto de aço durante a fase de preenchimento e recalque. Como pode ser observado, o desajuste entre as curvas só ocorre durante a fase de preenchimento. Isso acontece devido ao parâmetro de tempo de injeção ter sido escolhido para o controle da fase de preenchimento; ou seja, a pressão de injeção simulada é função do tempo de injeção ajustado, das características de projeto do inserto e das propriedades do material termoplástico.

Para a fase de recalque, o controle não é realizado por um único valor como na fase de preenchimento (tempo de injeção), mas sim por um perfil de pressão de recalque em função do tempo. Dessa forma, devido ao software tentar respeitar os valores pré-definidos, as curvas tiveram comportamento semelhante. As Figuras 4.19 e 4.21 mostram as janelas para a entrada dos valores de controle da fase de preenchimento e de recalque.

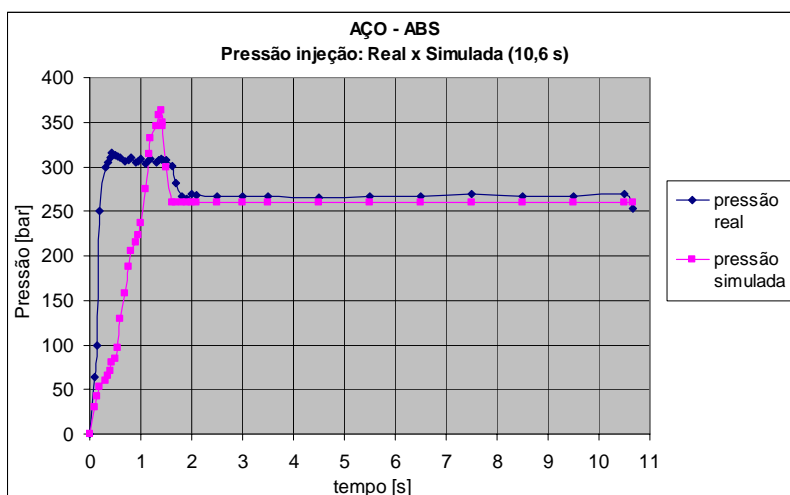


Figura 5.7 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção e de recalque experimental e simulada para o inserto de aço.

A Figura 5.8 mostra uma comparação entre as curvas de pressão ajustada em máquina, pressão experimental e pressão simulada durante a fase de preenchimento e uma parte da fase de recalque. Como pode-se perceber em relação à curva de pressão ajustada, a curva de pressão experimental tem um melhor ajuste do que a curva de simulação durante a fase de preenchimento.

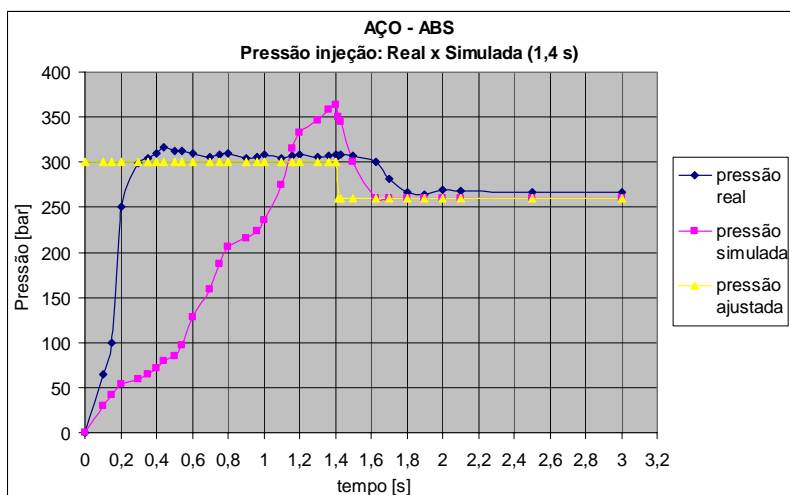


Figura 5.8 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.

A Figura 5.9 mostra uma comparação entre as curvas de vazão de injeção ajustada, experimental e simulada. Neste caso é bem visível que tanto a vazão de injeção experimental como a vazão simulada possuem comportamentos distintos entre si e inferiores à vazão ajustada. Como pode-se perceber, o *software* de

simulação trabalha com uma vazão de injeção média quando o controle da fase de preenchimento é realizado pelo tempo de injeção. Entretanto, a pressão e a vazão de injeção experimental crescem ao longo do tempo até que o limite de pressão de injeção experimental seja atingido. Quando isso acontece, independente da vazão de injeção ter sido atingida, a resistência ao fluxo começa a reduzi-la.

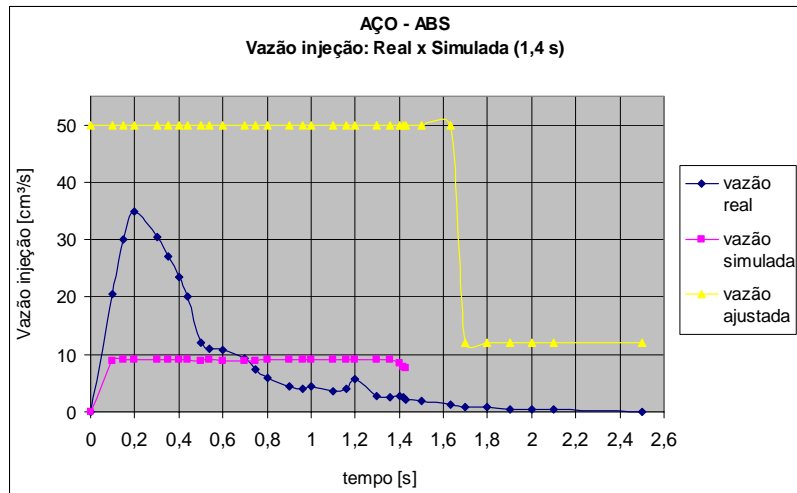


Figura 5.9 – Comparação entre as curvas de vazão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram um comparativo entre os principais parâmetros obtidos pelo processo experimental e pela simulação. Na seqüência são comentados um a um todos os principais parâmetros de processo contidos nestas figuras.

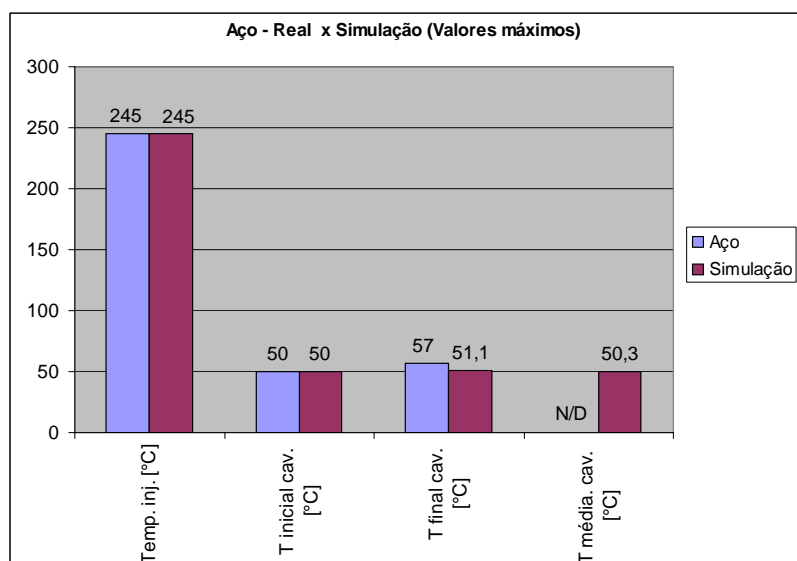


Figura 5.10 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de aço.

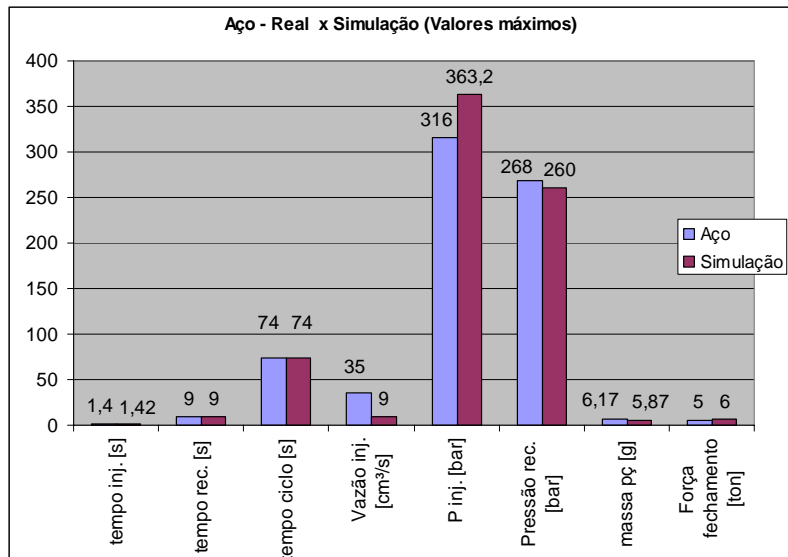


Figura 5.11 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de aço.

Temperatura de injeção [°C]: baseado nas recomendações do fabricante e no Anexo 7, esse foi um parâmetro de referência.

Temperatura inicial da cavidade [°C]: da mesma forma que a temperatura de injeção, a temperatura do inserto também foi um parâmetro de referência.

Temperatura final da cavidade [°C]: a diferença entre a temperatura final da cavidade obtida experimentalmente (57°C) e a simulada (51,1°C) foi de 11,5%. Esta diferença pode ser atribuída as simplificações feitas no modelo CAE para o sistema de refrigeração e pela imprecisão do *software*.

Temperatura média da cavidade [°C]: esta temperatura só foi calculada na fase de simulação. Entretanto, devido ao inserto trabalhar com temperaturas entre 50 e 57°C durante o procedimento experimental, conclui-se que a sua temperatura média é superior aos 50,3°C do processo de simulação.

Tempo de injeção e de recalque [s]: da mesma forma que a temperatura de injeção e a temperatura inicial do molde, o tempo de injeção e de recalque foram os mesmos para ambos os processos por serem parâmetros de referência.

Tempo de ciclo [s]: como consequência da utilização de alguns parâmetros de referência como o tempo de injeção, tempo de recalque, tempo de refrigeração e tempo de molde aberto, o tempo de ciclo foi o mesmo para ambos os processos.

Vazão de injeção [cm³/s]: os valores de vazão de injeção mostrados na Figura 5.11 são os máximos atingidos durante a fase de preenchimento da cavidade. Entretanto, como mostrado na Figura 5.9, o processo de simulação trabalha com um perfil médio de vazão de injeção quando o controle da fase de preenchimento é baseado no tempo de injeção. Já a vazão de injeção do processo experimental é variável e depende da pressão de injeção.

Pressão de injeção [bar]: a diferença da pressão máxima de injeção entre o processo experimental (363,2 bar) e a simulação (316 bar) foi de aproximadamente 15%. Essa diferença pode ser atribuída as simplificações feitas no sistema de alimentação e pela imprecisão do *software*.

Pressão de recalque [bar]: a diferença da pressão máxima de recalque entre o processo experimental (268 bar) e a simulação (260 bar) foi de aproximadamente 3%. Essa diferença é menor do que a obtida para a pressão de injeção pelo mesmo motivo comentado no item da vazão de injeção; ou seja, na simulação a fase de preenchimento a pressão de injeção é função do tempo de injeção (Figura 4.19), e a pressão de recalque é definida por um perfil de pressão em função do tempo (Figuras 4.20 e 4.21).

5.2.3 – Comparação entre os resultados experimentais e os obtidos pela simulação no inserto de estereolitografia

Para a simulação do processo experimental no inserto de estereolitografia, foram realizados os mesmos procedimentos utilizados na simulação do inserto de aço. A Tabela 5.2 mostra todos os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 5.2 – Parâmetros de entrada para a simulação no inserto de estereolitografia.

Parâmetros de injeção	Unidade	SL Simulação
Temperatura de injeção	(°C)	245

Temperatura da cavidade do inserto	(°C)	50
Temperatura de refrigeração	(°C)	N/D – 50
Vazão da refrigeração	l/min	N/D – 0,01
Pressão de recalque	(Bar)	232 (80%)
Tempo de recalque	(s)	11
Tempo de injeção médio	(s)	1,4
Tempo de refrigeração	(s)	35
Tempo de molde aberto $t_{ma} = t_{atraso\ ext} + t_{ocioso}$	(s)	182

A Figura 5.12 mostra a comparação entre a curva experimental e a obtida por simulação no inserto de estereolitografia durante a fase de preenchimento e recalque. Da mesma forma como ocorreu no inserto de aço, o desajuste entre as curvas só foi significativamente diferente na fase de preenchimento.

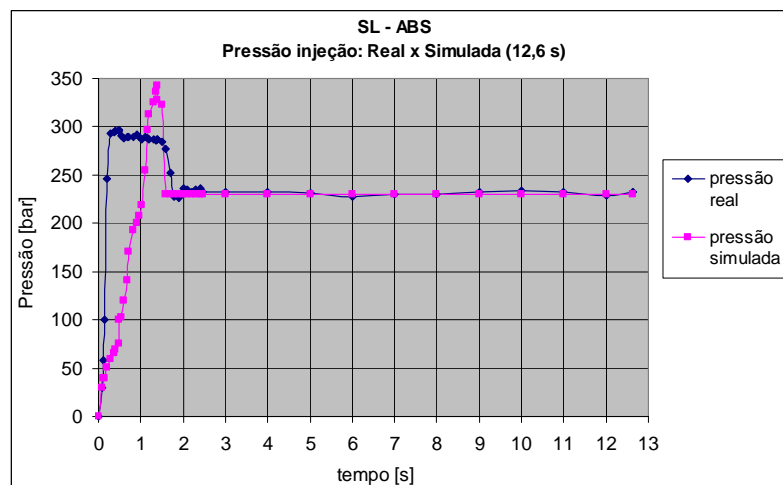


Figura 5.12 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção e de recalque experimental e simulada para o inserto de estereolitografia.

A Figura 5.13 mostra em maiores detalhes a comparação entre as curvas de pressão ajustada em máquina, pressão experimental e pressão simulada durante a fase de preenchimento e uma parte da fase de recalque. Novamente como no caso da simulação do inserto de aço, é visível que a curva de pressão experimental possui um melhor ajuste do que a curva de pressão simulada em relação à pressão ajustada em máquina durante a fase de preenchimento. Esse fato só vem reforçar a

precisão da máquina injetora utilizada e também demonstra que independente do material do molde, o *software* de simulação novamente teve uma margem erro.

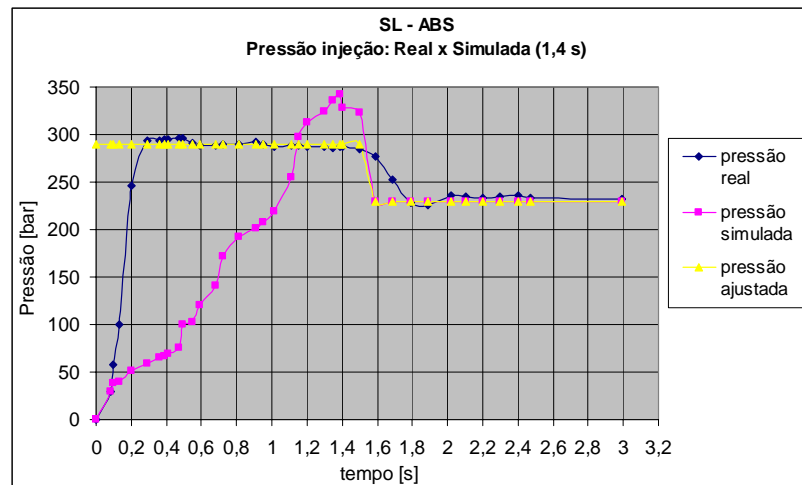


Figura 5.13 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção experimental e simulada para o inserto de estereolitografia.

Na Figura 5.14 são mostradas as curvas de vazão de injeção ajustada, experimental e simulada. Novamente a vazão de injeção experimental e a vazão de injeção simulada tiveram comportamentos distintos entre si e inferiores à vazão ajustada em máquina. A vazão de injeção simulada teve um comportamento estável em torno de $9 \text{ cm}^3/\text{s}$, enquanto que a vazão de injeção experimental teve um comportamento ascendente até que a pressão de injeção atingiu o valor ajustado em máquina. A partir deste ponto, devido ao aumento da resistência ao fluxo e a impossibilidade de um aumento de pressão para compensação, a vazão de injeção teve um comportamento decrescente.

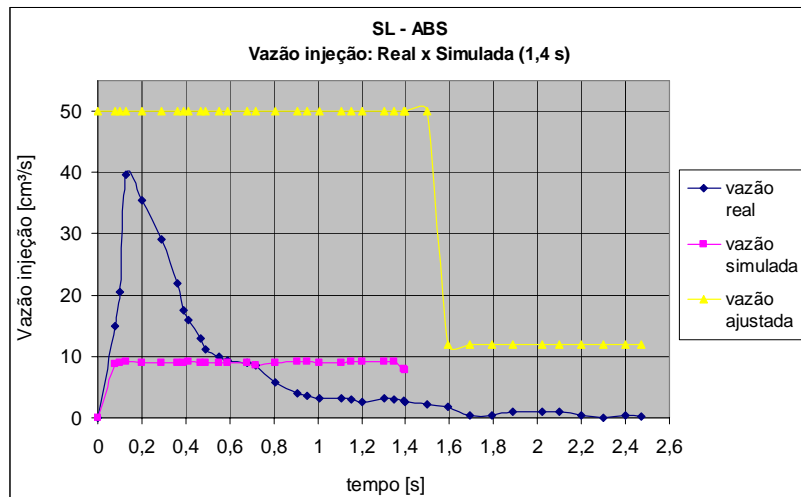


Figura 5.14 – Comparação entre as curvas de vazão de injeção experimental e simulada para o inserto de estereolitografia.

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram um comparativo entre os principais parâmetros obtidos pelo processo experimental e pela simulação. Na seqüência são comentados um a um todos os principais parâmetros de processo contidos nestas figuras.

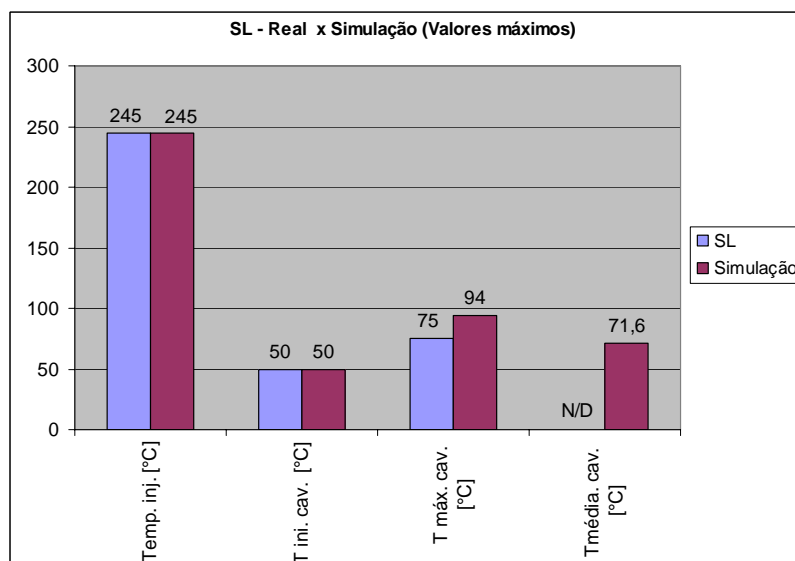


Figura 5.15 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de estereolitografia.

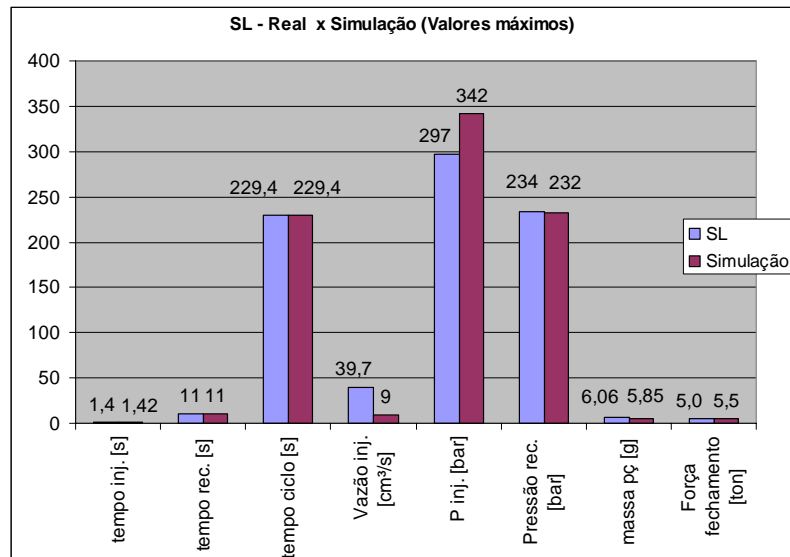


Figura 5.16 – Comparação entre os principais parâmetros de processo obtidos experimentalmente e por simulação no inserto de estereolitografia.

Temperatura de injeção [°C]: baseado nas recomendações do fabricante e no Anexo 7, esse foi um parâmetro de referência. Entretanto, o valor foi escolhido levando-se em conta os níveis de pressão de injeção comumente utilizados na moldagem utilizando ferramental por estereolitografia.

Temperatura inicial da cavidade [°C]: este também foi um parâmetro de referência. De fato, a opção de utilizar a temperatura mínima recomendada pelo fabricante (50°C), pelo Anexo 3 e, a máxima temperatura (50°C) que segundo COLTON & LEBAUT (1999), um inserto fabricado com a resina Somos[®] 7110 pode suportar continuamente sem que comprometa sua vida durante o processo de injeção, comprovou ser adequada para o processamento deste tipo de termoplástico.

Temperatura final da cavidade [°C]: a diferença entre a temperatura final da cavidade obtida experimentalmente (75°C) e a simulada (94°C) foi de 25%. Esta diferença pode ser atribuída à imprecisão do *software* de simulação, ao posicionamento do termopar na posição da espessura média da casca do inserto, a qual tende a ser inferior a temperatura na superfície da cavidade, como também pelo não posicionamento do termopar no local de maior temperatura do inserto.

Temperatura média da cavidade [°C]: a temperatura média da cavidade (71,6°) calculada na simulação possui uma diferença de aproximadamente 5% em relação à temperatura experimental da cavidade (75°). Assim, esse resultado demonstra ser mais adequado do que o da temperatura máxima, para a previsão da temperatura do inserto durante o processo de injeção no ferramental por estereolitografia.

Tempo de injeção e de recalque [s]: da mesma forma que na simulação do inserto de aço, a temperatura de injeção e a temperatura inicial do molde, o tempo de injeção e de recalque foram os mesmos para ambos os processos por serem parâmetros de referência.

Tempo de ciclo [s]: da mesma forma que na simulação do inserto de aço, o tempo de ciclo foi o mesmo para ambos os processos.

Vazão de injeção [cm³/s]: da mesma forma que na análise do inserto de aço, os valores de vazão de injeção mostrados na Figura 5.16 são os máximos atingidos durante a fase de preenchimento da cavidade. Entretanto, como mostrado na Figura 5.14, a simulação do processo de injeção no inserto de estereolitografia, também trabalha com um perfil médio de vazão de injeção. Isso porque o controle da fase de preenchimento é baseado no tempo de injeção. Já a vazão de injeção do processo experimental é variável e depende da pressão de injeção.

Pressão de injeção [bar]: a diferença da pressão máxima de injeção entre o processo experimental (342 bar) e a simulação (297 bar) foi de aproximadamente 15%. Como no caso da simulação no inserto de aço, essa diferença pode ser atribuída às simplificações feitas no sistema de alimentação e pela imprecisão do *software*.

Pressão de recalque [bar]: a diferença da pressão máxima de recalque entre o processo experimental (234 bar) e a simulação (232 bar) foi menor que 1%. Como no caso da simulação no inserto de aço, essa diferença é menor do que a obtida para a pressão de injeção devido o controle da fase de recalque ser realizada por um perfil de pressão em função do tempo (Figura 4.20 e 4.21).

5.2.4 – Comparação entre os modelos CAE utilizados no processo de simulação

O objetivo desta análise foi verificar a influência do projeto do sistema de alimentação e ponto de injeção, principalmente no parâmetro de pressão de injeção, nos insertos de aço e estereolitografia. Para tanto, as propriedades do modelo do inserto de estereolitografia foram trocadas pelas do aço ABNT 1045.

A Figura 4.7 mostra o modelo CAE utilizado para a simulação do processo de injeção no inserto de aço e a Figura 4.8 o modelo para a simulação no inserto de estereolitografia. O modelo da Figura 4.8 teve o diâmetro do sistema de refrigeração alterado de 1 mm para 8 mm, e como já comentado, as regiões que antes possuíam as propriedades da resina de estereolitografia, passaram a ter as propriedades do aço 1045. Assim, a única diferença entre os dois modelos foi o projeto do sistema de alimentação e do ponto de injeção.

Como pode ser visto nas Figuras 5.17 e 5.18, os parâmetros temperatura de injeção, temperatura inicial da cavidade, temperatura do fluido de refrigeração, pressão de recalque, tempo de recalque, tempo de injeção, tempo de refrigeração, tempo de molde aberto e tempo de ciclo foram mantidos os mesmos, para que servissem como base de comparação. Já os demais parâmetros, teoricamente deveriam sofrer influência do projeto do inserto. Os resultados são comentados a seguir.

Temperatura final da cavidade: esse resultado mostra que para o modelo do inserto de aço, as diferenças entre o projeto do sistema de alimentação e do ponto de injeção não tiveram influência na temperatura final da cavidade. As diferenças encontradas anteriormente são função apenas das propriedades térmicas do material do molde.

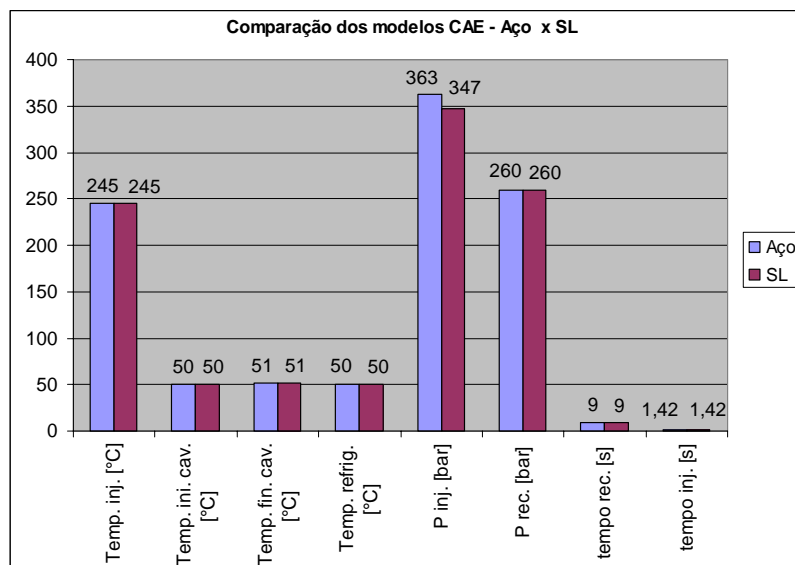
Pressão de injeção: os resultados obtidos por simulação mostram que o projeto do inserto de aço possui um nível de pressão de 4,6% superior ao projeto utilizado no inserto de estereolitografia. Entretanto, se for comparado o valor de pressão de 342 bar, obtido na simulação do inserto de estereolitografia (Figura 5.16), com a pressão de 347 bar (Figura 5.17), a simulação mostra que o inserto de estereolitografia possui um nível de pressão de injeção 1,5% inferior ao mesmo inserto fabricado em aço. Isso deve estar ligado a fatores de condutibilidade térmica, intrínseca aos ferramentais de estereolitografia e convencional.

Força de fechamento: a força de fechamento entre os modelos tiveram uma diferença de 0,7%, a qual é função da diferença de pressão de injeção e da área projetada das peças.

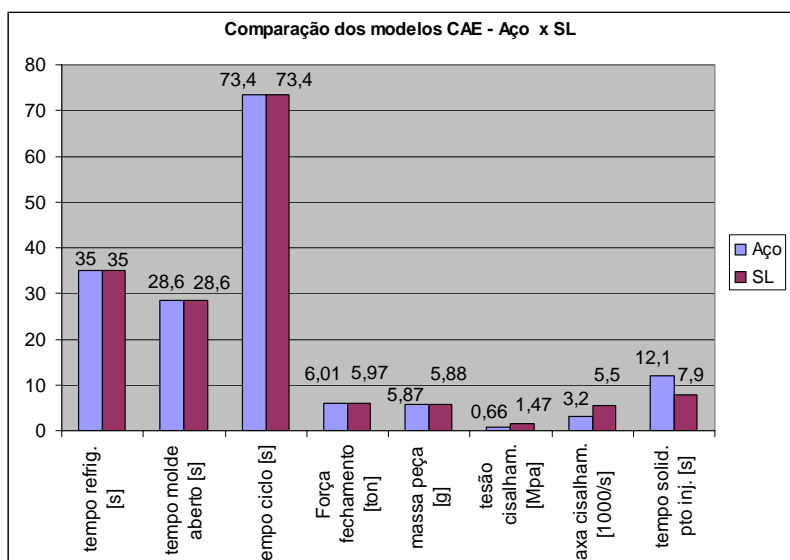
Massa da peça: os resultados obtidos para a massa da peça demonstram que o projeto do sistema de alimentação não teve influência neste resultado.

Tensão e taxa de cisalhamento: como era esperado, esse resultado mostra que o projeto, principalmente do ponto de injeção, exerce influência sobre a tensão e a taxa de cisalhamento, à medida que restringe ou não o fluxo de material, principalmente pelo ponto de injeção.

Tempo de solidificação do ponto de injeção: como era esperado, esse resultado mostra que o projeto do ponto de injeção (forma e espessura) exerce influência no tempo de resfriamento.



Figuras 5.17 – Representação gráfica comparativa entre os valores dos dois modelos CAE.



Figuras 5.18 – Representação gráfica comparativa entre os valores dos dois modelos CAE.

5.2.5 – Utilização do software CAE no projeto de insertos

Com o objetivo de avaliar a utilização do software de simulação no projeto de um sistema de alimentação alternativo, foram comparados três modelos de ponto de injeção em relação ao utilizado no inserto de estereolitografia. Os principais parâmetros observados nesta análise foram: a pressão de injeção, o tempo para o resfriamento da peça, do canal de alimentação e do ponto de injeção, os níveis de tensão e a taxa de cisalhamento assim como a temperatura média e final do inserto.

A Tabela 5.3 mostra a variação das dimensões do canal de alimentação e do ponto de injeção.

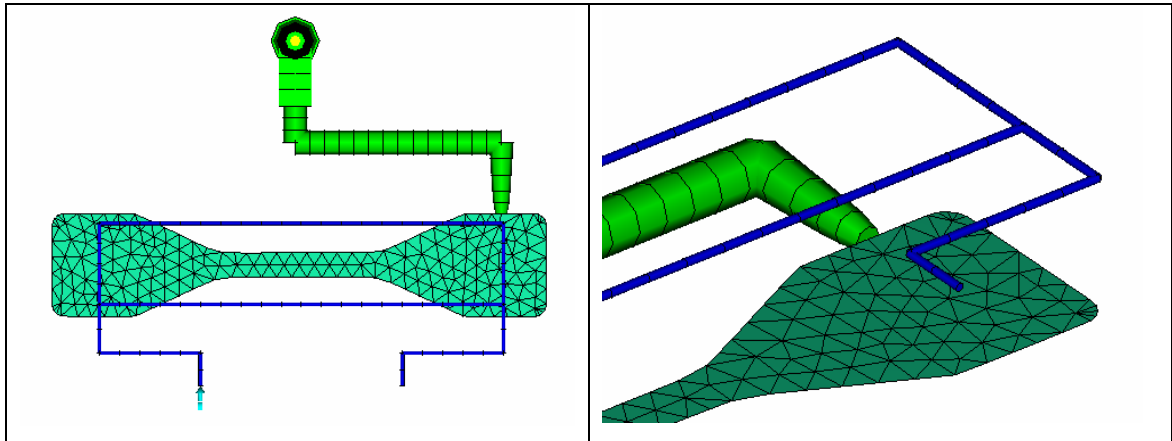
Tabela 5.3 – Tabela comparativa entre as dimensões do sistema de alimentação.

Modelo x Diâmetro	Unidade	Modelo Original	Modelo Original Modificado	Modelo Semicircular	Modelo Retangular
Diâmetro do canal de alimentação	(mm)	6	6	6	6
Dimensão do ponto injeção (maior e menor)	(mm)	6-3	6-2	4-1,5	4-1,5

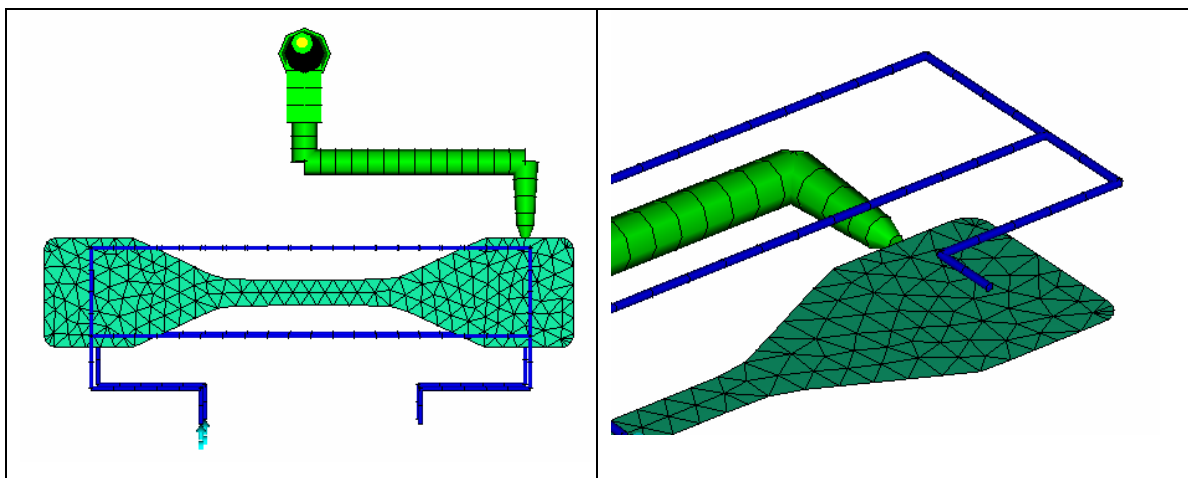
As Figuras de 5.19 até 5.22 mostram em detalhe o canal de alimentação e o ponto de injeção dos modelos comparados. A diferença entre os modelos original e

original modificado (Figuras 5.19 e 5.20) fica somente por conta do diâmetro do ponto de injeção, que passou de 3 para 2 mm.

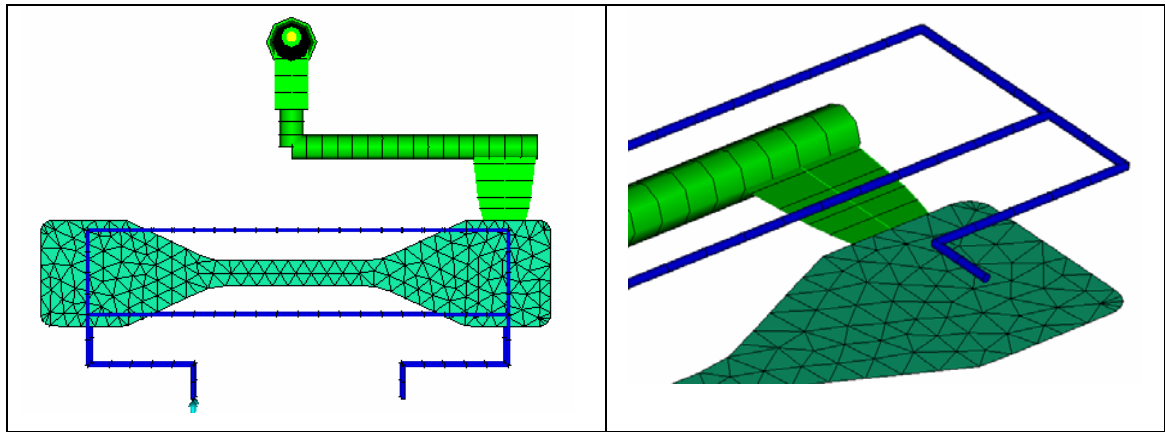
Os modelos semicircular e retangular (Figuras 5.21 e 5.22) em relação ao original e original modificado (Figuras 5.19 e 5.20) possuem um maior comprimento do sistema de alimentação (de forma que o ponto de injeção fica completamente envolvido pelo mesmo) e diferentes geometrias do ponto de injeção.



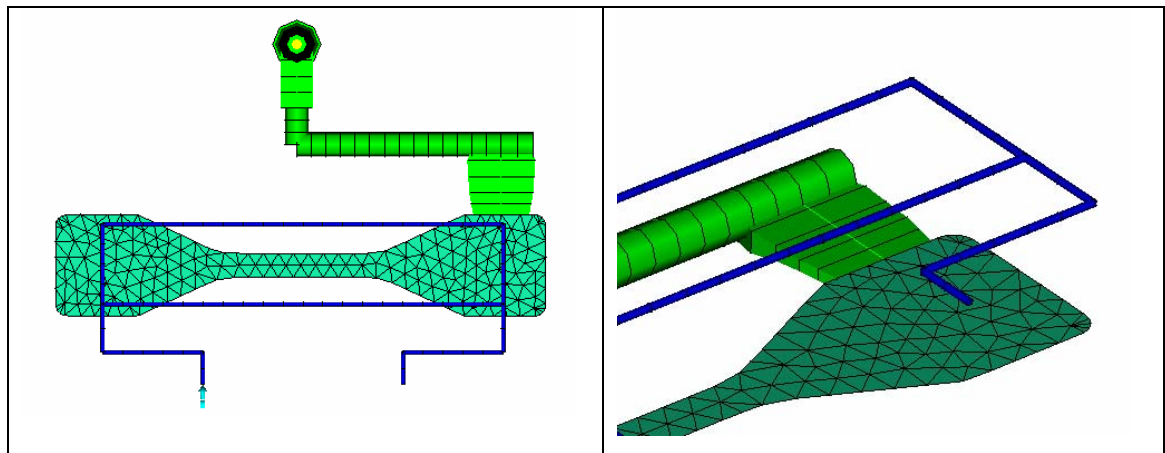
Figuras 5.19 – Modelo do ponto de injeção “original”.



Figuras 5.20 – Modelo do ponto de injeção “original modificado”.



Figuras 5.21 – Modelo do ponto de injeção “semicircular”.



Figuras 5.22 – Modelo do ponto de injeção “retangular”.

As Figuras de 5.23 até 5.26 mostram o gradiente de tempo necessário para a solidificação do ponto de injeção e da peça dos modelos comparados. A Figura 5.26 mostra que o canal retangular foi o único que não conseguiu solidificar toda a peça com o mesmo tempo de ciclo utilizado nos outros modelos. Isso indica que um maior tempo de refrigeração ou molde aberto seria necessário até que a peça pudesse ser extraída sem sofrer deformações permanentes.

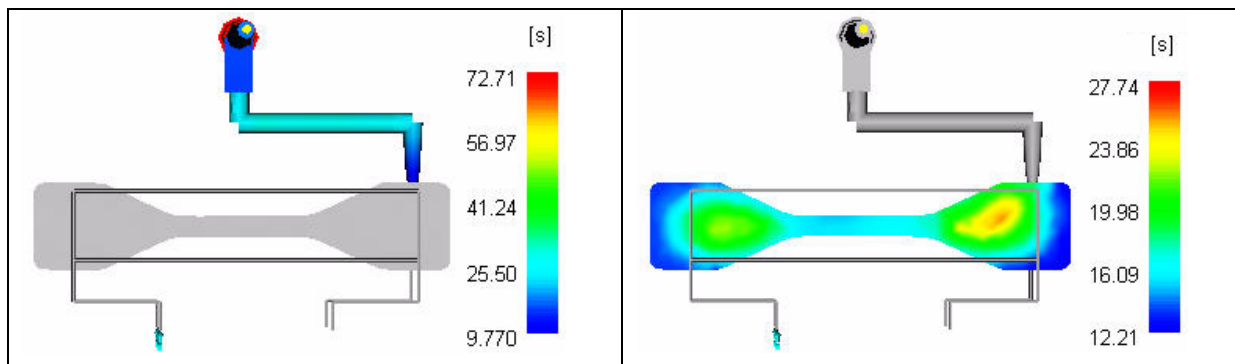


Figura 5.23 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo original”.

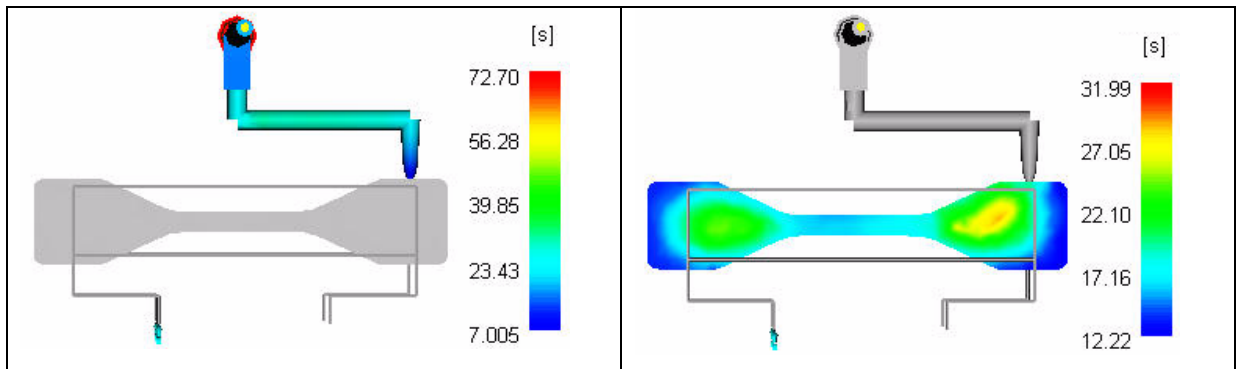


Figura 5.24 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo original modificado”.

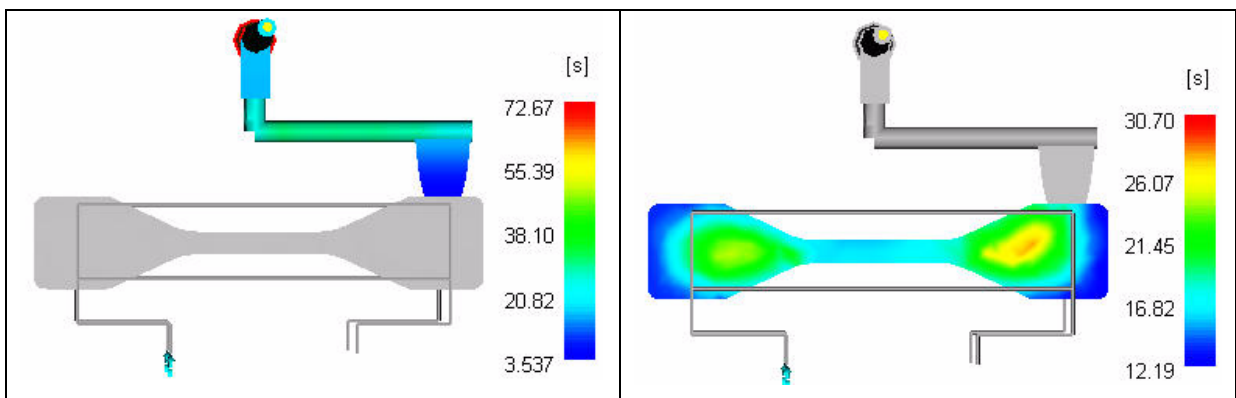


Figura 5.25 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo semicircular”.

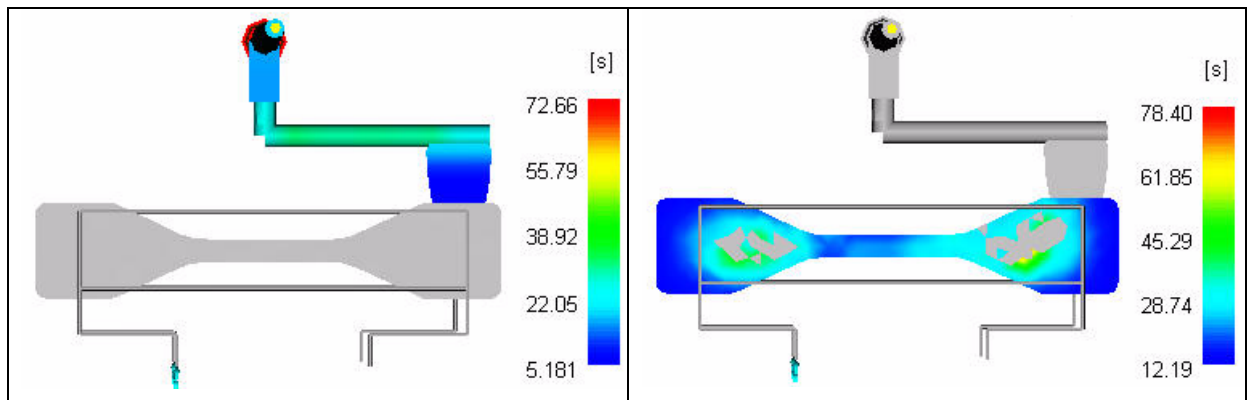


Figura 5.26 – Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção “modelo retangular”.

As Figuras de 5.27 até 5.29 mostram graficamente os parâmetros de referência utilizados, assim como os resultados obtidos para os parâmetros analisados de cada ponto de injeção utilizado. Na seqüência são comentados os resultados para os principais parâmetros de resposta.

Temperatura final e média da cavidade: os valores de temperatura final e média da cavidade demonstraram ter menores níveis no caso do inserto original. O modelo original modificado e o modelo semicircular tiveram valores bem próximos aos do original. Entretanto o modelo retangular foi o que apresentou os maiores níveis de temperatura, o qual foi em torno de 15% superior ao modelo original. Em relação a esse parâmetro, o ponto de injeção retangular não demonstrou bom rendimento comparado aos demais.

Pressão de injeção: a variação entre o maior e o menor nível de pressão de injeção entre os modelos analisados foi menor do que 5%. Deste modo, percebe-se que o fator pressão de injeção não inviabilizaria a utilização de nenhum dos modelos, quando comparados ao modelo original.

Tensão e taxa de cisalhamento: a variação da tensão de cisalhamento entre o maior (1,66 MPa) e o menor valor (1,08 MPa) foi de aproximadamente 54%, sendo que o menor valor foi o do ponto de injeção original. Para a taxa de cisalhamento, a relação entre o maior (8900 1/s) e o menor valor (5100 1/s) foi de 74% e, o menor valor foi o do modelo retangular. Assim, pode-se perceber que o projeto do ponto de injeção tem grande influência nesses resultados.

Tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção: a Figura 5.28 mostra que a diferença entre o tempo de solidificação da peça para os modelos de ponto de injeção analisados não foi significativa. Entretanto, os valores para o tempo de solidificação do ponto de injeção mostraram-se bastante influenciados pelo seu projeto. O melhor desempenho foi obtido pelo ponto de injeção semicircular e o pior pelo modelo original, sendo que a diferença entre eles foi de 180%. O fator preponderante neste resultado foi a espessura do ponto de injeção, que foi de 3 mm no modelo original e 1,5 mm no semicircular.

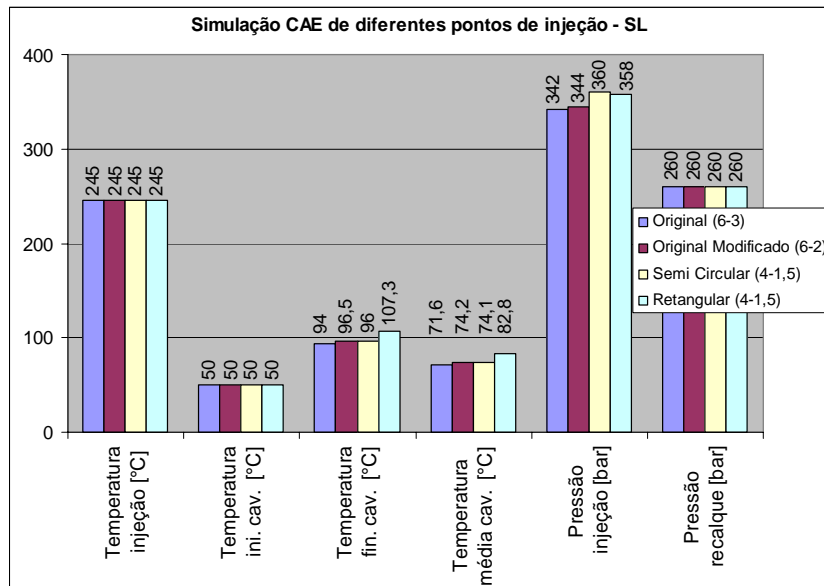


Figura 5.27 – Comparação entre a simulação CAE dos diferentes pontos de injeção.

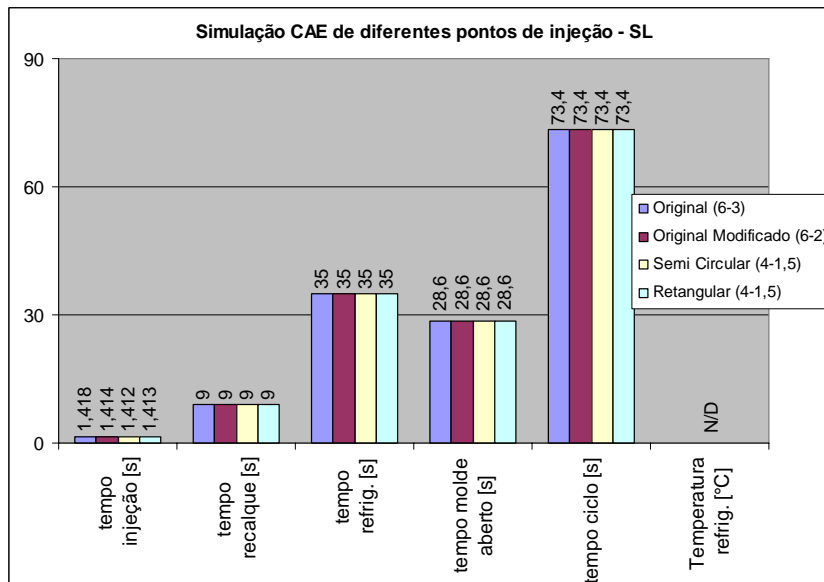


Figura 5.28 – Comparação entre a simulação CAE dos diferentes pontos de injeção.

*N/D – não disponível.

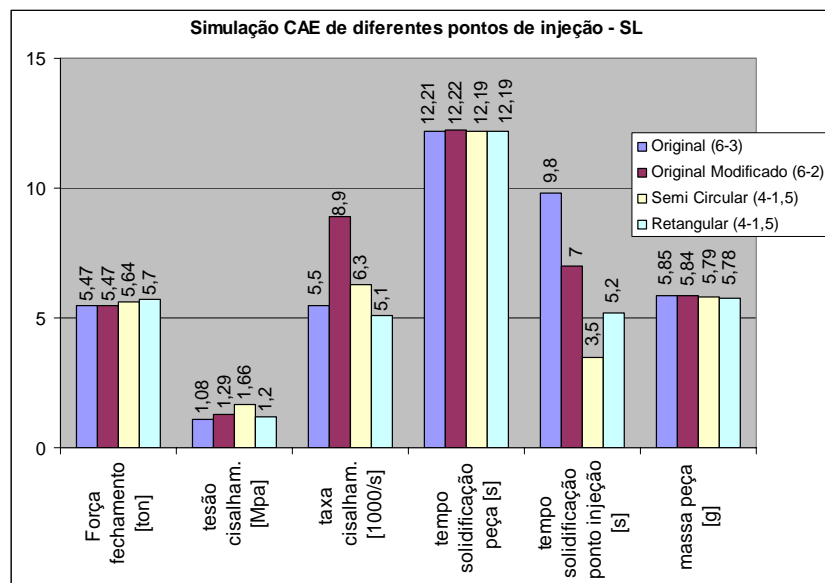


Figura 5.29 – Comparação entre a simulação CAE dos diferentes pontos de injeção.

5.3 – MOLDAGEM E SIMULAÇÃO DO PA 6,6 – ESTUDO DE CASO 3

Neste estudo de caso, o material termoplástico PA 6,6 foi utilizado para realizar a comparação entre os parâmetros de moldagem entre os ferramentais convencional e rápido por estereolitografia. A simulação do processo de moldagem por injeção também foi utilizada para a comparação com os valores experimentais.

Ao contrário do polipropileno, não houve problemas quanto à espessura do ponto de injeção. Prova disso é o pequeno tempo de recalque necessário até a solidificação do ponto de injeção. As peças moldadas no inserto de aço possuíam boa aparência e não apresentavam nenhum tipo de defeito visual, entretanto o inserto de estereolitografia não resistiu ao processo de definição dos parâmetros de processo. Foi injetado um total de 12 peças, sendo que ao final de cada ciclo a peça extraída arrancava consigo partes do inserto. A Figura 5.30 mostra a superfície do inserto após a tentativa de determinação dos parâmetros de injeção.



Figura 5.30 – Superfície do inserto de estereolitografia após moldagem do PA 6,6.

5.3.1 – Comparação entre os parâmetros de processo utilizados no inserto de aço e de estereolitografia

As Figuras 5.31 e 5.32 mostram uma comparação entre os principais parâmetros de processo utilizados na moldagem por injeção do PA 6,6 com o inserto de aço e de estereolitografia. Da mesma forma que no estudo de caso 1 e 2, para que os parâmetros utilizados nos dois tipos de inserto pudessem ser comparados, os parâmetros de temperatura de injeção, temperatura do inserto, volume de injeção, vazão de injeção e tempo de injeção foram os mesmos. Assim, os demais parâmetros são consequência das propriedades térmicas e das características de projeto intrínseco a cada tipo de inserto. Na seqüência são comentados um a um todos os principais parâmetros de processo.

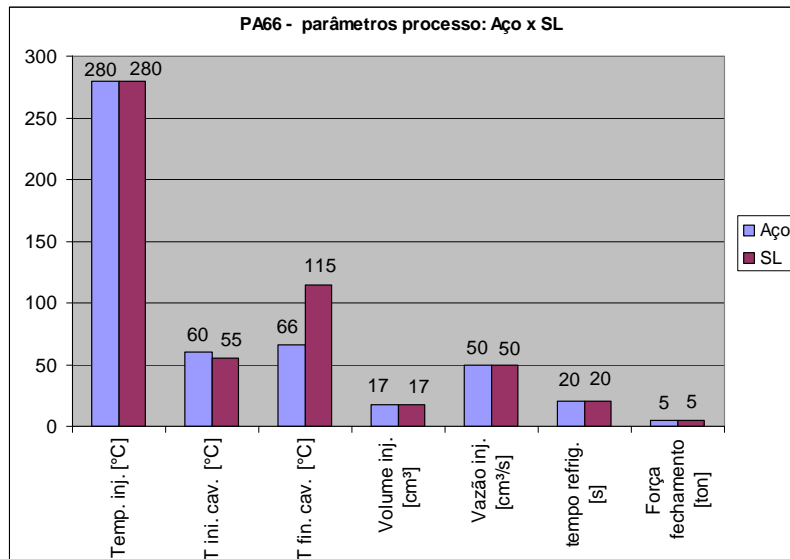


Figura 5.31 – Comparação entre os parâmetros de injeção do PA 6,6 no inserto de aço e estereolitografia.

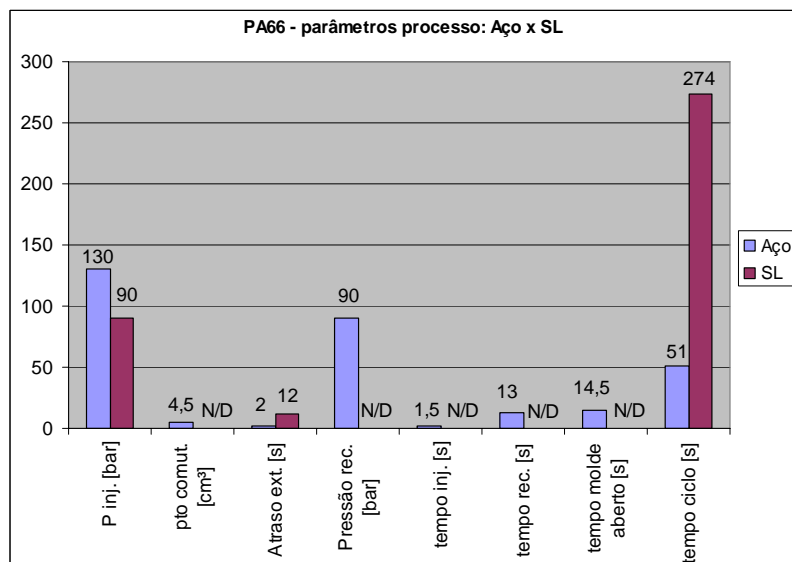


Figura 5.32 – Comparação entre os parâmetros de injeção do PA 6,6 no inserto de aço e estereolitografia.

Temperatura de injeção: da mesma forma que nos dois primeiros estudos de caso, esse é um parâmetro de referência e foi baseado nas recomendações do fabricante e do Anexo 7. A temperatura de 280°C é o valor máximo recomendado pelo fabricante, porém foi a mínima com que se conseguiu plastificar e resolver os problemas de entupimento do bico de injeção.

Temperatura inicial da cavidade: para a moldagem no inserto de aço foi utilizada a temperatura de 60°C (mínima recomendada pelo fabricante). Entretanto,

no inserto de estereolitografia, o processo iniciou com o valor utilizado no inserto de aço e foi reduzido até 55°C com o objetivo de amenizar os danos causados durante a extração da peça.

Temperatura final da cavidade: da mesma forma que nos dois primeiros estudos de caso, o inserto de estereolitografia sofreu a maior variação de temperatura. A Figura 5.31 mostra que o inserto de aço teve uma variação de 6°C contra os 60°C do inserto de estereolitografia.

Volume de injeção e ponto de comutação: como mostra a Figura 5.31, o volume de injeção que é um parâmetro de referência, possui o mesmo valor nos dois tipos de inserto. Entretanto, devido à falha prematura do inserto de estereolitografia, este parâmetro não pôde ser determinado.

Vazão de injeção: a vazão de injeção utilizada foi igual para ambos os tipos de inserto e está dentro das recomendações do Anexo 3 e 7. Este também é um parâmetro de referência.

Tempo de injeção: não foi possível determinar o tempo de injeção no inserto de estereolitografia devido à falha prematura do inserto.

Tempo de refrigeração: da mesma forma que o tempo de injeção, não foi possível determinar o tempo de refrigeração no inserto de estereolitografia devido à falha prematura do inserto.

Força de fechamento: como a força de fechamento é função da pressão de injeção e da área projetada do moldado, o valor de 5 toneladas foi mantido pelo fato do PA 6,6 ter os menores níveis de pressão de injeção dos três estudos de caso.

Pressão de injeção: como nos dois primeiros estudos de caso, a pressão de injeção no inserto de estereolitografia foi menor do que a utilizada no de aço, sendo que as mesmas justificativas são aplicáveis para o PA 6,6.

Tempo de recalque: não foi possível determinar o tempo de recalque no inserto de estereolitografia devido à falha prematura do inserto. Entretanto, percebe-se que

como no caso do ABS, os tempos de recalque utilizados no PA 6,6 foram bem inferiores aos do PP.

Atraso na extração: a diferença entre os tempos de atraso na extração, que para o aço foi de 2 s e para a estereolitografia foi de 12 s, representa a maior capacidade de troca de calor do inserto de aço.

Tempo de ciclo e de molde aberto: da mesma forma que o tempo de molde aberto, o tempo de ciclo representa a capacidade de troca térmica dos ferramentais. No caso do inserto de estereolitografia ele foi aproximadamente 5,4 vezes maior do que o inserto de aço. Dessa forma, deve-se tomar cuidado com o tempo máximo de residência do material no cilindro de plastificação, para evitar que o material sofra degradação.

Massa da peça: não foi possível determinar esse parâmetro para o inserto de estereolitografia.

Qualidade da peça: as peças produzidas em PA 6,6 no inserto de aço possuíam bom acabamento superficial. Entretanto, não foi possível obter nenhuma peça de boa qualidade no inserto de estereolitografia.

5.3.2 – Comparação entre os resultados experimentais e os obtidos pela simulação no inserto de aço

Da mesma forma que no segundo estudo de caso, a simulação do processo experimental no inserto de aço foi realizada tendo o tempo de injeção como controle da fase de preenchimento e um perfil de pressão em função do tempo para o controle da fase de recalque. A Tabela 5.4 mostra todos os parâmetros utilizados na simulação do processo de injeção no inserto de aço.

Tabela 5.4 – Parâmetros de entrada para a simulação no inserto de aço.

Parâmetros de injeção	Unidade	Aço Simulação
Temperatura de injeção	(°C)	280
Temperatura da cavidade do inserto	(°C)	60

Temperatura de refrigeração	(°C)	84
Vazão da refrigeração	l/min	4
Pressão de recalque	(Bar)	90
Tempo de recalque	(s)	13
Tempo de injeção médio	(s)	1,7
Tempo de refrigeração	(s)	20
Tempo de molde aberto $t_{ma} = \text{atraso ext} + t_{ocioso}$	(s)	14,5

A Figura 5.33 mostra as curvas comparativas de pressão de injeção e de recalque entre o processo experimental e a simulação. Da mesma forma que ocorrido nas simulações do estudo de caso 2, percebe-se que as curvas possuem um melhor ajuste na fase de recalque do que na fase preenchimento. Como já comentado isso ocorre devido ao diferente método de controle destas fases pelo *software*.

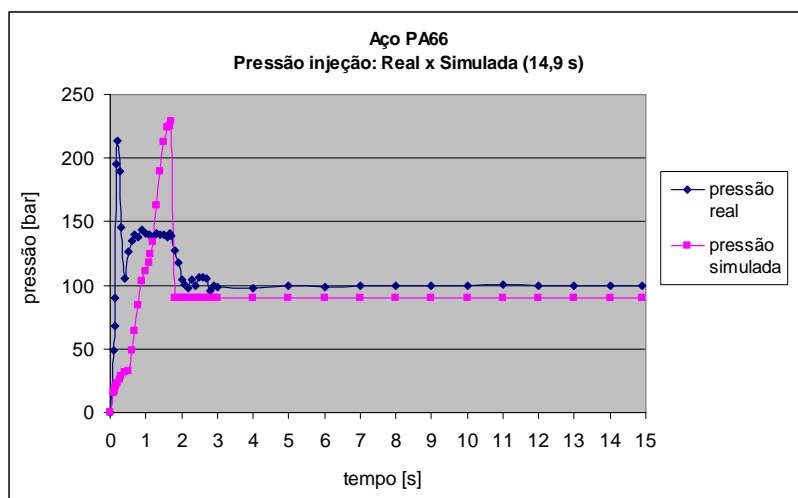


Figura 5.33 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção e de recalque experimental e simulada para o inserto de aço.

A Figura 5.34 mostra de maneira mais clara que as curvas da fase de preenchimento possuem um maior desajuste, entretanto a diferença entre o pico de pressão do processo experimental (214 bar) e da simulação (229 bar) é de 7%.

Também pode-se perceber que o nível de pressão curva experimental cai logo após ter atingido o pico de pressão, e tende a seguir o nível de pressão ajustado em máquina. O pico de pressão ocorrido no processo experimental ocorre devido à

tentativa da vazão de injeção (Figura 5.35) atingir o nível ajustado em máquina (50 cm³), porém quando o limite de pressão é ultrapassado, ele cai para o nível ajustado e a vazão de injeção também decresce devido à queda na pressão e ao aumento da resistência ao fluxo no preenchimento da cavidade.

Já a curva de pressão simulada tem um aumento progressivo de pressão, enquanto a sua vazão de injeção atinge um valor médio e constante durante o ciclo de injeção.

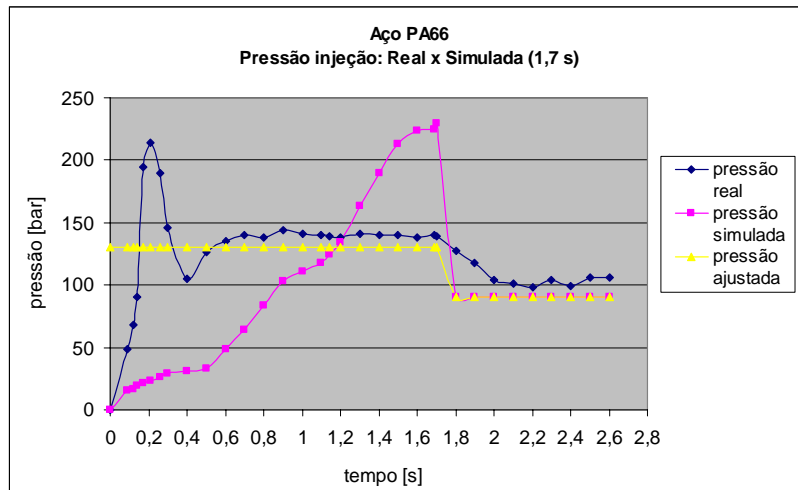


Figura 5.34 – Comparação entre as curvas de pressão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.

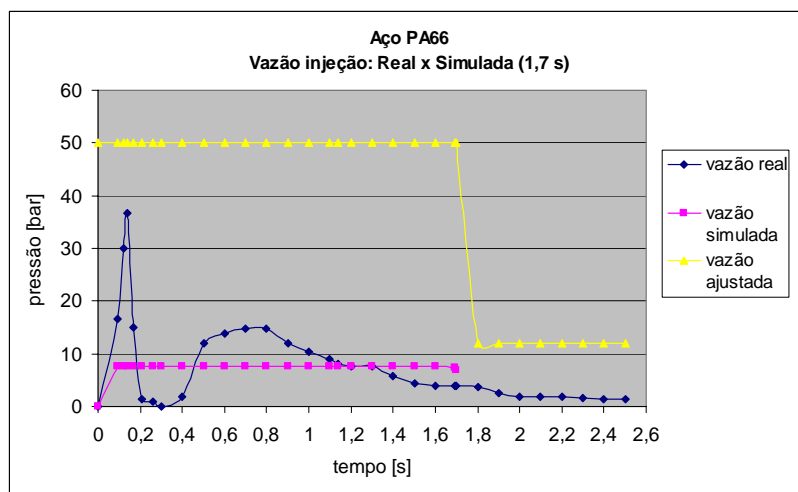


Figura 5.35 – Comparação entre as curvas de vazão de injeção experimental e simulada para o inserto de aço.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

6.1 – CONCLUSÕES

Tendo em vista o que foi apresentado neste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

Material de preenchimento – Ajustamento

Durante a fase de preenchimento da parte posterior do inserto de estereolitografia, deve-se tomar cuidado com os problemas de empenamento causados pela liberação de calor durante a cura do material. O empenamento causa o mau fechamento dos insertos quando montados no porta-moldes, que por sua vez favorece a formação de rebarbas na peça injetada. Uma alternativa para reduzir a tendência ao empenamento é a utilização de reforços internos como nervuras e o aumento da espessura de casca nos locais mais propícios a deformações. Além disso, com a utilização de suportes metálicos, o inserto reduz a sua altura e conseqüentemente as chances de empenamento.

Método da injeção progressiva e recomendações da moldagem convencional no ferramental rápido por estereolitografia

O método da injeção progressiva demonstrou ser bastante prático na determinação dos parâmetros de injeção na moldagem convencional, principalmente se o operador da máquina não possui muita experiência. Entretanto, a sua utilização no ferramental por estereolitografia deve ser cuidadosa, pois se os níveis de pressão ajustados inicialmente forem muito elevados, eles podem acelerar o processo de falha ou até mesmo danificar o inserto.

O emprego das recomendações da moldagem convencional, na determinação dos parâmetros de processo no ferramental por estereolitografia, demonstrou ser essencial. Porém, tanto as recomendações encontradas na literatura quanto as disponíveis no Anexo 7 são genéricas. Dessa forma, é recomendável buscar informações específicas com o fabricante do termoplástico a ser utilizado.

Com relação ao emprego dos valores mínimos recomendados para a temperatura de injeção, no caso do ABS, a sua utilização elevou a pressão de injeção a níveis não usuais no ferramental por estereolitografia. Assim, a

temperatura de processamento do termoplástico deve ter uma relação de compromisso entre a pressão de injeção e a faixa de temperatura de trabalho do inserto.

Diferença entre os parâmetros de processo

De maneira geral, a comparação entre os parâmetros de processo utilizados na moldagem do PP, ABS e PA 6,6, no ferramental convencional e rápido por estereolitografia, tiveram comportamentos que dependem do tipo de ferramental e do termoplástico utilizado.

Os parâmetros de processo tomados como referência, que são: temperatura de injeção, temperatura do molde, tempo de injeção, volume de injeção, vazão de injeção, contrapressão e rotação da rosca, podem ser os mesmos ou possuem valores bem próximos aos da moldagem convencional, quando utilizando ferramental por estereolitografia. No entanto, com relação aos parâmetros de resposta, eles podem ser classificados em duas categorias similares, como segue:

1. Os parâmetros que possuem um nível semelhante de influência entre a condutividade térmica do molde e as propriedades intrínsecas a cada termoplástico (condutividade térmica, índice de fluidez e temperatura de não fluxo), tais como tempo de recalque, tempo de refrigeração, atraso na extração, pressão de injeção, pressão de recalque e força de fechamento. A diferença entre eles pode variar em função do termoplástico utilizado, sendo que os mesmos podem ser semelhantes ou não, como no caso do tempo de recalque para o ABS (9 x 11 s) e para o PP (17 x 50 s), quando comparando o ferramental convencional com o de estereolitografia.

2. Os parâmetros que possuem maior influência da condutividade térmica do molde do que das propriedades intrínsecas a cada termoplástico, tais como tempo de molde aberto, tempo de ciclo e temperatura final da cavidade. Estes parâmetros possuem valores superiores aos da moldagem convencional, devido à maior dificuldade de troca térmica da resina de estereolitografia. Porém, a utilização de um sistema de refrigeração pode auxiliar na redução da diferença entre os parâmetros obtidos nestes ferramentais.

Moldagem dos materiais termoplásticos

Para o inserto fabricado com a resina de estereolitografia Somos 7110[®], não foi possível concluir a fase de determinação dos parâmetros de injeção com o PA 6,6, pois o processo de falha durante o processamento deste material ocorreu da

primeira até a 12ª peça injetada, quando o inserto foi descartado. A falha ocorreu devido à aderência entre a peça e a cavidade, a qual durante a fase de extração trazia consigo pedaços do molde. Esse fato vem de encontro com as maiores forças de extração medidas por HARRIS & DICKENS (2001), quando da sua comparação no processando do PP, ABS e PA. A falha do inserto de estereolitografia também pode estar relacionada com o que afirmam COLTON & LEBAUT (1999), os quais afirmam que a temperatura de 50°C, é aproximadamente a maior temperatura que o inserto fabricado com a resina Somos 7110® pode suportar continuamente sem que comprometa sua vida durante o processo de injeção.

Com relação ao PP e o ABS, o processo de moldagem com estes termoplásticos foi bem sucedida. Apesar do ABS utilizar temperaturas de injeção e de molde superiores as do PP, o ABS teve menores tempos de recalque e de ciclo. Isso é função do menor tempo necessário para a solidificação do ponto de injeção e conseqüente redução do tempo de recalque. Ou seja, o seu comportamento é função da condutividade térmica do molde e das características intrínsecas ao termoplástico.

Para o inserto fabricado em aço ABNT 1045, a moldagem do ABS e do PA 6,6 foram bem sucedidas. Com relação ao PP (Braskem - H301), o problema enfrentado durante a moldagem está relacionado ao projeto do inserto. Verificou-se que a norma ASTM D 638m é inadequada para a moldagem deste material, pois tanto para o inserto de aço quanto para o de estereolitografia os problemas de contração foram constantes, devido à excessiva espessura do ponto de injeção, o qual necessitava de tempos de recalque até a sua solidificação, não usuais na moldagem convencional.

Adequação do sistema CAE para o uso com ferramental por estereolitografia

Apesar da resina de estereolitografia não estar presente no banco de dados de materiais para moldes do sistema CAE comercial utilizado, a sua introdução, assim como as características da máquina injetora, foi executada sem maiores problemas. Entretanto, como pode ser observado na Figura 4.10, o valor da propriedade “calor específico” da resina Somos 7110® está no limite superior da faixa de aceitação do *software*. Assim, quando utilizando outros tipos de resina de estereolitografia, existe a possibilidade desta faixa ser ultrapassada e a análise ser comprometida.

Previsão de parâmetros de processo e projeto dos insertos fabricados por estereolitografia

De maneira geral, foram obtidos resultados satisfatórios com a utilização do sistema CAE na previsão dos parâmetros de processo e no projeto do ferramental por estereolitografia. Com relação à pressão máxima de injeção utilizando o ABS, a simulação apresentou valores 15% superiores aos experimentais, nos ferramentais de aço e estereolitografia. Para o PA 6,6, o valor de pressão máxima simulada foi 7% superior na moldagem convencional, sendo que para o ferramental por estereolitografia não foi possível determinar.

Além disso, a moldagem do ABS no ferramental por estereolitografia, apresentou valores de temperatura experimental máxima, 5% superior à temperatura média simulada e em torno de 20% menor que a máxima simulada. Deste modo, os valores máximo e médio, juntamente com a temperatura inicial do inserto, podem ser utilizados na previsão da faixa de temperatura de trabalho do ferramental. Isso é importante para avaliar se a temperatura de transição vítrea será ultrapassada durante o processo de moldagem.

Ainda com relação a sua utilização no projeto de ferramental por estereolitografia, no item 5.2.7, são apresentados resultados referentes às conseqüências da alteração do projeto do sistema de alimentação, nos parâmetros de processo. Os resultados obtidos demonstraram que a ferramenta CAE é de grande utilidade na avaliação das modificações na geometria do ponto de injeção, principalmente no que diz respeito aos parâmetros de pressão de injeção, temperatura da cavidade, tensão e taxa de cisalhamento, tempo de solidificação da peça e do ponto de injeção. Além disso, o tempo de refrigeração e o tempo de ciclo também podem ser determinados.

Comparação entre os modelos utilizados

Apesar das idênticas dimensões do corpo de prova de tração e da bucha de injeção (pertencente ao mesmo porta-moldes utilizado), como foi descrito nos itens 4.3.1 e 4.3.2 e visualizado na Figura 5.6, o projeto do canal de alimentação e do ponto de injeção não são idênticos. Dessa forma, com o auxílio do sistema CAE, pode-se concluir que os níveis de pressão de injeção, que na moldagem convencional foram superiores em média 8,3% para o PP e 3,5% para o ABS, possuem alguma influência do projeto do canal e do ponto de injeção. Os resultados da simulação comparativa entre o projeto dos insertos mostraram que o ferramental

de aço possui um nível de pressão 4,6% superior ao do ferramental por estereolitografia. Assim, fica comprometida a afirmação de que o ferramental de estereolitografia possui menores níveis experimentais de pressão de injeção do que o ferramental de aço. Entretanto, os níveis de pressão de recalque em relação à pressão de injeção (%), utilizadas no ferramental de estereolitografia, foram inferiores na moldagem do PP e do ABS. Ou seja, o ferramental de estereolitografia, na moldagem do PP, utilizou um nível de pressão de recalque de 72% da sua pressão de injeção, contra 90% do ferramental de aço. Para o ABS, os valores da porcentagem de recalque, em relação a pressão de injeção, foram de 80% para o ferramental de estereolitografia e 87% para o de aço.

Com relação à massa das peças, com o ferramental de aço obtiveram-se valores superiores em 2% para o PP e 6% para o ABS, quando comparados ao ferramental por estereolitografia. Assim, apesar da diferença entre os níveis de pressão de injeção e recalque, o nível de compactação das peças foi próximo. A variação da massa das peças, também pode estar relacionado à redução da sua espessura durante a fase de ajuste do ferramental por estereolitografia.

6.2 – SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Com o objetivo de dar continuidade aos temas abordados neste trabalho, tem-se como sugestões:

1. Realizar um estudo mais aprofundado com relação à moldagem de materiais de engenharia, utilizando ferramental por estereolitografia;
2. Repetir o estudo utilizando ferramentais com cavidades e sistema de alimentação idênticos;
3. Comparar os parâmetros de injeção, obtidos pela moldagem em ferramental convencional e por estereolitografia, utilizando geometrias mais complexas;
4. Investigar quais os fatores que levam à falha quase que imediata do ferramental de estereolitografia (Somos 7110[®]), na moldagem da poliamida (PA 6,6);
5. Investigar se outras resinas de estereolitografia possuem o mesmo comportamento de falha da resina Somos 7110[®], quando da moldagem da poliamida (PA 6,6);
6. Avaliar a influência dos parâmetros de injeção nas propriedades mecânicas das peças obtidas nos ferramentais por estereolitografia;
7. Comparar os resultados obtidos no processo experimental, com os obtidos por simulação, com e sem a utilização de contratipos.

REFERÊNCIAS

1. AHRENS, C. H.; LAFRATTA, F. H.; BEAL, V. **Desenvolvimento e perspectivas do uso de técnicas de rapid tooling por estereolitografia na obtenção de moldados por injeção.** Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, CIMJECT, Florianópolis-SC, Brasil. Plastshow, São Paulo, SP, Brasil 2002.
2. AHRENS², C., H.; RIBEIRO, A. S.; BEAL, V. **An alternative cooling technique for Stereolithography moulds.** Time-Compression Technologies 2001 Conference. United Kingdom; September 2001.
3. ALURU, R., KEEFE, M., ADVANI, S. **Simulation of injection molding into rapid prototyped molds.** Mechanical Engineering Department, University of Delaware. Rapid Prototyping Journal, Volume 7, Number 1, 2001, pp. 42-51.
4. ANIS, G. C. **Guia genérico de parâmetros para o processo de moldagem por injeção.**
5. ARBURG. **Machine Adjustment Course 12, with SELOGICA[®] Control.** ALLROUNDER[®] 220/270 S. 1999.
6. ARCIPRETE, J. D., MALLOY, R., McCARTHY, S. **Cavity pressure studies for stereolithography produced tooling.** ANTEC 99, Vol. 1, 1999.
7. ASTM. **Annual book of ASTM standards: Plastics.** American Society for Testing and Materials, PA, EUA, Section 8, v. 08.01Plastics (I): C 177-D1600. 1986.
8. BARRY, C.; BOOTHROYD, P.; LAI, F.; NUNN, R. E.; ORROTH, S. A.; SCHOTT, N. R. **Short Shot Method of Injection Molding.** Plastics Processing Laboratory Syllabus, University of Massachusetts, Lowell-Plastic Engineering Department, 6^o ed., pg. 61, 1995.

9. BENTON, G.; GUERCI, M.; HARRIS, A.; KLAUS, B. **Rapid Tooling**. GMP Final Presentation, 2001.
10. CEDORGE, T.; COLTON, J. S. **Draft angle and surface roughness effects on stereolithography molds**. School of Mechanical Engineering & Rapid Prototyping and Manufacturing Institute of Technology. Georgia Institute of Technology, Atlanta. Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No 7, July 2000.
11. CEFAMOL. **Manual de procedimentos para a indústria de moldes**. Associação Nacional da Indústria de Molde. Portugal, 1995.
12. CHUA, C. K., LEONG K. F. **Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing**. Nanyang Technological University, John Wiley & Sons. Inc.. Singapore, 1997, ISBN 0-471-19004-7.
13. CIMJECT. **Registro de utilização da máquina injetora**. Documento interno CIMJECT/LABMAT, 2002.
14. COLTON, J. S., LEBAUT, Y. **Thermal Effects on Stereolithography injection molds inserts**. School of Mechanical Engineering & Rapid Prototyping and Manufacturing Institute. Georgia Institute of Technology, Atlanta. Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No 6, June 2000.
15. DECELLES, P.; BARRITT, M. **Direct AIM™ Prototype Tooling**. White Paper. 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, 1997.
16. DUSEL, K. H.; ESCHL, J.; LÜCK, T. **Rapid Tooling Simulation and Applications of the Injection Moulding Process**. IKP - Institute for polymer testing and polymer science: University of Stuttgart, Germany, 1998.
17. GARCIA, J. P.; CARVALHO, J. **Ferramental rápido – Uma nova tecnologia no desenvolvimento produtos**. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos, SP, Brasil. 1º Cobef, Curitiba, PR, Brasil, 2001.

18. GE Plastics. **Moldagem por injeção – variáveis do processo**. Disponível em: http://www.geplastics.com.br/resins/techsolution/technifacts/variaveis_processo.html> (Acesso em: 20/05/2003).
19. GOMIDE, R. B. **Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil. Maio, 2000.
20. GORNI, A. A. **Introdução à prototipagem rápida e seus processos**. Disponível em: <http://www.gorni.hpg.ig.com.br/protrap.htm>> (Acesso em: 11/04/2003).
21. GRELLMANN, D. A. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e microfusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, 2001.
22. HARRIS, R. A., DICKENS, P. M. **The selection of mould design variables in direct stereolithography injection mould tooling**. ANTEC 2001.
23. HOPKINSON, N., DICKENS, P. M. **Research into Part Ejection in the AIM™ Process**. Proceedings of the Time-Compression Technologies 98 Conference, Nottingham, UK. 1998.
24. HOPKINSON², N., DICKENS, P. M. **Study of Ejection Forces in the direct AIM™ Process**. Proceedings of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX USA. 1998.
25. HOPKINSON³, N.; DICKENS, P. **Predicting stereolithography injection mould tool behaviour using models to predict ejection force and tool strength**. International Journal of Production Research, v. 38 (16), 2000.

26. IDSA. **Plastic: Injection Molding. How does it work?** Disponível em: <http://www.idsa-mp.org/proc/plastic/injection/injection_process.htm> (Acesso em: 30/07/2003).
27. INCROPERA, F., P., DAVID, P., W. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** LTC – Livros Técnicos e Científicos (LTC). Editora, Rio de Janeiro, 3ª Edição, pp. 25. Brasil, 1992.
28. ISLNOTES. **Basic Process Factors in Injection Molding.** Disponível em: <http://islnotes.cps.msu.edu/trp/inj/int_bas.html> (Acesso em: 01/03/2003).
29. JACOBS, P. **Recent advances in Rapid Tooling from Stereolithography.** 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, 1996.
30. JANAES, M. J.; FOLKESTAD, J. E. **Rapid Tooling: The rapid-to-market advantage.** Colorado State University, EUA. ANTEC 2000.
31. JONES, D. **The future and conclusion – Rapid Prototyping.** Department of Mechanical Engineering, University of Bath. Disponível em: <<http://www.bath.ac.uk/~en0dpj/The%20future.htm>> (Acesso em: 11/06/2003).
32. KREPLIN, T. **Rapid construction of plastic injection molds.** Baxter International. Rapid Prototyping & Manufacturing 2000.
33. LAFRATTA, F., H. **Avaliação da viabilidade do uso de fluidos refrigerantes, temporariamente confinados, no processo de moldagem por injeção de termoplásticos utilizando técnicas de rapid tooling.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil. Fevereiro, 2003.
34. MATWEB. **Condutividade térmica de metais.** Disponível em: <<http://www.matweb.com>> (Acesso em: 01/10/2002).
35. MIERITZ, B.; DICKENS, P., M. **A European strategy for RP and Manufacturing.** European Action for Rapid Prototyping (EARP), June 1996.

36. MOLDFLOW Plastics Insight, release 3.0. **Software para simulação do processo de moldagem por injeção.** 2001.
37. PALM, W. Disponível em: <<http://www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro>> (Acesso em: 11/04/2003).
38. PHAM, G. T.; COLTON, J. S. **Ejection force modeling for stereolithography injection molding tools.** Center of Polymer Processing and School of Mechanical Engineering. Georgia Institute of Technology, Atlanta. Polymer Engineering and Science, Vol. 42, No 4, April 2002.
39. PICO Technology Ltda. Disponível em: <<http://www.picotech.com/thermocouple.html>> (Acesso em: 10/12/2003).
40. PINTO, U.; **Avaliação de critério para a determinação de contratipos de termoplásticos aplicável em simulação da moldagem por injeção.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil. Maio, 2002.
41. POLIBRASIL. **Guia de problemas e soluções.** Disponível em: <<http://www.polibrasil.com.br/produtos/process/fpinj1.htm>> (Acesso em: 11/12/2003).
42. RADSTOK, E. **Rapid Tooling.** TNO, Netherlands, Rapid Prototyping Journal, Volume 5, Number 4, 1999, pp. 164-168.
43. REES, H. **Mold engineering.** 1 ed. Munique: Hanser/Gardner, 1995.
44. ROBTEC. Disponível em: <<http://www.robtec.com.br>> (Acesso em: em 05/10/2002).
45. ROSOCHOWSKI, A.; MATUSZAK, A. **Rapid tooling: the state of the art.** Journal of Materials Processing Technology. Elsevier Science B.V., 2000.

46. SANSOUCY, M. R. **An investigation into rapid manufacturing of insert-injection molded parts with the use of Stereolithography cavities.** Master Thesis, Institute of Plastics Innovation, University of Massachusetts at Lowell, USA, 1996.
47. SAURKAR, S. **Rapid Tooling: a study of cooling techniques for mold inserts used in Direct AIM™ process.** Master Thesis, Institute of Plastics Innovation, University of Massachusetts at Lowell, USA, April 1998.
48. SCHMIDT, K., ALMQUIST, T. **3D Systems Internal R&D Report.** June 1996.
49. WOHLERS, T. **Rapid Prototyping and Tooling: 1999 Worldwide Progress Report.** Wohlers Associates Inc. pp 221, Colorado – USA, 1999.
50. WOHLERS², T. **Rapid Prototyping and Tooling – State of the Industry – 2000.** Worldwide Progress Report, Wohlers Associates Inc., 2000.
51. 3D Systems. **Stereolithography build station – user guide.** 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, June 1995.

ANEXO 1 – BASE DE DADOS DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO ENCONTRADOS NA LITERATURA E UTILIZADOS NO CIMJECT

TABELA A1 – Parâmetros de processo utilizados no CIMJECT (CIMJECT, 2002).

Parâmetros/ Material	PP homo	PP copol.	PP (opp)/ PEAD/ PEBD	PP	PP	PP H301
Molde	VW Tupy SL	VW Tupy SL	VW Tupy SL	ABS CP tração	SL	SL PIA
Diâmetro fuso [mm]	35	35	35	35	25	35
Pressão injeção [bar]	220	300	400 - 100	120	100	160
Pressão recalque [bar]	65	120	65	-	65	80
Temp. injeção [°C]	210	270	220	200	200	210
Temp. molde [°C]	-	-	-	-	-	40
Veloc. injeção [mm/s]	100	100	150 - 75	-	-	110
Tempo refrigeração [s]	-	-	-	-	-	35
Tempo médio ciclo [s]	-	-	-	-	-	240
Força fechamento [kN]	100	100	150	60	250	50

TABELA A2 – Parâmetros de processo utilizados por GOMIDE (2000).

Parâmetros/Material	PP	PP	PP	PP	PP
Molde	Estudo Caso 1 Inserto 1	Estudo Caso 1b Inserto 3	Estudo Caso 2 Inserto 7	Estudo Caso 2 Inserto 8	Estudo Caso 3
Diâmetro fuso [mm]	35	35	35	35	35
Temperatura injeção [°C]	205	205	215	215	215
Pressão injeção [bar]	100	204	200/250	200/250	280
Pressão recalque [bar]	60	120	125	125	125
Tempo recalque [s]	16	10	4,5	4,5	4,5
Tempo refrigeração [s]	60	50	30	30	80
Tempo molde aberto [s]	20	10	60	60	135
Tempo médio ciclo [s]	120	90	102	102	240

Veloc. injeção máximo [cm ³ /s]	15	15	140	140	80
Vazão fluido refrigerante [L/s]	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
Temp. fluido refrigerante [°C]	20	20	20	20	20
Força fechamento [kN]	100	400	400	400	500

TABELA A3 – Resultados de testes executados pela 3D Systems – Geometria não especificada, porém a mesma para todos os termoplásticos (JACOBS, 1996).

Parâmetros/Material	PEBD	PEAD	PS	PP	ABS
Pressão de injeção [bar]	110	159	165	131	221
Temperatura de injeção [°C]	180	220	200	205	240
Tempo de ciclo [min]	3,5	4,5	4,0	4,0	5,0

TABELA A4 – Resultados de testes executados por AHRENS (2002), Figura 3.7 e 3.11 sucessivamente. Geometria plana fabricada com canais de refrigeração auto pressurizados e geometria plana fabricada com inserto aletado.

	Figura 3.7	Figura 3.11
Parâmetros/Material	PP	PP
Pressão de injeção [bar]	160	100
Temperatura de injeção [°C]	200	200
Tempo de ciclo [min]	-	-
Velocidade injeção [mm/s]	90	100
Pressão de recalque [bar]	95	65
Diâmetro do fuso [mm]	35	35

TABELA A5 – Resultados de testes executados por KREPLIN (2000). Geometria: “Botão” moldado em inserto em casca com sistema de refrigeração.

Parâmetros/Material	PEBD	PEAD	PP	ABS	PA	PC	POM
Pressão de injeção [bar]	138	172	131	620	241	241	276
Temperatura de injeção [°C]	171	182	260	260	254	288	125
Tempo de ciclo [min]	1,5	1,5	1,5	1	1,5	1,5	4

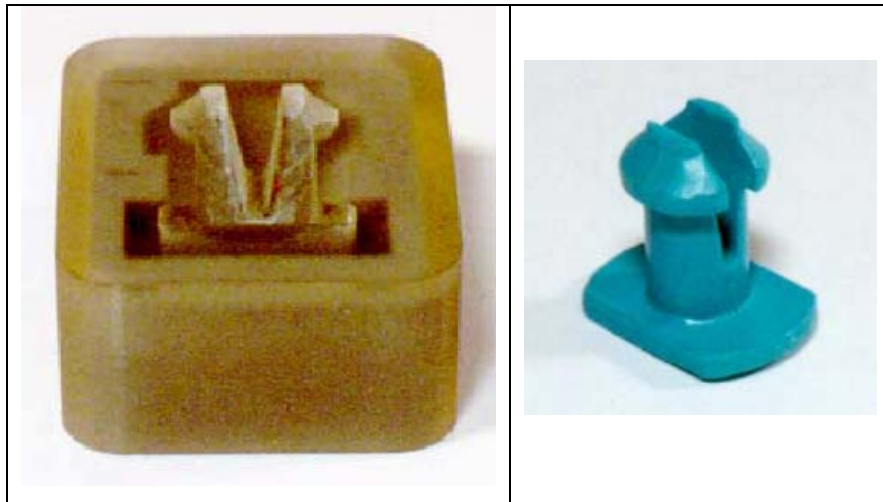


Figura A1 – Geometria utilizada por KREPLIN (2000).

TABELA A6 – Resultados de testes executados por HARRIS & DICKENS (2001).

Geometria não especificada, porém a mesma para todos os termoplásticos.

Parâmetros/Material	PP	ABS	PA 6,6
Pressão de injeção [bar]	-	-	-
Pressão de recalque [bar]	0	0	0
Temperatura de injeção [°C]	185	240	260
Tempo de refrigeração [s]	40	40	40
Velocidade de injeção [cm ³ /s]	5	5	5
Temperatura do inserto	55		
Resina	SL5190		
Máquina	SLA350		

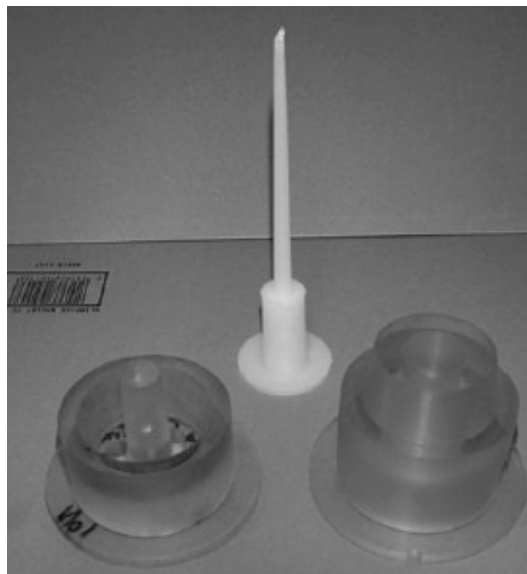


Figura A2 – Geometria utilizada por HARRIS & DICKENS (2001).

TABELA A7 – Resultados de testes executados por ARCIPRETE et al (1999).

Parâmetros/Material	PP	ABS
Pressão de injeção [bar]	115	330
Pressão de recalque [bar]	-	-
Temperatura de injeção [°C]	-	-
Número de peças injetadas	40-100	90



Figura A3 – Geometria utilizada por ARCIPRETE et al (1999).

TABELA A8 – Resultados de testes executados por CEDORGE & COLTON (2000).

Parâmetros/Material	PS
Pressão de injeção	-
Pressão de recalque	40 bar
Tempo de recalque [s]	2
Tempo de resfriamento [s]	200
Tempo de ciclo [min]	5
Temperatura de Injeção [°C]	230
Temperatura do molde[°C]	65
Volume de injeção [cm ³]	20,4
Resina	SL7110
Máquina	SLA350 SL

ANEXO 2 – MÉTODO DA INJEÇÃO PROGRESSIVA – “SHORT SHOT METHOD”

Este método foi traduzido e adaptado de BARRY et al (1995). Com o auxílio deste método é possível o ajuste dos parâmetros de injeção passo a passo.

Aviso:

- 1 - Assuma que a temperatura do molde já foi determinada na máquina;**
- 2 - Assuma que a temperatura de injeção do polímero já esta determinada;**
- 3 - Os passos devem ser seguidos na ordem como segue abaixo.**

Passos:

1 – AJUSTANDO O CURSO DE DOSAGEM (volume de material a ser injetado na cavidade):

- a) Ajuste a pressão de recalque igual a “Zero”;
- b) Ajuste o tempo de recalque igual a “Zero”;
- c) Ajuste a velocidade de injeção de MÉDIA para ALTA;
- d) Ajuste o tempo (1º estágio) para um valor maior do que o necessário para preencher o molde;
- e) Ajuste a pressão (1º estágio) para um valor maior do que o necessário para preencher o molde;
- f) Ajuste o valor do curso do fuso (volume de material) para um valor menor do que o necessário para preencher a cavidade do molde;
- g) Injete uma peça – o resultado deve ser uma peça incompleta;
- h) Continue injetando peças, aumentando gradualmente o curso do fuso (volume de material) – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida, é sinal que o curso do fuso (volume de material) está OK. (Aviso: O fuso deve estar no seu fim de curso nesse estágio. Não deve existir COLCHÃO).

2 – CHECAGEM DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO (volume de material a ser injetado na cavidade):

- a) Injete algumas peças conforme as condições descritas no item “1.h”, e cheque:
 - (i) Se próximo do “ponto de injeção” houver queima ou descoloração do material, ou se a peça ficar muito mole após a extração – então reduza a velocidade de injeção até os problemas desaparecerem;

- (ii) Se próximo do “ponto de injeção” houver marcas de fluxo (marca fria), então aumente a velocidade de injeção até que o problema desapareça.

3 – AJUSTANDO A PRESSÃO DE INJEÇÃO:

- a) Continuando do passo 2.a, ajuste a pressão de injeção (1º estágio) para um valor insuficiente para preencher o molde;
- b) Injete uma peça – o resultado deve ser uma peça incompleta;
- c) Continue injetando peças, AUMENTANDO gradualmente a pressão de injeção – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida, se a aparência da peça estiver compatível com a do passo 2.a, então a pressão está OK. (Aviso: O fuso de injeção deve estar no seu fim de curso. Não deve mais existir material para ser injetado).

4 – AJUSTANDO O TEMPO DE INJEÇÃO:

- a) Continuando do passo 3.c, ajuste o tempo de injeção (1º estágio) para um valor insuficiente para preencher o molde;
- b) Injete uma peça – o resultado deve ser uma peça incompleta;
- c) Continue injetando peças, AUMENTANDO gradualmente o tempo de injeção – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida, se a aparência da peça estiver compatível com a do passo 3.c, a pressão de injeção (1º estágio) está OK. (Aviso: O fuso de injeção deve estar no seu fim de curso. Não deve mais existir material para ser injetado).

Obs.: Máquinas CNC fornecem valores reais de tempo de injeção que podem ser visualizadas no passo 3.

5 – AJUSTANDO O TEMPO DE RECALQUE:

- a) Continuando do passo 4.c, aumente o CURSO DE DOSAGEM em 5-10%;
- b) Injete uma peça – a peça deveria parecer com a do passo 4.c, mas agora um COLCHÃO está presente;
- c) Ajuste a pressão de recalque (2º estágio) para 50-60% da pressão de injeção (1º estágio). Certifique-se se o tempo de recalque ainda é ZERO.
- d) Injete uma peça – a peça deveria ainda permanecer igual a do passo 5.b;
- e) Continue injetando peças, aumentando gradualmente o tempo de recalque. “Pese” a peça para cada incremento de tempo, até a massa parar de aumentar significativamente. Quando a massa da peça parar de variar, o tempo de recalque está OK.

ANEXO 3 – RECOMENDAÇÕES PARA O PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS EM INSERTOS FABRICADOS POR ESTEREOLITOGRAFIA

a) Ponto de injeção:

A utilização de um ponto de injeção com dimensões superiores aos utilizados na moldagem convencional reduz os efeitos causados pelo estrangulamento na interface de transição entre o sistema de alimentação e a peça. Esse aumento de área favorece a utilização de menores pressões e velocidades de injeção, devido ao aumento da seção transversal, reduzindo assim o efeito de erosão provocado pelo atrito entre o termoplástico e o inserto neste local.

b) Velocidade de injeção:

O uso de médias velocidades de injeção (~50%), favorece a vida do inserto a medida que também reduzem o efeito abrasivo e a geração de calor entre o termoplástico e as paredes do inserto. Isso evita o agravamento da queda de resistência da resina de estereolitografia causada pela sua utilização em temperaturas próximas ou superiores a sua temperatura de transição vítrea. Altas velocidades de injeção combinadas com os baixos níveis de pressão de injeção, provocam maiores picos de pressão além da ajustada. Isso acontece pelo fato da pressão de injeção aumentar progressiva e rapidamente, para tentar atingir o nível de velocidade de injeção especificado. Por outro lado, velocidades de injeção muito baixas, aumentam o tempo de preenchimento e tendem a necessitar de maiores pressões de injeção para preencher a cavidade.

c) Temperatura de processamento e do molde:

A temperatura de injeção e do inserto deve ser tão baixa quanto o possível, geralmente o limite mínimo recomendado pelo fabricante. Entretanto, os níveis mínimos de temperatura de injeção, para materiais como o ABS, promovem níveis não usuais de pressão de injeção no ferramental de estereolitografia.

Da mesma forma que no caso de altas velocidades de injeção, o uso de altas temperaturas de injeção e de molde favorece a redução das propriedades mecânicas do inserto devido a sua baixa temperatura de transição vítrea e, também tendem a aumentar o tempo de ciclo em insertos que não possuem sistema de refrigeração. Já as baixas temperaturas promovem um aumento na viscosidade do termoplástico, o que induz o uso de maiores pressões de injeção. Segundo COLTON

& LEBAUT (1999), a temperatura do molde de 50°C é uma boa temperatura e aproximadamente a maior temperatura que o inserto (Somos[®] 7110) pode suportar continuamente sem que comprometa sua vida durante o processo de injeção.

d) Tempo de refrigeração:

Recomenda-se utilizar o menor tempo possível de molde fechado para a solidificação da peça até a sua temperatura de extração, pois quanto maior o tempo de contato entre a peça e o inserto, maior será o aquecimento do inserto e, conseqüentemente, o tempo de para que ele atinja a temperatura para um novo ciclo. Ver equações 1 e 2. Valores de molde fechado para insertos sem refrigeração variam entre 25 e 45 s.

Recomendações para o uso do insertos fabricados por estereolitografia publicados pela *3D Systems* sugerem que um longo tempo de refrigeração é necessário antes da ejeção da peça (DECELLES & BARRITT, 1997). Entretanto, HOPKINSON & DICKENS [1998] sugerem que o tempo de refrigeração deve ser tão curto quanto possível. Outra recomendação sugerida por HARRIS & DICKENS (2001), é que após a peça ser ejetada, deve-se permitir que o inserto esfrie a uma temperatura abaixo da sua temperatura de transição vítrea antes do próximo ciclo. HOPKINSON² & DICKENS (1998), afirmam que um tempo de 40 segundos antes da ejeção da peça mostrou-se um ótimo tempo de refrigeração, pois permite que um mínimo de calor seja transferido para dentro do inserto enquanto a peça já possui resistência suficiente para ser ejetada da cavidade sem sofrer distorções. HARRIS & DICKENS (2001), também comentam que a ejeção da peça num tempo de até 40 segundos de refrigeração implica em ejetá-la enquanto o inserto ainda está acima de sua temperatura de transição vítrea (t_g), ou seja, o inserto agirá de uma maneira mais elástica, assimilando melhor as possíveis deformações que possam ocorrer nesta fase. Finalmente HOPKINSON³ & DICKENS (2000), afirmam que o sucesso da moldagem em insertos de estereolitografia está na determinação do tempo ótimo para a extração da peça moldada. Este tempo deve ser suficiente para que o molde retire apenas a quantidade necessária de calor da peça, de maneira que esta possa ser extraída sem apresentar deformações excessivas.

e) Tempo de molde aberto:

O período de molde aberto, geralmente necessário para que o inserto volte até a temperatura inicial de processamento varia entre 2 e 4 minutos. Recomenda-se o

uso de uma temperatura de cavidade entre 30 e 45°C antes do início da moldagem, dependendo da temperatura de transição vítrea do inserto e da temperatura de injeção. É importante salientar que no caso de longos ciclos de injeção, o material que foi plastificado para o novo ciclo pode degradar devido ao longo tempo que permanece na temperatura de injeção. Segundo GE plastics (2003), é considerado condição normal de injeção, um tempo de residência entre 5 e 8 minutos, porém este valor depende do material utilizado. Assim, se o inserto não possui sistema de refrigeração, a utilização de jatos de ar comprimido diretamente na sua cavidade podem ajudar a reduzir o tempo necessário para a temperatura de um novo ciclo.

f) Sistema de refrigeração:

Um sistema de refrigeração deve ser utilizado sempre que possível, pois como já comentado, favorece a redução dos tempos de molde fechado (refrigeração) e molde aberto (temperatura do inserto até novo ciclo), além de manter o inserto o menor tempo possível em temperaturas acima de sua temperatura de transição vítrea. Segundo GOMIDE (2000), a utilização de um sistema de refrigeração nos insertos de estereolitografia é bastante comprometida funcionalmente pela dificuldade que a resina apresenta em conduzir calor, pois seu coeficiente de condutibilidade térmica é entre 150 e 300 vezes menor que a do aço (ver tabela A9), o que aumenta consideravelmente o tempo de resfriamento da peça.

TABELA A9 – Propriedades dos materiais (MATWEB 2002 & DUSEL 1998).

PROPRIEDADES	Símbolo	Aço 1020	Aço 1045	Somos 7110[®] (75°C)
Condutividade térmica [W/m°C]	k	30	50	0,18
Densidade [kg/m ³]	ρ	7800	7860	1200
Calor específico [J/kg°C]	c_p	460	486	2000
Capacidade calorífica [J/m ³ °C]	C_p	3,59e+06	3,82e+06	2,4e+06
Difusividade térmica [m ² /s]	λ	8,36e-06	13,1e-06	0,075e-06
Coef. expansão térmica [m/m°C]	α	1,20e-05	1,15e-05	9,00e-05

$$C_p = \rho * c_p \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{k}{\rho * c_p} \quad (2)$$

Cabe ressaltar, que segundo INCROPERA et al (1992), a difusividade térmica (λ) é a relação entre a capacidade de conduzir (k) e a capacidade de armazenar energia térmica (C_p). Assim, quanto maior o valor da difusividade térmica, mais rapidamente o material responderá as variações térmicas do meio. No sentido oposto, ou seja, quanto menor este valor, mais lentamente o material responderá as modificações do meio, tendendo a levar mais tempo para atingir novas condições de equilíbrio. Como pode ser visto na Tabela A9, os insertos de estereolitografia possuem uma difusividade térmica bem menor que o aço, o que justifica a sua grande inércia térmica e a recomendação para pequenos tempos de resfriamento da peça.

ANEXO 4 – RECOMENDAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS EM INSERTOS FABRICADOS POR ESTEREOLITOGRAFIA

A simulação do processo de moldagem por injeção de termoplásticos na moldagem convencional pode ser utilizada tanto no projeto de peças e moldes, como também no auxílio da previsão dos parâmetros de processamento. No caso dos insertos fabricados por estereolitografia, algumas adequações devem ser feitas no *software* de CAE para que a análise possa ser executada, pois ele está otimizado para a moldagem convencional. Na seqüência, baseado num estudo de caso preliminar, listamos algumas recomendações para a adequação do *software*, válidas para ambos os casos (metálicos e não metálicos).

a) Simplificação da geometria da peça:

No caso de geometrias com raios de arredondamento, recomenda-se que estes raios sejam suavizados ou eliminados completamente para reduzir o tempo de correção da malha após a sua criação. Os erros na malha ocorrem devido ao grande número de elementos necessários para descrever superfícies curvas pela malha de elementos finitos. Entretanto, simplificações devem ser realizadas somente em regiões onde não se desejam resultados refinados. Além disso, um modelo simplificado com uma malha em boas condições pode gerar resultados mais precisos do que um modelo fiel com erros de malha.

b) Modelagem do sistema de alimentação:

Ao contrário da peça, se possível o sistema de alimentação não deve sofrer nenhum tipo de simplificação e também não deve ser importado juntamente com a peça. Ele deve ser modelado dentro do sistema CAE da maneira mais fiel o possível. Isso porque o sistema CAE gera resultados específicos para a peça e o sistema de alimentação, que só podem ser visualizados quando ele consegue distinguir um do outro. Caso o modelo seja importado com o sistema de alimentação, o *software* considerará todo o conjunto como uma só peça. Assim, resultados importantes como tempo de resfriamento do ponto de injeção e sistema de alimentação não poderão ser gerados individualmente. Outro motivo é que geralmente em geometrias circulares, semicirculares e curvas, como nos sistemas de alimentação, um grande retrabalho na malha gerada no sistema CAE é necessária para que não ocorram distorções nos resultados.

c) Modelagem do sistema de refrigeração:

O sistema de refrigeração também deve ser modelado de maneira fiel. Porém, no caso dos insertos fabricados por estereolitografia, muitos não o possuem. Isso ocorre devido à baixa condutividade térmica da resina termofixa e dos materiais utilizados no preenchimento da parte posterior do inserto. A composição destes materiais proporciona um grande efeito de isolamento térmico, que torna o sistema de refrigeração tão ineficiente que muitas vezes não é vantajoso a sua construção. Porém, se quisermos “rodar” análises que levam em conta de maneira mais correta o efeito do tempo de refrigeração (molde fechado), e o tempo de molde aberto, a construção deste sistema é obrigatória. Neste caso, ele deve ser dimensionado de maneira a ser o mais ineficiente o possível, pois seu objetivo é somente possibilitar a realização da análise. Alguns artifícios para torná-lo ineficiente são: construí-los bem afastado do inserto, utilizar o menor diâmetro possível de canal, utilizar pequena vazão de fluido refrigerante e com temperatura igual a temperatura do molde. Para saber se o sistema é ineficiente, basta visualizar o resultado que mostra a variação da temperatura do fluido de refrigeração. Este valor deve ser insignificante.

d) Seleção da máquina injetora no banco de dados do *software*:

Caso a máquina injetora utilizada não esteja presente no banco de dados do *software*, existe a possibilidade da entrada manual dos seus dados. A entrada de dados possibilita um maior nível de acuracidade nos parâmetros de processamento,

pois informações como máximo curso do fuso [mm], máxima vazão de fundido [cm³/s], razão entre pressão no bico e hidráulica, diâmetro do fuso [mm], máxima pressão hidráulica e pressão de injeção [bar] e máxima força de fechamento [ton] serão levados em consideração na simulação do processo. Além disso, caso algum destes parâmetros seja ultrapassado, um aviso será emitido.

e) Seleção do material termoplástico no banco de dados do *software*:

Segundo MOLDFLOW, a versão 3.1 deste *software* possuía aproximadamente oito mil materiais termoplásticos separados por fabricante. No caso do material utilizado no processamento real não estar disponível no banco de dados do *software*, pode-se utilizar um contratipo. Segundo PINTO (2002), são considerados contratipos os termoplásticos que possuem o mesmo “*grade*”. A definição de “*grade*” depende do termoplástico, no caso dos polipropilenos, são considerados de mesmo “*grade*” os que possuem o mesmo índice de fluidez e estereoisomeria (homopolímero, copolímero bloco ou randômico). Porém, cabe ressaltar que materiais de mesmo “*grade*” não são materiais exatamente iguais, e sim materiais semelhantes. Outras propriedades como densidade sólida, densidade fundida, condutibilidade térmica, capacidade térmica, etc, também podem ser fontes de erros quando da comparação do processo de simulação com o processo real. PINTO (2002), também comenta que quando comparando duas simulações utilizando a mesma geometria, a mesma malha e os mesmos parâmetros de injeção, ou seja, duas simulações onde se utilizaram contratipos, houveram diferenças significativas nos resultados finais, a ponto do autor afirmar que a utilização de contratipos não fornece resultados que possam ser comparados quantitativamente.

f) Seleção do material do molde no banco de dados do *software*:

Como o *software* utilizado está otimizado para a simulação em materiais metálicos, a resina de estereolitografia não está presente no seu banco de dados. Desta forma, as propriedades: densidade [kg/m³], condutividade térmica [W/m°C], coeficiente de expansão térmica [m/m°C] e calor específico [J/kg°C], devem ser inseridas manualmente.

g) Seleção do tipo de análise:

Geralmente as análises utilizadas na simulação são as de preenchimento, recalque e refrigeração. Porém, sempre que possível é recomendado que as análises

sejam executadas na seguinte seqüência: preenchimento + recalque, refrigeração, preenchimento + recalque, pois na primeira análise de preenchimento + recalque, o *software* não leva em consideração a temperatura da cavidade calculada pela análise de refrigeração.

ANEXO 5 – GUIA DE PROBLEMAS E SOLUÇÕES

Este guia tem como objetivo auxiliar na solução de eventuais problemas que ocorram na fase de definição dos parâmetros do processo de moldagem por injeção.

Tabela A10 – Guia genérico de problemas e soluções para o processo de moldagem por injeção (POLIBRASIL, 2003).

<i>Propriedades das peças</i> <i>Variáveis do processo</i>	Peça incompleta	Rebarbas	Linhas de solda	Queima no molde	Bolhas	Empenamento	Delaminação	Linhas de fluxo	Rechupe	quebras no ponto de injeção
Pressão de injeção	↑	↓	↑		↑	↘	↘		↑	↓
Pressão de recalque	↘	↘	↘		↘	↘	↘			↓
Velocidade de injeção	↘	↘	↑	↓	↘	↘	↘	↑		↘
Temperatura de injeção	↑	↓	↘	↘	↘	↘	↘	↑	↘	
Temperatura do molde	↑	↘	↑		↘	↘	↘	↘	↘	↘
Dosagem	↑	↘					↘		↘	
Tempo de pressão injeção/recalque	↘	↘	↘		↘	↘	↘		↑	↘
Contra-pressão		↘			↑	↘	↘		↘	
Problema do molde ou máquina	↘	↘	↘	↑		↘		↘		↓

↑	Aumento da propriedade independente de outros fatores.
↓	Decréscimo da propriedade independente de outros fatores.
↗	Aumento da propriedade, estando subordinada a outros fatores
↘	Decréscimo da propriedade, estando subordinada a outros fatores.

ANEXO 6 – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

7.1 – EQUIPAMENTOS

(i) Máquina de estereolitografia

- Fabricante: 3D Systems Inc. (Califórnia; EUA)
- Modelo: SLA-250/30
- Laser: He-Cd de 30 mW;
- Volume de trabalho: 250x250x250 mm.

(ii) Máquina Injetora

- Fabricante: Arburg (Alemanha);
- Modelo: Allrounder 320S-500-150;
- Diâmetro do fuso: 35 mm (termoplásticos);

(iii) Banho termostatizado

- Fabricante: Micro Química Equipamentos LTDA
- Modelo: MQBTC99-20;
- Faixa de operação: 0-99°C.

(iv) Porta-moldes

- Fabricante: Doado pela Escola Técnica Tupy – Joinville/SC;
- Modelo: Molde de duas placas.

(v) Sistema de aquisição de sinais

- Fabricante: Pico Technology Ltda;
- Modelo: TC 08;
- Termopar: Tipo K

(v) Sistema de aquisição de sinais 2

- Fabricante: Desconhecido (EUA);

- Modelo: Desconhecido – capacidade para 1 termopar;
- Termopar: Tipo K (utilizado), J e T.

(vi) Câmara de cura por ultravioleta

- Fabricante: Cimject;
- Volume de trabalho: 500x400x700;
- Potência máxima: 400 W (10 lâmpadas ultravioletas TLK40W/05).

(vii) Sistema CAD

- Fabricante: SolidWorks Corporation (EUA);
- Versão: 2001 Educacional;

(viii) Sistema CAE

- Fabricante: Moldflow;
- Versão: MPI 3.1.

7.2 – MATERIAIS

(i) Resina de estereolitografia

- Fabricante: DSM Somos;
- Tipo: Somos 7110[®].

(ii) Resina Termoplástica

- Fabricante: Braskem;
- Tipo: Polipropileno;
- *Grade*: H301.

(iii) Resina Termoplástica

- Fabricante: GE Plastics;
- Tipo: ABS;
- *Grade*: Cicolac GPM 6300.

(iv) Resina Termoplástica

- Fabricante: Rhodia;
- Tipo: Poliamida 6,6;
- *Grade*: Technyl A216.

ANEXO 7 – RECOMENDAÇÕES DE PROCESSAMENTO PARA A MOLDAGEM CONVENCIONAL:

A Tabela A11 tem como objetivo auxiliar na determinação dos parâmetros de processo. Entretanto, para a obtenção de valores mais precisos e específicos deve-se recorrer ao fabricante do termoplástico em questão.

Tabela A11 – Guia genérico de parâmetros para o processo de moldagem por injeção (ANIS, 2003).

Material	Simb.	Temp. média cilindro (°C)	Temp. média molde (°C)	Estufagem		Contração média (%)	Dens. (g/cm ³)	D I C A S PARAREGULAGEM DO PROCESSO			
				Temp. (°C)	tempo (h)			Injeção	Recalque	Plastificação	outros
Polietileno Hostalen / Lupolen	PE	170 a 200	10 a 50	-	-	2 a 3	0,92	Pressão = média/baixa Veloc. = alta	Pressão = 40 a 70 % da inj. Tempo = médio longo	Permitido alta rotação e curto tempo de plastificação, porém evitar	Contra-pressão = média/alta usar descompressão e bico especial
Polietileno alta densidade Hostalen	PEAD	200 a 240	10 a 50	-	-	1,5 a 2,5	0,95	Pressão = média/baixa Veloc. = alta	Pressão = 40 a 80 % da inj. Tempo = longo escalonado	Permitido alta rotação e curto tempo de plastificação, porém evitar	Contra-pressão = média usar descompressão baixa
Polipropileno Prolen	PP	200 a 260	20 a 50	-	-	1,5 a 2,5	0,92	Pressão = média/baixa Veloc. = alta	Pressão = 40 a 70 % da inj. Tempo = médio longo	Permitido alta rotação e tempo de plastificação curto, porém evitar	Contra-pressão = média/alta usar descompressão e bico especial
Polipropileno com Fibra Hostacom	PP	210 a 250	40 a 60	se necessário 60 a 80	1	1 a 1,5	1,12	Pressão = média/baixa Veloc. = média /alta	Pressão = 40 a 70 % da inj. Tempo = longo escalonado	Permitido alta rotação e curto tempo de plastificação, porém evitar	Contra-pressão = média usar descompressão baixa
Poliestireno Polystrol	PS	200 a 250	10 a 50	-	-	0,3 a 06	1,04	Pressão = média Veloc. Alta	Pressão = 40 a 70 % da inj. Tempo = curto	Permitido alta rotação e curto tempo de plastificação, porém evitar	Contra-pressão = média usar descompressão baixa
Poliestireno Alto Impacto Polystrol	PS/SB	195 a 230	20 a 60	se necessário 60 a 80	1 a 1,5	0,2 a 0,5	1,06	Pressão = média Veloc. = média / alta	Pressão = 40 a 80 % da inj. Tempo = médio / curto	Permitido alta rotação e curto tempo de plastificação, porém evitar	Contra-pressão = média usar descompressão baixa
Copol. Estir. Acrilonitrilos Cycogel/Novodur/Cicolac	ABS	200 a 260	60 a 80	80	3 a 4	0,4 a 0,7	1,09	Pressão e Veloc.= médio - escalonar veloc. = lento depois rápido	Pressão = 40 a 80 % da inj. Tempo = médio escalonado	Rotação do fuso média e tempo médio	Contra-pressão = média mínima descompressão e bico especial
Polimerizados mistos Luran	SAN	190 a 220	50 a 70	80	3 a 4	0,2 a 0,5	1,09	Pressão = média Veloc. Alta	Pressão = 40 a 80 % da inj. Tempo = médio / curto	Permitido alta rotação e curto tempo de plastificação, porém evitar	Contra-pressão = média usar descompressão baixa
Poli(cloreto de vinila) flex. Mipolan	PVC flex	140 a 170	20 a 40	-	-	1 a 2	1,35	Pressão = média/baixa Veloc. = média escalonada	Pressão = 40 a 70 % da inj. Tempo = longo escalonado	Rotação do fuso Média e tempo médio	Contra-pressão = baixa usar o mínimo de descompressão
Poli(cloreto de vinila) rig. Mipolan / Hostalit	PVC rig.	160 a 190	40 a 60	-	-	0,5 a 0,7	1,3	Pressão = média/ alta Veloc. = média escalonada	Pressão = 40 a 80 % da inj. Tempo = médio / baixo	Rotação do fuso e tempo baixo e, se possível programar retardo	Contra-pressão = baixa
Polioximetileno homopol. Poliacetal Polioximetileno copolim. Celcon/Hostaform/Delrin	POM	170 a 190	60 a 90	80 a 100	2	2 a 2,5	1,4	Pressão = média Veloc. = média alta	Pressão = 40 a 80 % da inj. Tempo = médio / baixo alterar o tempo de recalque em função da necessidade dimensional	Rotação do fuso e tempo médio, não mais que 70% da máq.	Contra-pressão = média , usar descompressão e bico especial Fluxo de injeção, temp. do molde e recalque - influência na contração
Policarbonato Lexan/Durolon/Macrolon	PC	270 a 310	80 a 120	100 a 120	5 a 6	0,5 a 0,8	1,2	Pressão = alta Veloc. = média/alta escalonada	Pressão = 40 a 70 % da inj. Tempo = médio escalonado	Rotação do fuso e tempo baixo, lento terminar pouco antes do resfriamento	Contra-pressão = média para baixa, mínimo possível de descompressão
Poliamida-6 Nylon/Celanyl/Rilsan	PA 6	210 a 240	60 a 80	80 a 90	1 a 2	1,2 a 2,2	1,13	Pressão = média Veloc. = média alta	Pressão = 60 a 80 % da inj. Tempo médio / baixo	Permitido alta rotação, porém evitar Material altamente higroscópico	Contra-pressão = média e descompressão baixa, para reforçados rotação média
Poliamida-6,6 Nylon/Technyl	PA 6,6	230 a 280	60 a 100	80 a 90	1 a 2	1,2 a 2,2	1,14	Pressão = média Veloc. = média alta	Pressão = 60 a 80 % da inj. Tempo médio / baixo	Permitido alta rotação, porém evitar Material altamente higroscópico	Contra-pressão = média e descompressão baixa, para reforçados rotação média