

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

Aplicação da técnica do núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de
ferramental rápido, a partir da estereolitografia.

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELO VANDRESEN

Florianópolis, novembro de 2003.

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

Aplicação da técnica do núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de
ferramental rápido, a partir da estereolitografia.

MARCELO VANDRESEN

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final.

Áureo Campos Ferreira, Ph.D.
Orientador

José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Áureo Campos Ferreira, Ph.D.
Presidente

Rosário Elida Suman Bretas, Ph.D. (UFSCAR) - Relatora

Jonas de Carvalho, Ph.D. (USP – São Carlos)

André Ogliari, Dr.Eng.

Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng.

“Emancipate yourself from mental slavery
None but ourselves can free our minds
Have no fear for atomic energy
’Cause none of them can stop the time.
How long shall they kill our prophets
While we stand aside and look
Some say it’s just a part of it
We’ve got to fulfill the book.”

Bob Marley

À Gatinha,

AGRADECIMENTOS

Aos 7 das quintas, por estarem sempre comigo, e, em especial, ao meu grande amigo Pedrão, que, apesar de não estar mais conosco, me transmite a sensação da Paz nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Professor Áureo Campos Ferreira que, desde o mestrado, me indica a direção para que eu construa meu próprio caminho.

Ao Professor e amigo Carlos Henrique Ahrens, por todo o apoio demonstrado e por colocar à disposição os recursos e a estrutura do CIMJECT.

Aos meus colegas de trabalho na UNIVALI, pelos bons momentos na profissão de professor e nas atividades como Coordenador do Curso de Engenharia Industrial Mecânica.

À CAPES que, através do programa PIQDT – ACAFE – UNISUL, contribuiu para a continuidade deste trabalho.

Aos colegas da Volkswagen – Audi, em especial ao amigo Klaus R. Schie, por me convencerem de que ser pago para fazer o que mais se gosta, porém longe de Florianópolis, realmente não compensa.

Aos meus grandes amigos e parceiros de moradia em terras distantes: Gross, Fabinho e Batata, por me acompanharem numa outra maneira de pensar, vivendo e vencendo uma batalha a cada dia, sempre com muito bom humor.

Aos meus colegas de laboratório, estagiários, técnicos, laboratoristas, mestrandos, doutorandos e professores, pelas discussões proveitosas e inúmeras sugestões.

Ao pessoal que treina Triathlon nesta Ilha de Santa Catarina, por demonstrarem sempre que para quem está preparado, não existe imprevisto.

À minha família, pelo amor dedicado em todo esse tempo de estudo, acreditando que vale a pena.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
TERMINOLOGIA	vii
SIMBOLOGIA	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	6
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	6

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 MOLDAGEM POR INJEÇÃO	8
2.2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA	14
2.3 PROCESSOS DE FERRAMENTARIA RÁPIDA	19
2.4 PROCESSOS DE FERRAMENTARIA RÁPIDA COM ESTEREOLITOGRAFIA	22
2.5 A TÉCNICA DO NÚCLEO PERDIDO	29
2.6 DISCUSSÃO	34

Capítulo 3

SELEÇÃO DE MATERIAIS E ORIENTAÇÕES DE PROJETO	39
3.1 EMBASAMENTO FÍSICO	39
3.1.1 <i>Calor</i>	39
3.1.2 <i>Mudança de fase</i>	41
3.1.3 <i>Transferência de calor</i>	42
3.1.4 <i>Transferência de calor e mudança de fase na moldagem por injeção</i>	45
3.2 MODELAMENTO MATEMÁTICO	58
3.2.1 <i>Modelo aproximado para a seleção de pares polímero/núcleo</i>	60
3.3 SELEÇÃO DE LIGAS METÁLICAS PARA A TÉCNICA DO NÚCLEO PERDIDO	71
3.4 DISCUSSÃO	82

Capítulo 4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA À TÉCNICA DO NÚCLEO PERDIDO	85
4.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA – SISTEMAS CAE	85
4.1.1 <i>Métodos de elementos finitos</i>	87
4.1.2 <i>Simulação do processo de injeção no Moldflow</i>	88
4.1.3 <i>Análise térmica no Ansys</i>	91
4.1.4 <i>Simulação numérica da técnica do núcleo perdido</i>	93
4.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS	107
4.3 SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DO NÚCLEO PERDIDO	109

Capítulo 5

COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL	113
5.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	113
5.1.1 <i>Determinação de propriedades através de calorímetro de varredura diferencial</i>	115
5.2 ESTUDOS DE CASO	122
5.2.1 <i>Materiais e métodos</i>	122
5.2.2 <i>Fabricação dos insertos</i>	126
5.2.3 <i>Fundição de núcleos metálicos para técnica do núcleo perdido</i>	131
5.2.4 <i>Fundição de modelos para fundição por cera perdida</i>	133
5.2.5 <i>Resultados das moldagens por Injeção</i>	134
5.2.6 <i>Remoção dos núcleos metálicos por fusão</i>	138
5.2.7 <i>Controle dimensional do processo</i>	139
5.3 DISCUSSÃO	144

Capítulo 6

CONCLUSÕES	148
REFERÊNCIAS	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidade de fechamento	8
Figura 2 - Unidade injetora com rosca	9
Figura 3 - Injeção do material na cavidade.....	10
Figura 4 - Recalque e resfriamento do moldado.....	11
Figura 5 - Início da dosagem	11
Figura 6 - Final da plastificação	11
Figura 7 - Abertura do molde e extração da peça.....	12
Figura 8 - Fechamento do molde (início do ciclo)	12
Figura 9 - Molde com macho rotativo	13
Figura 10 - Ciclo genérico nos processos por adição de camadas.....	16
Figura 11 - Exemplo de protótipo fabricado por estereolitografia	17
Figura 12 - Princípio da estereolitografia ²⁵	18
Figura 13 - Insertos fabricados por "Direct Aim®" em um porta moldes	26
Figura 14 - Princípio do "Quick Cast®"	28
Figura 15 - Coletor de admissão fabricado pela técnica do núcleo perdido.....	29
Figura 16 - Processo do núcleo perdido	32
Figura 17- Balanço de energia na moldagem por injeção antes da extração.....	50
Figura 18 - Tipos de sistemas de resfriamento utilizados em insertos SL	53
Figura 19 - Procedimento para a fabricação de insertos com de canais de fluxo de calor ⁵⁴	55
Figura 20- Modelo geométrico de esfera/cilindro para técnica do núcleo perdido.....	61
Figura 21- Relação de volumes com temperatura de injeção para liga de 72°C	65
Figura 22 - Relação de volumes com temperatura de injeção para liga de 103°C	66
Figura 23 - Relação de volumes com temperatura de injeção para liga de 125°C	66
Figura 24 - Relação de volumes com temperatura de injeção para cera de microfusão.....	67
Figura 25 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a liga de 72°C	69
Figura 26 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a liga de 103°C	70
Figura 27 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a liga de 125°C	70
Figura 28 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a cera de microfusão	71
Figura 29 - Combinação de elementos nas ligas binárias.....	78
Figura 30 – Simulação do processo de injeção em insertos SL utilizando ferramentas CAE ¹⁹	89

Figura 31 - Análise de preenchimento, tempo de injeção, pressão máxima, ar aprisionado e linhas de solda, utilizando o CAE Moldflow	90
Figura 32 - Malha de elementos finitos da Esfera 2D	96
Figura 33 - Modelo do Ansys da Esfera 2D	96
Figura 34 - Detalhe do refinamento da malha na área de interesse	97
Figura 35 - Comparação dos modelos real e simplificado para esfera 3D	98
Figura 36 - Malha de elementos finitos da esfera 3D	98
Figura 37 - Modelo do Ansys da esfera 3D	100
Figura 38 - Modelo CAD para dado 3D	101
Figura 39 - Comparação dos modelos real e simplificado para dado 3D	102
Figura 40 - Malha de elementos finitos dado 3D	103
Figura 41 - Malha de elementos finitos conjunto do dado 3D	103
Figura 42 - Animação dos resultados no Ansys - núcleo do dado 3D	104
Figura 43 - Etapas da análise térmica empregando sistema CAE	107
Figura 44 - Sistemática de avaliação da viabilidade de emprego da técnica	112
Figura 45 - Resultado das análises DSC para polímeros injetados nos estudos	118
Figura 46- Resultados das análises DSC para cera e polímeros de referência	119
Figura 47- Comparação do resultado das análises DSC	120
Figura 48 - Modelamento geométrico CAD da esfera	123
Figura 49 - Modelamento geométrico CAD do dado	125
Figura 50- Fabricação dos insertos na máquina SLA-250	127
Figura 51 – Comprovação experimental para esfera em estereolitografia	128
Figura 52 – Comprovação experimental para dado, cavidades em estereolitografia	129
Figura 53 – Comprovação experimental para dado, cavidades em aço	131
Figura 54 - Fabricação experimental dos núcleos	132
Figura 55 - Máquina injetora empregada nos estudos - Arburg 320-S	134
Figura 56 - Remoção dos núcleos em banho de glicerina e fluido de radiador (escuro)	139
Figura 57- Medidas realizadas no núcleo do dado	141
Figura 58- Medidas realizadas na peça dado	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Terminologia que define a classificação dos moldes (Tabela 26, p. 95).....	14
Tabela 2 - Métodos indiretos de ferramentaria rápida.....	21
Tabela 3 - Métodos diretos de ferramentaria rápida.....	21
Tabela 4 - Métodos para obtenção de insertos para moldagem por injeção com o auxílio da estereolitografia	23
Tabela 5- Condutividade térmica de vários materiais	25
Tabela 6 - Ligas de baixo ponto de fusão utilizadas para preencher moldes construídos em forma de casca.....	25
Tabela 7 - Tolerâncias lineares típicas para fundição por cera perdida.....	29
Tabela 8 - Densidade de diversos materiais sólidos (adaptada de Gerges ⁴⁵)	31
Tabela 9 - Calores específicos e capacidades caloríficas molares médias de metais ⁴⁸	40
Tabela 10 - Calores latentes de fusão e vaporização ³⁸	41
Tabela 11- Coeficientes de convecção natural no ar a pressão atmosférica.....	44
Tabela 12 - Tempo de secagem	45
Tabela 13 - Temperatura do material fundido das principais resinas.....	47
Tabela 14 - Condições de injeção típicas	48
Tabela 15 - Valores típicos do conteúdo total de calor do material plastificado	48
Tabela 16 - Propriedades dos materiais injetados (resina SLA como referência).....	63
Tabela 17 - Propriedades dos materiais empregados como núcleo (aço como referência).....	63
Tabela 18 - Temperatura máxima de injeção para a peça Dado - $[V_n/V_p] = 2,191$	64
Tabela 19 - Temperatura máxima de injeção para a peça Esfera - $[V_n/V_p] = 3,937$	64
Tabela 20 - Análise de viabilidade de metais puros	76
Tabela 21 - Ligas de baixo ponto de fusão, conhecida a base dos elementos selecionados.....	79
Tabela 22 - Composição química das ligas empregadas no estudo.....	80
Tabela 23 - Temperaturas de contato empregadas nas simulações numéricas.....	99
Tabela 24- Comparação dos resultados do ANSYS para o Dado 3D	108
Tabela 25 - Comparação dos resultados do ANSYS para a esfera.....	109
Tabela 26 - Propriedades disponíveis para as ligas metálicas	115
Tabela 27 - Parâmetros de entrada de propriedades dos polímeros	121
Tabela 28 - Parâmetros de entrada de propriedades da resina SL e da cera para microfusão	121

Tabela 29 - Condições de injeção reguladas na injetora para o dado 3D.....	135
Tabela 30 - Condições de recalque e resfriamento reguladas para o dado 3D.....	135
Tabela 31 - Situação qualitativa do núcleo nas moldagens por injeção da peça esfera	136
Tabela 32 - Distribuição dos núcleos na moldagem por injeção.....	137
Tabela 33 – Situação qualitativa do núcleo nas moldagens por injeção da peça dado.....	137
Tabela 34 - Controle dimensional dos núcleos fundidos em chumbo na cavidade metálica	140
Tabela 35 - Controle dimensional dos núcleos em cera fundidos na cavidade metálica.....	140
Tabela 36 - Controle dimensional dos núcleos fundidos em liga na cavidade de estereolitografia	140
Tabela 37 - Controle dimensional dos núcleos fundidos em cera na cavidade de estereolitografia	141
Tabela 38 - Controle dimensional das peças injetadas na cavidade metálica	142
Tabela 39 - Controle dimensional das peças injetadas na cavidade de estereolitografia	142
Tabela 40 - Pares comparados estatisticamente	144

TERMINOLOGIA

	Benchmark	Padrão ideal de comparação
	Bridge Tooling	Fabricação de centenas de peças
	Conformal cooling	Canais de refrigeração incorporados
	Designers	Projetistas
	Features	Características geométricas construtivas
	Freeze-off layer	Camada solidificada sobre o núcleo
	Fusible Core	Núcleo fundível
	Hard Tooling	Fabricação de milhares de peças
	Hollow	Oco, vazio
	Layer Manufacturing	Fabricação por Camadas
	Load steps	Intervalos de carga
	Lost Core	Núcleo Perdido
	Lost Core	Núcleo perdido
	Metal Core Technology	Tecnologia do núcleo metálico
	One of a Kind	Produto Único
	Shot	Preenchimento da cavidade
	Soft Tooling	Fabricação de dezenas de peças
	Time steps	Intervalos de tempo
	Try-out	Teste do molde de injeção
3D	Tridimensional	Tridimensional
ACES	Accurate clear epoxy solid	Estrutura precisa em epóxi transparente
CAD	Computer Aided Design	Projeto Auxiliado por Computador
CAE	Computer Aided Engineering	Engenharia Auxiliada por Computador
CAM	Computer Aided Manufacturing	Manufatura Auxiliada por Computador
CAx		Sistemas auxiliados por computador
CFD	Computational fluids dynamics	Dinâmica computacional dos fluidos
CIMJECT	Laboratório de Projeto e Fabricação de	Componentes de Plástico Injetados
CNC	Computer Numerical Control	Comando Numérico Computadorizado
DSC	Differential Scanning Calorimetry	Calorimetria diferencial de varredura
FTM	Functional Test Model	Modelo Funcional para Testes
HDT	Heat Deflection Temperature	Temperatura de amolecimento ou distorção ao calor do termoplástico
HSM	High speed milling	Fresamento de alta velocidade

NC	Numerical Control	Comando Numérico
PRONEX	Programa de Apoio a Núcleos de Excelência	
R&D	Research and Development	Pesquisa e Desenvolvimento
RIM	Reacion injection moulding	Moldagem por injeção com reação
RM	Rapid Manufacturing	Manufatura Rápida
RP	Rapid Prototyping	Prototipagem Rápida
RP&M	Rapid Prototyping & Manufacturing	Prototipagem e Manufatura Rápida
RT	Rapid Tooling	Ferramentaria Rápida
RTV	Room temperature vulcanizing	Vulcanização a temperatura ambiente
SL	Stereolithography	Estereolitografia
SLA	Stereolithography Aparatus	Equipamento de Estereolitografia
SLS	Seletive laser sintering	Sinterização seletiva a laser
STL	Surface Tessellation	Superfície triangularizada
UV	Ultra violeta	

SIMBOLOGIA

A	Área
Bi	Número de Biot
c	Calor específico
H	Taxa de transferência de calor
k	Condutividade térmica
L	Calor latente de mudança de fase
L_{eq}	Espessura equivalente
m	Massa
Mc	Capacidade calorífica molar
mol	Molécula grama
P	Potência irradiada
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{cont}	Temperatura de contato
T_{fus}	Temperatura de fusão
T_{inj}	Temperatura de injeção
V	Volume
V_n/V_p	Relação de volumes núcleo/peça
ρ	Densidade

RESUMO

No desenvolvimento de novos componentes injetados em plástico, é usual o emprego de modelos físicos (protótipos), que auxiliam tanto na parte criativa (modelos visuais) quanto em testes com condições reais de uso (modelos funcionais).

A Prototipagem Rápida ou “Rapid Prototyping” (RP), desenvolvida a partir do fim da década de 1980, surgiu como uma evolução dos sistemas de modelamento em CAD, permitindo que, a partir de um modelo computacional 3D, pudesse ser criada diretamente uma peça física com precisão dimensional e de forma, em pouco tempo.

Com a evolução dos diversos métodos para a obtenção de protótipos através da fabricação por camada ou “Layer Manufacturing”, foram desenvolvidas técnicas que permitem fabricar moldes ou insertos de moldes, para a injeção de peças plásticas, de maneira direta ou indireta. Esta evolução da prototipagem rápida (RP) foi chamada inicialmente de ferramentaria rápida, ou “*Rapid Tooling*” (RT). Nos dias de hoje tem sido utilizada também a expressão “*Rapid Manufacturing*” para definir a idéia de se fabricar peças diretamente a partir do modelo computacional.

O “*Direct Aim*®” e o “*Quick Cast*®” se destacam dentre as várias técnicas de fabricação de insertos para injeção de plástico a partir da estereolitografia. No entanto, a extração de peças que possuam reentrâncias ou detalhes muito complexos é uma limitação destes processos. Fabricar rapidamente gavetas, elementos móveis e machos com precisão e resistência, por estas técnicas, não é uma tarefa fácil em função do número de variáveis de processo não dominadas.

Neste contexto, o trabalho desenvolve a fabricação rápida de pequenos lotes de peças com reentrâncias, sem que seja necessário o uso de movimentos relativos de componentes do molde para a extração.

Aproveitando uma tecnologia desenvolvida pela indústria automobilística, para a injeção de coletores de admissão, a técnica do núcleo perdido (“Lost Core”), a pesquisa comprova a possibilidade do uso de insertos metálicos de baixo ponto de fusão, para moldar os detalhes e reentrâncias internas das peças, auxiliando ainda no resfriamento e conseqüente redução do ciclo de injeção.

Nesta área inovadora é descrita a metodologia empregada para comprovar a aplicabilidade do método, bem como são expostas diversas etapas de processo que foram necessárias para a obtenção de propriedades e características de processamento e precisão dimensional.

ABSTRACT

On the development of new plastic injected components, it is common to use physical models (prototypes), which can help as much in the creative (visual models) as with the tests on real use condition (functional models).

Rapid Prototyping (RP), developed by the end of the 1980's, has emerged as an evolution of the CAD modeling systems enabling, starting from a 3D computational model, a physical part with dimensional and shape accuracy to be created directly and quite swiftly.

With the evolution of many methods to obtain prototypes via layer manufacturing, several techniques were developed to allow the manufacturing of molds or inserts of molds, to inject plastic parts, in a direct or indirect manner.

This evolution of rapid prototyping (RP) was, at first, called Rapid Tooling (RT). Nowadays the expression Rapid Manufacturing (RM) has also been used to define the idea of directly producing parts from the computational model.

The Direct Aim and the Quick Cast are distinguished among the other insert and mold manufacturing techniques for the plastic injection based on stereolithography, even though the extraction of parts with undercuts or very complex details is still a limitation of this processes. Quickly manufacturing moving elements and cores with the required precision and resistance, using these techniques, is not an easy task, due to the number of non controlled variables of the process.

In this context the work describes the manufacturing of small batches of parts with undercuts, without the need using of relative movement of the mold's components for the extraction process.

Taking advantage of a technique that was developed by the automobile industry to inject intake manifolds, the lost core technique, the research shows the possibility of the use of low melting point metallic inserts to mold the details and internal undercuts of parts, thus helping the cooling process and reducing injection cycle.

In this innovating area the methodology used to show the applicability of the method is described, and all the steps of the process that were necessary to obtain the properties and processing characteristics to achieve dimensional precision are well described.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Motivação

A necessidade de se reduzir o peso de componentes ou massificar a sua produção tem feito com que elementos nunca antes imaginados em outros materiais sejam feitos em plástico. Um bom exemplo disto são as barras de pára-choques¹, agora mais leves e ainda mais resistentes que seus antecessores em aço ou alumínio.

Com a fabricação em materiais plásticos se conseguem características nos componentes que antes não se apresentavam como requisitos de projeto, como o efeito memória e a maior capacidade de absorção de deformação, retornando à forma original após pequenos impactos.

Novos requisitos de segurança estão sendo estipulados para diversos ramos, em função de propriedades agora alcançáveis com a fabricação dos componentes em materiais plásticos. O exemplo mais significativo é a segurança passiva para pedestres, um conceito que surge na Europa, onde o produto “carro” tem de ser suficientemente seguro para literalmente “atropelar” um pedestre com o mínimo de dano. Isto só se tornou possível com o advento de capôs, grades e pára-choques fabricados em um tipo de plástico que absorva energia, deformando-se com facilidade.

Boa parte desta migração para o plástico é de responsabilidade dos fabricantes de resinas, que têm investido muito em pesquisa e descoberto ainda mais aplicações práticas para os produtos que desenvolvem².

De acordo com Sino³ o trabalho conjunto das montadoras e fornecedores de matéria prima, em busca da redução de peso e de custo dos componentes, tende a mudar muito o perfil dos automóveis nos próximos anos. A área em que mais mudança tem ocorrido atualmente está no compartimento do motor, onde, devido a novos materiais resistentes a óleo, combustíveis e altas temperaturas, tem-se a substituição quase que total de elementos como coletores de ar, tampas de válvulas e defletores de óleo.

Em outros setores da economia, como na fabricação de artigos esportivos, o plástico também está tomando o lugar anteriormente dominado apenas por metais leves, como é o caso de rodas de bicicleta⁴, que, pelo uso de um processo desenvolvido pelos fabricantes de resina para fabricação de coletores de admissão de ar, tem propriedades melhores que as suas concorrentes metálicas.

O desenvolvimento de novos materiais compósitos, na indústria automobilística, tem levado ao extremo a idéia da substituição por peças plásticas, sendo que, em alguns casos, até o chassi de veículos já está sendo substituído com estes materiais⁵ que podem ter o dobro da resistência do aço com um quarto do peso.

As leis ecológicas, principalmente na Europa, têm forçado os fabricantes de bens de vida média e longa, a se preocuparem com a desmontagem e reciclagem dos componentes. Um ramo da indústria, bastante afetado por estas leis, é o da indústria automotiva, que agora se preocupa, e muito, com o desmonte e a reciclagem de seus produtos⁶.

A *Ford Motor Co.*, juntamente com a fabricante de resinas *DuPont Automotive* receberam, já em 97, um prêmio da *Society of Plastics Engineers* por conseguirem empregar em seus veículos peças com percentuais de até 25% de material reciclado⁷, retirados de veículos de sua marca, na base de desmontagem em suas plantas. Com isso pode-se ver que o ciclo de vida dos materiais plásticos em engenharia tem aumentado a cada dia.

A corrida para atender os requisitos dos padrões de emissões do governo dos EUA está pressionando o desenvolvimento de tecnologia de ponta nos sistemas integrados de alimentação dos motores. Sistemas mais eficientes e mais versáteis para se adaptar a diversas condições em que o motor é levado a trabalhar só podem ser fabricadas por processos especiais em plástico⁸.

Segundo Mapleston⁹, todo o crescimento futuro da indústria automobilística mundial, em termos de demanda e construção, vai ser na Ásia e a América do Sul. Segundo ele, até 2015 a demanda mundial vai fazer com que surja o equivalente a 160 fábricas com capacidade para 300.000 carros por ano, muitas delas no Brasil.

A América Latina e Ásia são também tidas como alvo principal para a estréia, já neste início de século, dos veículos totalmente de plástico¹⁰.

A “sabedoria popular” diz que para se ganhar dinheiro com injeção de plástico é preciso transformar toneladas de resina em peças boas. Já houve um tempo em que tal “sabedoria popular” foi verdade. Hoje pequenos volumes de produção não são apenas viáveis, mas também lucrativos¹¹.

A diminuição da vida útil de produtos e a crescente necessidade de colocar novos produtos no mercado cada vez mais rápido, têm feito com que projetistas, “designers”, transformadores e ferramentarias do mundo todo busquem novas tecnologias para auxílio no projeto e testes de novos produtos.

Equipamentos médicos e científicos já estão sendo produzidos economicamente em pequena quantidade e, algumas vezes, como peças únicas, utilizando o poder da ferramentaria

rápida para obter peças injetadas¹². Com isso é possível associar as características positivas dos componentes plásticos injetados a produtos que seriam produzidos por outros meios, pois o custo da fabricação de uma ferramenta de injeção só compensaria a produção de um lote mínimo de milhares de peças.

O termo ferramentaria rápida, como se quer tratar, refere-se à obtenção de ferramentas para injeção de pequenos lotes de peças ou peças únicas, obtidas através de processos não convencionais de fabricação (como a fabricação por camada), ou através do uso de tecnologia não comum à fabricação de pequenos lotes de peças (como a injeção de plásticos).

Algumas tecnologias desenvolvidas para a indústria automobilística, como as “Linhas Transfer” de usinagem, dedicadas a produzir economicamente milhares de peças iguais, não são facilmente adaptadas a outros setores produtivos. Porém existe pelo menos uma tecnologia desenvolvida para uso na indústria automobilística, o *Lost Core* ou Técnica do Núcleo Perdido, que apesar de ter seu custo de instalação de implantação atingindo valores de 5 a 10 milhões de dólares¹³, começa a ser utilizada na indústria aero-espacial¹⁴ e de esportes, em função de sua grande capacidade de produzir peças injetadas com paredes finas e formas complexas.

O aprimoramento e a divulgação de várias tecnologias para a fabricação de peças altamente complexas tem mostrado que a fabricação de componentes pequenos e/ou complexos¹⁵, através de injeção a gás, co-injeção, injeção multicomponente seqüencial, tem se mostrado viável até mesmo para a fabricação de brinquedos, ramo que sempre trocou a qualidade e precisão dimensional de processos caros, pelo menor preço dos processos mais baratos e menos técnicos.

O desenvolvimento de novos produtos, tanto para a produção em pequenos lotes quanto para a produção em massa, passa por etapas similares. É preciso buscar, dentre todas as tecnologias disponíveis, a que seja mais rentável para a produção, sem o descarte das tecnologias mais complexas e caras, mesmo que se precise fabricar apenas uma ou várias peças.

No ramo automobilístico, em que o desenvolvimento de um novo produto costuma levar alguns anos (usualmente quatro), são necessários inúmeros protótipos, para visualização e testes funcionais, para conferir os conceitos de funcionamento e realizar infindáveis testes em situação real, quando são colocados à prova os componentes em rotação, no ambiente em que vão atuar, para comprovar sua durabilidade e segurança (estabilidade), quando solicitados em condições extremas.

A fabricação destes protótipos de peças pode ser feita por diversos processos (usinagem, soldagem, conformação, injeção, etc.) e, quanto mais próximo do fim do desenvolvimento do produto, mais difíceis e onerosas serão as mudanças, pois, as ferramentas de produção estarão quase prontas.

Com a chegada cada vez mais constante de novas montadoras e novos produtos no mercado nacional, as áreas de pesquisa e desenvolvimento em protótipos (*R&D - Research and Development*) ou de fabricação de pequenos lotes, tem ainda um campo enorme a ser desenvolvido, seja para o desenvolvimento de produtos ou aplicação direta.

No contexto apresentado pela indústria atual se torna clara a importância do **desenvolvimento de uma metodologia para injetar peças plásticas de geometria complexa, em condições similares às que se obtém com uma ferramenta convencional definitiva**, mesmo com possibilidade limitada de tamanho de lote (100 peças). Com esta é possível iniciar os testes de desenvolvimento de produtos ou protótipos (seja este um automóvel ou um brinquedo), sem ficar sujeito ao risco de que um desvio no rumo do projeto faça com que se perca uma fortuna em tempo e dinheiro investidos no projeto e fabricação de uma ferramenta definitiva (molde de injeção).

1.2 Apresentação do problema

A utilização da estereolitografia na fabricação de cavidades é uma forma de ferramentaria rápida que tem sido utilizada para a moldagem por injeção de um número limitado de peças protótipo. Entretanto, o processo não está bem entendido (dominado) e a vida da ferramenta e dos detalhes do molde, são difíceis de prever. As condições de processamento da moldagem por injeção e a forma dos detalhes afetam o número de peças que podem ser fabricadas até que o molde falhe¹⁶.

A estereolitografia foi utilizada com sucesso na produção de pequenos lotes de peças injetadas, mas as geometrias dos moldes eram básicas¹⁷.

Peças injetadas em plástico que requeiram movimentação relativa das partes dos moldes para sua extração, como por exemplo a saída do núcleo da peça para que o molde possa ser aberto, ainda apresentam dificuldades para serem obtidas através dos processos da ferramentaria rápida, auxiliada pela fabricação por camada baseada em estereolitografia, em função dos esforços mecânicos, precisão dimensional e movimentação envolvidos.

A literatura apresenta como grande inconveniente na injeção de componentes em moldes de estereolitografia a sua baixa condutividade térmica (aproximadamente 0,18 W/mK, para a resina Somos[®] 7100, como apresentado na folha de informações do produto¹⁸).

Esta baixa condutividade térmica faz com que se tenha um tempo de ciclo de injeção bastante alto diferindo assim do processo usual em moldes metálicos, já que, além do tempo de resfriamento do moldado com a cavidade fechada ser maior (como a cavidade conduz menos calor o moldado leva mais tempo para “solidificar”), é necessário manter o molde aberto por um tempo elevado para resfriamento das cavidades (para evitar a sua fragilização). Este tempo de ciclo maior provoca uma maior degradação do material que está já aquecido e pronto na injetora para a próxima peça a ser moldada, o que não aconteceria normalmente num ciclo de injeção com ferramenta convencional.

Estudos têm sido realizados com o objetivo de otimizar o processo em função desta limitação de condutividade térmica, pode-se citar o trabalho de Ribeiro Jr.¹⁹ que estuda a relação entre os mecanismos de falha dos moldes durante a etapa de extração das peças, com o tempo de ciclo de produção, buscando otimizar o tempo de resfriamento da cavidade com o molde aberto.

Outro trabalho relevante na área é o de Lafratta²⁰ que apresenta a utilização de canais de refrigeração incorporados (*Conformal cooling*), acompanhando a superfície da cavidade (produzidos como parte integrante da “casca” da cavidade de estereolitografia) com o objetivo de promover uma troca de calor mais eficaz entre o moldado e o fluido de refrigeração que corre por estes canais, reduzindo desta forma o ciclo de injeção e o tempo de resfriamento com a cavidade aberta.

Para solucionar estes problemas (complexidade de peças e resfriamento do moldado), uma tecnologia desenvolvida para a fabricação de coletores de admissão – a técnica do núcleo perdido, foi adaptada para permitir obter peças injetadas com paredes finas e formato complexo, principalmente em relação ao seu núcleo, buscando repetibilidade e precisão dimensional. Esta técnica permite assim a fabricação de pequenas séries ou produtos únicos que necessitariam de moldes com movimentação relativa de partes para a extração, ou ainda a fabricação de peças nas quais a extração do macho seria impossível, utilizando tempos de ciclo similares aos encontrados em cavidades metálicas.

Este trabalho descreve as tecnologias envolvidas e demonstra como podem ser modificadas e simuladas, para a fabricação de pequenos lotes de peças, em ferramentaria rápida, auxiliada pela fabricação camada a camada, baseada em estereolitografia.

1.3 Objetivos do trabalho

O presente trabalho de pesquisa objetiva a formulação científica de método que permita a aplicação da Técnica do Núcleo Perdido na injeção de peças com reentrâncias em moldes de abertura simples fabricados através do processo de estereolitografia. A abordagem utilizada para resolver este problema é do modelamento matemático e geométrico associado à simulação computacional corroborada por experimentos controlados.

Desta forma se amplia a gama de possibilidades do ferramental rápido (*Rapid Tooling*), permitindo a produção de peças com maior complexidade do que tem sido possível nos moldes de abertura simples. Para isto adapta-se a técnica do núcleo perdido à fabricação por camadas, desenvolvendo a tecnologia empregada para fabricação e retirada do núcleo de forma segura e econômica, levando em consideração pequenos lotes de peças (máximo de 100 peças).

Verificam-se valores limites de processamento, definindo e testando uma gama de materiais que podem ser utilizados no processo de injeção, bem como características ótimas de processamento em termos de temperatura de injeção para as ligas metálicas selecionadas no estudo, através de processo de simulação numérica.

1.4 Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, a monografia está estruturada em seis capítulos, incluindo este introdutório, como indicado a seguir.

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica do processo de injeção de termoplásticos; são apresentadas algumas das metodologias empregadas no processo de obtenção de componentes injetados a partir da fabricação por camadas (*Layer Manufacturing*), principalmente a baseada em estereolitografia (disponível na UFSC para este trabalho de pesquisa) e termina com a descrição da técnica do núcleo perdido, como é utilizada na fabricação de coletores de admissão na indústria automotiva.

No Capítulo 3 são descritos processos físicos de troca de calor e mudança de fase envolvidas na injeção de termoplásticos; é desenvolvido modelo matemático descritivo do processo injeção do termoplástico sobre núcleo metálico, que resulta em modelo aproximado para seleção de pares materiais para que o núcleo não se funda durante o processo de injeção do termoplástico, em função de propriedades físicas e geométricas, e são comentados fatores relevantes à seleção de metais e polímeros para a utilização em injeção com núcleo perdido.

O Capítulo 4 inicia com a descrição da tecnologia empregada na simulação numérica do problema, usando pacote computacional CAE, são discutidos aspectos técnicos e simplificações adotadas. Por fim são apresentados resultados obtidos com os diversos tipos de

simulação utilizados e é apresentada comparação com os experimentos realizados para validação do modelo.

No Capítulo 5 são descritos os experimentos que se fizeram necessários neste trabalho, e que permitiram o levantamento de propriedades físicas precisas dos materiais empregados; e a determinação da precisão dimensional obtida na moldagem em cavidade metálica e cavidade SL. São também apresentados, ao final do Capítulo, os resultados obtidos na fundição por gravidade de cera para micro-fusão em cavidade SL e a posterior utilização destes fundidos como núcleos no processo de injeção por núcleo perdido.

O Capítulo 6 resume as contribuições da pesquisa e aponta possíveis trabalhos futuros derivados deste.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica do processo de injeção de termoplásticos; são apresentadas algumas das metodologias empregadas no processo de obtenção de componentes injetados a partir da fabricação por camadas (*Layer Manufacturing*), principalmente a baseada em estereolitografia (disponível na UFSC para este trabalho de pesquisa) e termina com a descrição da técnica do núcleo perdido, como é utilizada na fabricação de coletores de admissão na indústria automotiva.

2.1 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção representa o processo mais importante para a manufatura de peças plásticas²¹. Ela é aplicável para produção em massa de produtos, já que a matéria prima bruta pode ser convertida em produto acabado em uma única etapa, na maioria dos casos sem necessitar de uma operação de acabamento.

Estima-se que 25% de todos os termoplásticos que são transformados o são através do processo de injeção, que permite uma grande gama de produtos, com pesos variando desde 5 gramas até 85 quilogramas²².

No processo de injeção podem ser destacados dois elementos principais: a máquina injetora e o molde de injeção. Cada qual tem características especiais que vão influenciar o processo de obtenção da peça.

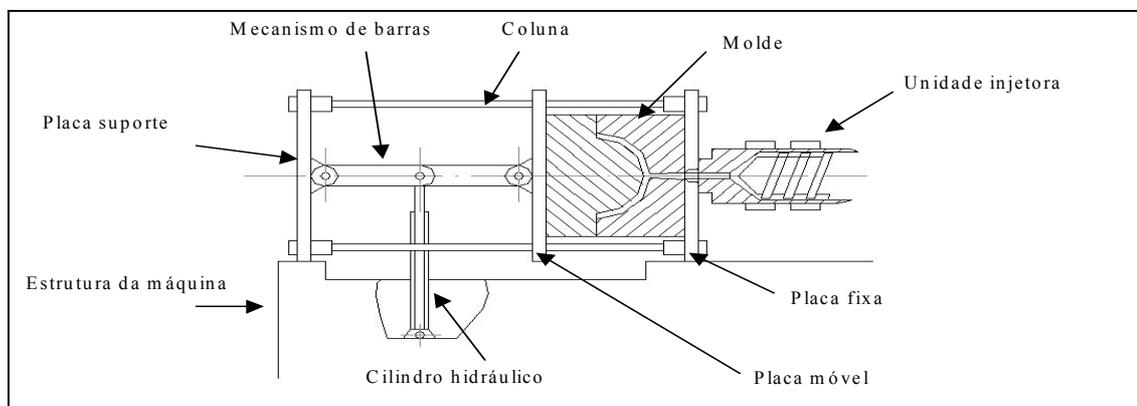


Figura 1 - Unidade de fechamento

A máquina injetora tem dois componentes principais, a unidade de fechamento (Figura 1), responsável pela movimentação das metades do molde, e a unidade de injetora (Figura 2), responsável pela plastificação e injeção do material na cavidade.

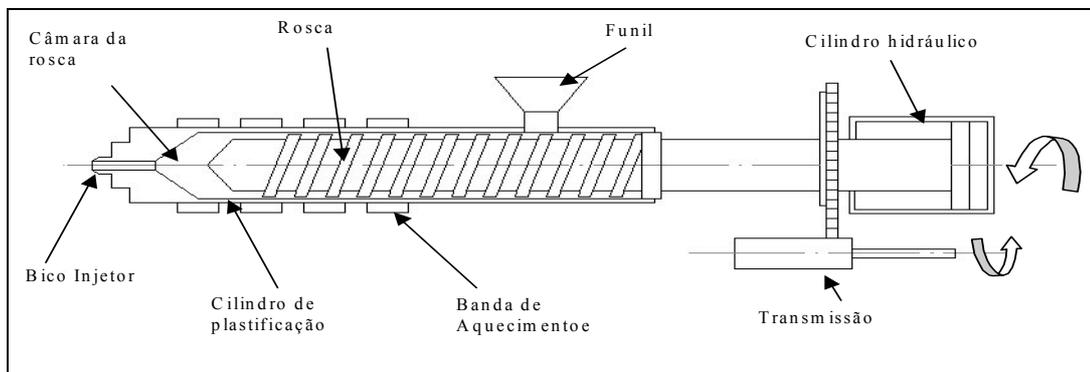


Figura 2 - Unidade injetora com rosca

As máquinas injetoras podem ser horizontais, quando o fluxo de material (unidade injetora) está na horizontal, ou verticais, quando o fluxo de material está na vertical, sendo o primeiro tipo mais comum nas industriais em geral.

Grosso modo uma característica marcante do processo de injeção é que as máquinas injetoras podem ser utilizadas para a fabricação de diversas peças, dentro de uma certa faixa de capacidade, enquanto que o molde só é capaz de dar forma ao produto para o qual foi projetado. O molde é, portanto, um produto único (*“one of a kind”*).

Sendo assim, o molde se torna o elemento a que se deve dar mais atenção, já que tem uma relação direta com o produto e a capacidade produtiva daquele componente que se deseja obter.

Apesar de ser um processo largamente difundido, a injeção de peças plásticas ainda conta com uma grande parcela de empirismo e intuição quando do projeto e da fabricação dos moldes.

Para que se possa estudar as características e aspectos que interferem no projeto e fabricação dos moldes, principalmente na ferramentaria rápida, é importante que se conheça o ciclo de injeção de uma peça plástica qualquer.

No caso mais simples e também mais freqüente, o molde de injeção consiste de duas metades, que são montadas diretamente nas placas da máquina injetora. Estes dois elementos básicos, a metade montada na placa móvel e a metade montada na placa fixa, podem ser encontrados em qualquer molde, independente de seu projeto. Elas também poderiam ser chamadas de metade macho e metade fêmea.

Supondo que o processo já esteja em regime permanente e que todos os componentes já atingiram sua temperatura de estabilização em trabalho, pode-se tomar como momento inicial, para compreensão do ciclo, o momento imediatamente após as metades do molde terem se fechado totalmente.

O material fundido é injetado no molde (Figura 3), que está sendo comprimido fortemente pela força de fechamento da máquina (a capacidade de uma máquina injetora normalmente é definida pela sua capacidade de força de fechamento, entre outros fatores), de maneira que nenhuma porção escape das cavidades. O material fundido é empurrado da unidade de plastificação, que é geralmente uma rosca giratória, que deve estar firmemente apoiada no molde para que também ali não ocorra vazamento de material fundido.

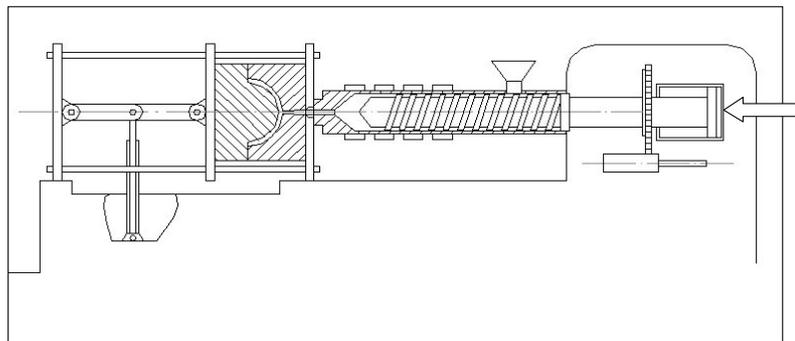


Figura 3 - Injeção do material na cavidade

Devido à grande diferença de temperatura, entre a unidade de plastificação e o molde metálico, o contato entre estes elementos deve ser mantido apenas pelo tempo mínimo necessário, ou seja, apenas enquanto o material plástico tem capacidade de escoar.

Após a cavidade ter sido preenchida, o material fundido começa a se solidificar. Como o seu volume se reduz com a solidificação e a diminuição da temperatura, de maneira geralmente pronunciada, é necessário compensar esta contração volumétrica, injetando mais material fundido. Sendo assim, a pressão no fundido tem de ser mantida até que o processo de solidificação esteja terminado (Figura 4).

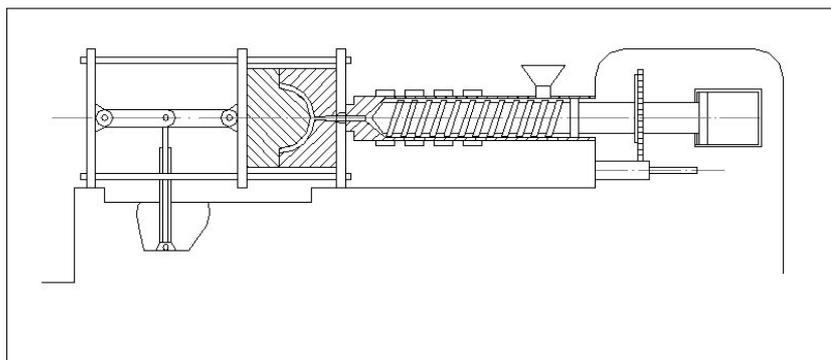


Figura 4 - Recalque e resfriamento do moldado

Como o processo de plastificação demanda uma certa quantidade de tempo, a rosca já começa a girar e o material começa a ser dosado, aquecido e transportado para a frente da rosca para formar um colchão de material fundido, através da rotação da rosca (Figura 5).

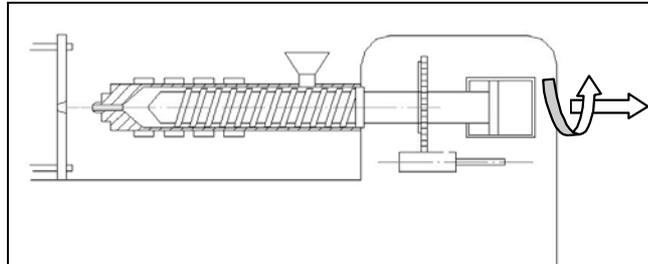


Figura 5 - Início da dosagem

Quando uma quantidade suficiente de material já tiver sido fundida, este movimento de rotação pára (Figura 6).

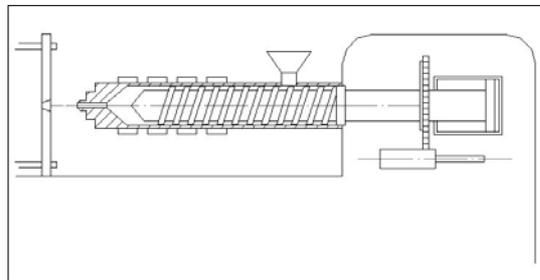


Figura 6 - Final da plastificação

Quando a peça está solidificada, a unidade injetora se separa do molde, de forma que se evita o resfriamento do material na ponta do canhão de injeção devido ao contato com o molde que é usualmente refrigerado. A unidade de fechamento se mantém fechada até que a peça tenha uma estabilidade dimensional suficiente para ser extraída do molde.

O molde se abre e a peça é removida, normalmente com a ajuda de extratores ou outros mecanismos, mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos (Figura 7).

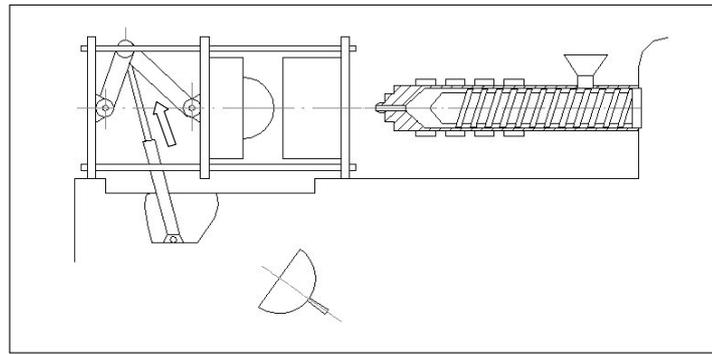


Figura 7 - Abertura do molde e extração da peça

Novamente o conjunto injetor se encosta no molde, este se fecha e trava; um novo ciclo se inicia (Figura 8).

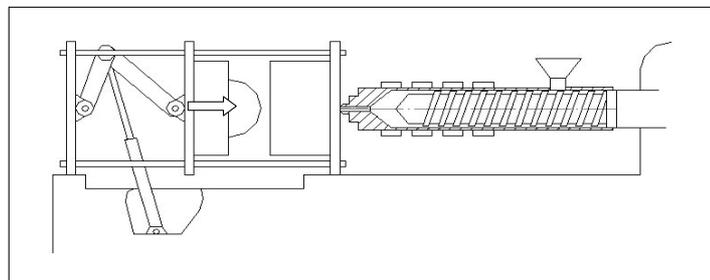


Figura 8 - Fechamento do molde (início do ciclo)

O molde de injeção tem como funções principais distribuir o material fundido nas cavidades, dar a forma final ao produto moldado, resfriar o material fundido até a sua solidificação e por fim ejetar a peça. Como funções secundárias, deve resistir às forças envolvidas no processo de injeção, transmitir movimentos e guiar as partes móveis do molde.

Para cada geometria específica de produto que se queira moldar vai ser necessário encontrar uma solução construtiva para que a peça possa ser injetada e, principalmente, extraída do molde.

A complexidade do molde é diretamente proporcional à complexidade da peça. Pode-se dizer que a família de peças mais simples e mais comuns para serem injetadas é a das peças geradas pela revolução de um contorno simples, como é o caso dos baldes e de tantos outros recipientes de uso doméstico, assim como suas tampas, que são injetados utilizando moldes padrão (apenas uma linha de partição e duas metades, uma macho e uma fêmea).

Peças mais complexas requerem, para sua extração do molde, movimentos relativos de partes da cavidade para que a peça possa ser extraída do molde mantendo sua integridade. Muitos projetos de produto têm de ser modificados para evitar que se necessite de um molde

muito complexo, pois isto eleva os custos de projeto, de execução e de manutenção do mesmo. Um exemplo de molde complexo pode ser visto na Figura 9.

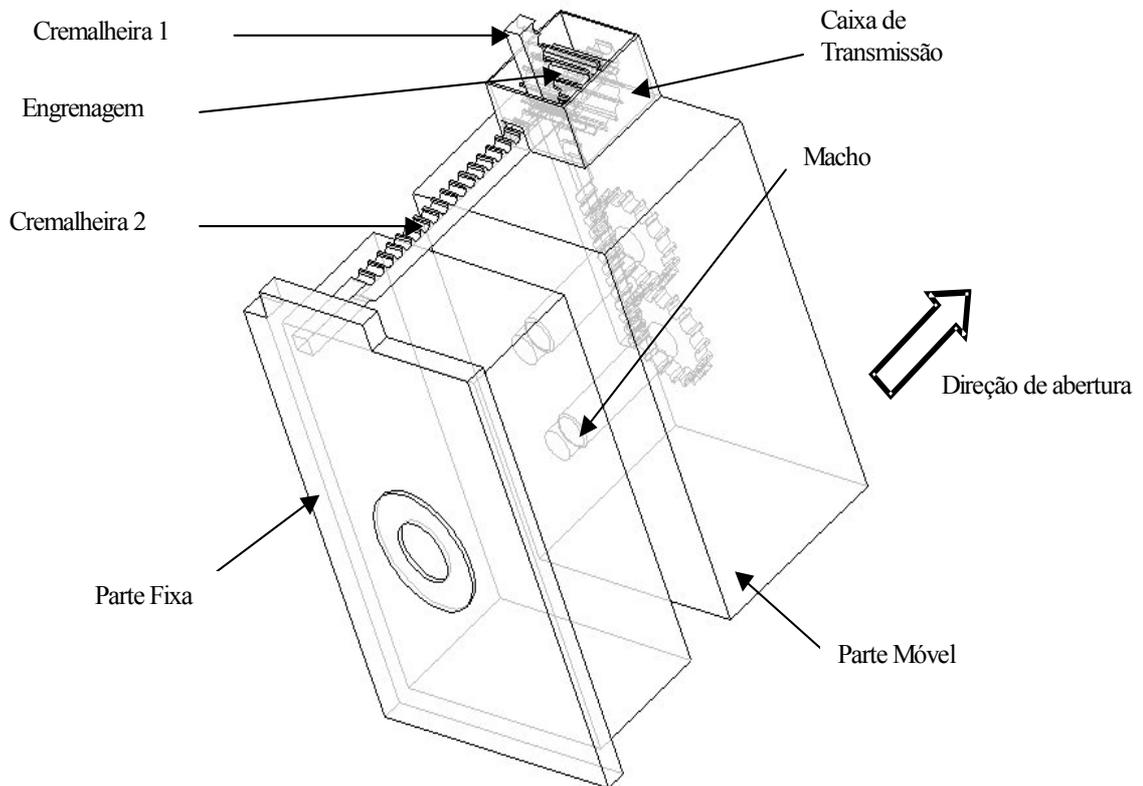


Figura 9 - Molde com macho rotativo

Na obra de Menges e Mohren²³ encontra-se uma classificação genérica bastante aceita dos tipos de moldes disponíveis, em função do seu princípio de funcionamento. Vale mais uma vez lembrar que cada molde é um projeto de engenharia dedicado, exclusivamente, àquele produto que se quer injetar. A Tabela 1 do livro de Menges, reproduzida abaixo, traz um resumo desta classificação.

Designação	Terminologia
Molde Padrão	Projeto mais simples; uma linha de junção; movimento de abertura unidirecional; extração primariamente por gravidade, com pinos ou buchas ejetoras.
Molde com placa extratora	Similar ao primeiro, mas a extração é feita com placa extratora.
Molde com partes móveis	Uma linha de junção; movimento de abertura na direção principal e na transversal com o auxílio de cames ou pinos - guia inclinados.
Molde com sistema de extração por placa impulsora	Similar ao primeiro, mas a separação dos canais de injeção do moldado é feita com o movimento de uma placa adicional em movimentação transversa.
Molde de cavidades divididas	Uma linha de junção; movimento de abertura na direção principal e transversal; as metades das cavidades deslizam em planos inclinados e podem suportar forças laterais.
Molde com mecanismo de extração por núcleo rotativo (roscado)	Possui um movimento de rotação para a extração de um moldado que possui um filete de rosca.
Molde projetado para rasgamento do moldado	Duas linhas de junção resultantes, depois da extração dos canais e do moldado; movimento de abertura unidirecional em dois estágios.
Molde em pilha (“Stack Mold”)	Placas das cavidades empilhadas com várias linhas de junção.
Molde de canais isolados	Duas linhas de junção; sem canais de alimentação convencionais, mas canais com maior área de secção transversal, permitindo a formação de um núcleo quente isolado por uma camada resfriada circunvizinha.
Molde de canal quente	O canal de alimentação está localizado em um tubo aquecido por resistências elétricas.
Moldes especiais	Combinação dos anteriores (segundo ao décimo tipo), para moldes com necessidades especiais, que não permitam uma solução trivial.

Tabela 1: Terminologia que define a classificação dos moldes²³ (Tabela 26, p. 95)

Analisando a classificação apresentada pode-se concluir que existem ainda peças que não podem ser produzidas pelo processo de injeção convencional, devido a sua forma, mesmo utilizando moldes especiais. Nestes casos deve-se optar por outras soluções, que sempre implicarão em etapas posteriores ao processo de injeção, seja para uma etapa de união de partes produzidas em separado, seja para remoção de material residual do processo.

2.2 Prototipagem rápida

A fabricação de protótipos ou modelos data da antiguidade, quando eram utilizados como forma de comunicação, documentação e desenvolvimento de obras de engenharia.

Muitas técnicas artesanais ainda são utilizadas, porém sempre se mostram extremamente demoradas, trabalhosas e dependendo basicamente da habilidade manual da pessoa que confecciona o modelo, mostrando pouca ou nenhuma repetibilidade.

Já no início da década de 80, com a proliferação dos sistemas CAE/CAD/CAM (designados muitas vezes de sistemas CAx), começou a ser possível o uso de sistemas gráficos em computador para uma prototipagem virtual. Com isso também passou a ser possível analisar aspectos de engenharia sem se dispor de um protótipo físico em mãos, pelo qual já era possível girar e visualizar a peça em diferentes posições.

Utilizando os recursos disponíveis de sistemas computacionais associados ao CNC (Comando Numérico Computacional) se tornou também possível a fabricação de protótipos físicos, por remoção de material, de maneira rápida, precisa e com boa repetibilidade.

Com o advento da usinagem de alta velocidade, associado ao desenvolvimento de fresadoras CNC de cinco eixos e à utilização de modernos sistemas CAD/CAM para a programação das trajetórias de usinagem, a fabricação de protótipos, por usinagem, tem se mostrado ainda mais significativa. Porém, é limitada pelo fato de só permitir remover o material que pode ser alcançado com a aresta cortante da ferramenta; no caso de peças plásticas, ainda as propriedades diferem das obtidas pela injeção (orientação do fluxo durante a injeção).

A prototipagem rápida, na forma de fabricação de objetos camada a camada, surgiu entre o fim da década de 80 e início da década de 90, como uma ferramenta capaz de proporcionar a integração dos profissionais envolvidos no processo de desenvolvimento de produto²⁰.

A prototipagem rápida pode ser utilizada durante vários estágios do desenvolvimento do ciclo de desenvolvimento do produto, incluindo²⁴:

- protótipos básicos para visualização, utilizando processos como *3D Printing* e o *Wax Jetting*;
- modelos padrão para fabricação de peças através de processos como o *vacuum casting* e a fundição por cera perdida
- ferramentas para fabricação de pequenos lotes de peças utilizando processos como o *SL (stereolithography)* e o *SLS (selective laser sintering)*

A fabricação de protótipos camada a camada tem início no desenvolvimento de um modelo sólido em CAD. Este modelo é então “fatiado” em camadas que serão adicionadas sucessivamente para a obtenção da peça, através de vários processos diferentes que foram desenvolvidos e patenteados pelas diferentes empresas que realizam pesquisas nesta área esta seqüência pode ser ilustrada pela Figura 10.

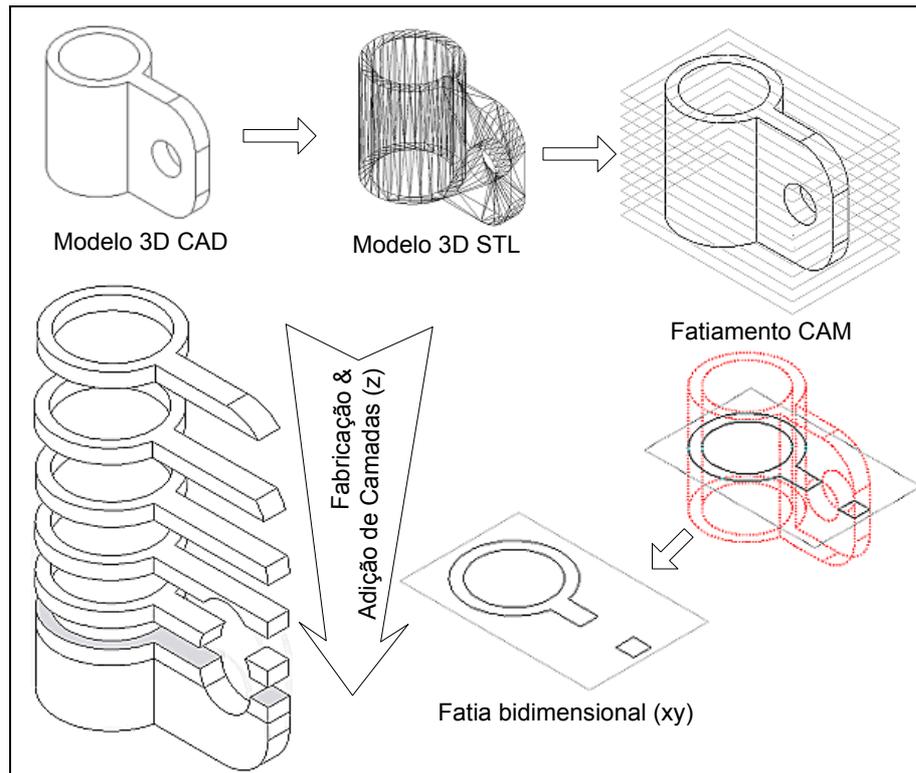


Figura 10 - Ciclo genérico nos processos por adição de camadas.²⁵

Para cada processo existe uma concepção construtiva diferente para a máquina de prototipagem, mas, segundo Volpato²⁶, pode-se classificar os inúmeros sistemas de RP a partir da forma inicial do material utilizado. Assim tem-se:

- Baseado em líquido –*Stereolithography Apparatus (SLA)*, *Solid Ground Curing (SGC)*, *Stereos Systems (EOS)*, *Solid Object Ultraviolet laser plotter (SOUP)*, entre outros.
- Baseado em sólido –*Laminated Object Manufacturing (LOM)*, *Fused Deposition Modelling (FDM)* entre outros.
- Baseado em pó –*Selective Laser Sintering (SLS)*, *3 Dimensional Printing (3DP)*, *Stereos Systems (EOS)*, *Direct Shell Production Casting (DSPC)*, entre outros.

Na bibliografia em geral todos estes processos são descritos de forma bastante detalhada, como é o caso dos trabalhos de Ferreira²⁷ e Lafratta^{Erro! Indicador não definido.}.

O processo de Estereolitografia (SLA) merece destaque por ter sido um dos primeiros processos desenvolvidos e por estar hoje disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. É baseado na polimerização de

resinas fotocuráveis através de laser ultravioleta. Um exemplo deste processo pode ser ilustrado pela Figura 11.



Figura 11 - Exemplo de protótipo fabricado por estereolitografia²⁸

A partir de um modelador CAD tridimensional a peça é modelada e este sólido “computacional” é armazenado no formato STL (*Surface Tessellation*). Em um programa específico para a máquina de estereolitografia este modelo é fatiado em finas camadas de espessura com valores entre 0,065 e 0,75 milímetros. É gerado um programa NC que definirá a trajetória do laser para a formação de cada camada do molde.

Na máquina de estereolitografia o processo se inicia pela imersão da plataforma móvel no reservatório que contém a resina fotocurável, a uma profundidade igual à da camada que será imediatamente construída.

O laser ultravioleta “varre” a área que deve ser solidificada nesta camada, fazendo assim com que a resina, através da polimerização, adquira consistência.

Terminada a varredura de uma camada, a plataforma submerge novamente do valor da espessura da camada a ser construída a seguir, e o laser inicia novamente; e assim, camada a camada, o molde vai sendo construído. Este processo está ilustrado na Figura 12.

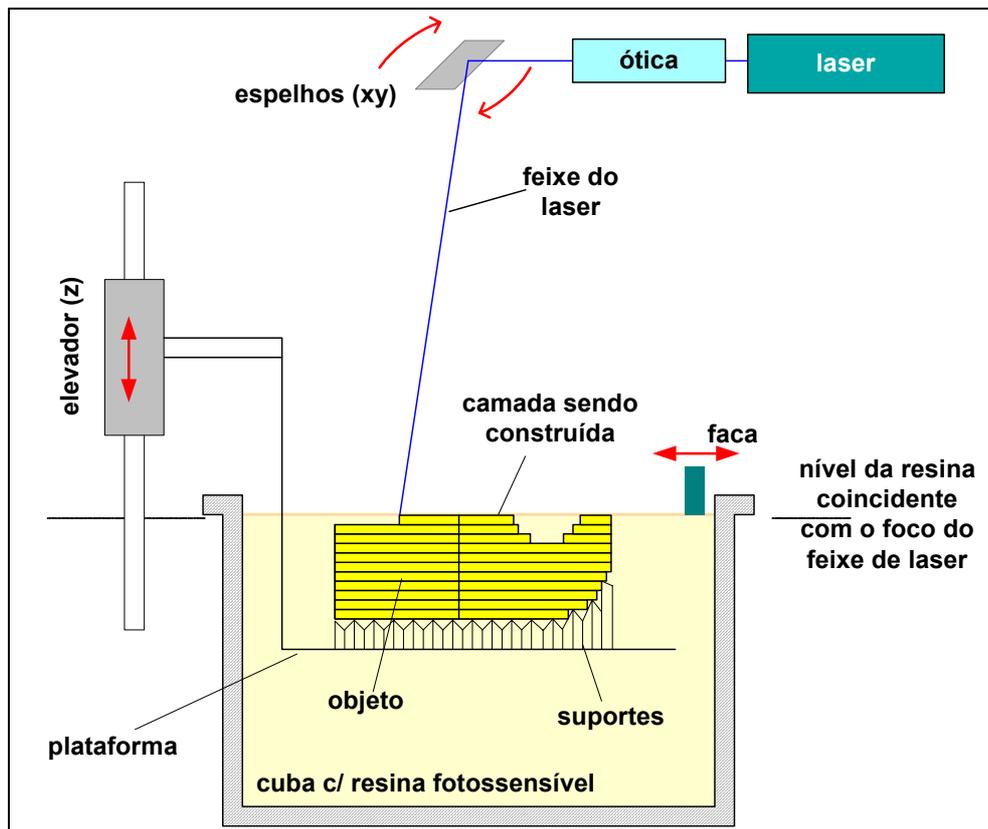


Figura 12 - Princípio da estereolitografia²⁵

Quando todas as camadas da peça já estão prontas, a plataforma emerge e, após a resina líquida ter escorrido, a peça é geralmente colocada em uma estufa com luz ultravioleta para o processo final de cura da resina. Por fim, a peça recebe um acabamento superficial como polimento, jateamento com areia, etc., o que determinará sua característica superficial.

Se comparados, o uso da tecnologia de fabricação camada a camada com o do fresamento CNC, que é considerado o *benchmark* na fabricação de protótipos, pode-se indicar os seguintes aspectos positivos:

- podem ser fabricadas peças com um grau de complexidade muito grande, inclusive com reentrâncias que não podem ser obtidas por remoção de material;
- a peça é fabricada em uma única etapa de processo, não sendo assim sujeita a erros de posicionamento ou necessidade de fabricação de dispositivos de fixação especiais;
- não há necessidade de geração de complexos programas de usinagem ou troca de ferramentas para a fabricação dos detalhes da peça.

O trabalho de Silva²⁹ retrata muito bem o aspecto relacionado com a fabricação de insertos pela usinagem de cavidades empregando CNC, e apresenta em seu estudo de caso a aplicação em aço de cavidades para fabricação de peças injetadas via técnica do núcleo perdido (cavidades para fundição dos núcleos metálicos e para injeção das peças plásticas).

Como restrições da fabricação em camada pode-se citar:

- o custo da fabricação de protótipos ainda é elevado, se comparado com os métodos tradicionais, como a usinagem, o que limita a possibilidade da fabricação de lotes de peças para testes;
- em muitos casos não é possível construir a peça no material para o qual foi projetada ou em um material que se assemelhe, fazendo com que tenha-se propriedades mecânicas diferentes, limitando a aplicação;
- a precisão dimensional e de forma, assim como o acabamento superficial, mesmo tendo evoluído muito, ainda deixam a desejar, principalmente se comparadas com o que pode ser obtido na fabricação de protótipos com o fresamento em cinco eixos;
- normalmente são necessárias operações de acabamento e pós-processamento das peças, como a retirada de elementos necessários à sustentação de superfícies da peça, cura em forno, etc..
- muitos dos materiais utilizados estão sujeitos à distorção, empenamentos e ataque por elementos químicos, como a água, o que faz com que seu uso para testes em condições reais seja bastante limitado.

2.3 Processos de ferramentaria rápida

Com a evolução dos diversos métodos para a obtenção de protótipos através da fabricação camada a camada, foram desenvolvidas técnicas para, dependendo da tecnologia utilizada para fabricação do protótipo, fabricar moldes³⁰ ou insertos de moldes, ao invés de peças ou componentes, para que estas peças possam ser injetadas em condições “muito parecidas” com as que seriam utilizadas em uma ferramenta convencional definitiva. Pode-se, assim, obter uma peça com características mais próximas às do produto, ao invés de um protótipo “aproximado”, em função das características do processo de injeção (orientação do fluxo na cavidade, resfriamento, empenamento, etc.).

A habilidade de construir peças protótipos funcionais no seu material final em um curto espaço de tempo usando moldagem por injeção, é extremamente valiosa.³¹

Esta evolução da RP foi chamada inicialmente de “*Rapid Tooling*” (RT), ou ferramentaria rápida. Nos dias de hoje tem sido utilizada também a expressão “*Rapid Manufacturing*” (manufatura rápida) para definir a idéia de se fabricar peças injetadas diretamente a partir do modelo computacional, utilizada grandemente no desenvolvimento de motores para a indústria automotiva³².

Este desenvolvimento técnico permitiu solucionar dois problemas básicos da RP, quais sejam: o custo para a fabricação de múltiplos protótipos e a fabricação em material com características mais próximas das do material real.

A demanda por soluções mais rápidas e baratas para a fabricação de ferramentas resulta num impressionante número de diferentes métodos sendo desenvolvidos mundialmente. Muitas companhias estão pesquisando o desenvolvimento e a comercialização destes métodos em função do seu potencial de mercado. Cada um dos processos desenvolvidos é dotado de um conjunto de vantagens acompanhado por um grupo de desvantagens. Sendo assim, tem-se tipicamente soluções que são desenvolvidas e se aplicam apenas para nichos específicos de mercado.

Em face do grande número de processos disponíveis e das diversas aplicações que são desenvolvidas, alguns autores propõem classificações para os processos de RT disponíveis no mercado. Estas classificações podem ser em função do número de peças produzidas ou da forma como as ferramentas são produzidas.

De acordo com Aronson³³, a literatura tem buscado classificar a RT em três classes: a dedicada à fabricação de uma dezena de peças, *soft tooling*; a dedicada à fabricação de uma centena de peças, *bridge toolin*; e a dedicada à fabricação de milhares de peças, *hard tooling*. Para cada uma destas classes há várias tecnologias já desenvolvidas e patenteadas, normalmente pelos fabricantes das máquinas de RP que são utilizadas na obtenção das ferramentas.

Segundo a *Wohlers Associates*³⁴ existem duas grandes categorias de ferramentaria rápida (*Rapid Tooling*). Uma, que envolve uma abordagem **indireta**, utiliza como modelo para a fabricação um protótipo obtido pela fabricação em camadas; e uma outra categoria, que utiliza uma abordagem **direta**, em que a máquina de fabricação por camadas constrói diretamente as cavidades dos moldes.

A Tabela 2 apresenta alguns dos **métodos indiretos** disponíveis atualmente no mercado. Em todos eles tem-se grandes variações em termos de custos, tempos de processamento e capacidade técnica (*capability*) de processamento. A precisão destes processos depende diretamente da precisão do processo de prototipagem rápida (da máquina e seus parâmetros) utilizado para a criação da peça modelo. Outro aspecto preocupante quando da aplicação destes métodos é o tempo que será necessário para dar acabamento nesta peça modelo, bem como as incertezas que são inseridas nas dimensões da mesma em função do processamento, normalmente manual.

Métodos Indiretos de Ferramentaria Rápida

RTV (room temperature vulcanizing) – Silicone Rubber Molds
Vacuum Casting
RIM (reaction injection moulding)
Wax Injection Molding
Spin-Casting
Cast Resin Tooling
Spray metal Tooling
Spreayed Steel
Rapid Solidification Process
Plaster Molds
Electroforming
Cast Aluminium and Zinc Kirksite Tooling
Investment Casting
3D Keltool

Tabela 2 - Métodos indiretos de ferramentaria rápida

Como tentativa para minimizar o tempo e melhorar a precisão obtida nas peças injetadas em ferramentaria rápida, diversos **métodos diretos** têm sido desenvolvidos pelos fabricantes de máquinas de fabricação por camadas. Alguns deles são apresentados na Tabela 3, abaixo. O uso direto das propriedades da fabricação em camadas permite a inclusão, na fabricação destes moldes ou cavidades, de características impossíveis de obter por processos convencionais, como é o caso dos canais de refrigeração incorporados (*conformal cooling*), que permitem a confecção de canais que não poderiam ser furados ou fresados, retirando calor das zonas onde tem-se concentração de calor.

Métodos Diretos de Ferramentaria Rápida

Direct AIM (accurate clear epoxy solid injection molding) tooling
SLS (selective laser sintering) RapidSteel
Copper Polyamide Tooling
Direct Metal Laser Sintering
Laminated Tooling
LENS (laser engineering net shaping)
CMB (Controlled Metal Build-up)
Prometal

Tabela 3 - Métodos diretos de ferramentaria rápida

2.4 Processos de ferramentaria rápida com estereolitografia

A estereolitografia tem se prestado, com grande versatilidade, não somente à fabricação rápida de protótipos, mas também à fabricação de moldes ou insertos de moldes a serem utilizados para a obtenção de componentes através da moldagem por injeção de termoplásticos, entre outros materiais.

Esta utilização pode se dar na forma direta, em que a cavidade é construída diretamente na máquina SL, ou na forma indireta, em que a máquina constrói um modelo que servirá para a obtenção da cavidade.

No trabalho de Beal²⁵ tem-se uma descrição do processo de obtenção de cavidades e injeção, tanto de termoplásticos quanto de pós metálicos, em insertos construídos diretamente por estereolitografia. A Tabela 4, reproduzida deste trabalho, sintetiza os diversos métodos para a obtenção de insertos para moldagem por injeção com o auxílio da estereolitografia.

A tolerância das peças produzidas na moldagem por injeção, em moldes fabricados pelo processo de estereolitografia, corresponde às tolerâncias da máquina de estereolitografia utilizada na fabricação das cavidades¹⁶.

Duas das técnicas de ferramentaria rápida baseadas em estereolitografia, mais consagradas na bibliografia, o “Direct Aim®” e o “Quick Cast®” foram estudadas em trabalhos de mestrado no Laboratório CIMJECT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, em vista da disponibilidade da máquina de SLA, adquirida com recursos do PRONEX, e serão descritas brevemente a seguir.

Nome	Descrição	Características
Insertos SL ou <i>Direct AIM</i> ^{TM i} (direto)	Obtenção direta da ferramenta em estereolitografia. O inserto pode ser submetido a operações secundárias, como: recobrimento, lixamento, polimento, etc.	Até 500 peças no material final. A fabricação do molde é realizada no período de 2 a 5 dias.
3D Keltool Direto (indireto)	Obtenção do molde SL, fabricação de um contramolde de silicone e fabricação do molde sinterizado.	Possibilidade de alcançar mais de 1.000.000 ⁱⁱ de peças moldadas.
3D Keltool Reverso (indireto)	Fabricação de um modelo em SL, fabricação de um molde em silicone, mais um contramolde em silicone e fabricação do molde sinterizado.	O molde é fabricado em 8 dias.
Vacuum Casting / Room Casting (indireto)	Obtenção de um modelo SL e fabricação de um molde de silicone (em vácuo ou não). As peças são moldadas por gravidade, com auxílio ou não de vácuo. Podem ser moldadas em máquinas injetoras também.	Obtenção de 20 a 40 peças em resinas poliuretanas ou termoplástico, se injetado. Pode ser fabricado em 1 ou 2 dias.
Moldes Indiretos (indireto)	Modelo da peça feita em SL é utilizado para gerar moldes em: epoxilato, ligas metálicas aspergidas, sedimentação, etc.	Tempo de fabricação e número de peças varia muito entre cada processo.
Insertos Fundidos (indireto)	O inserto é construído no estilo Quickcast TM (peça SL para microfusão) e segue o processo como a fundição por cera perdida. ⁴⁰	Apesar de algumas dificuldades técnicas o molde possui vida longa. Depende de operações de acabamento para proporcionar moldados de qualidade.
Moldes Eletroerodidos (indireto)	Modelos dos eletrodos são fabricados em SL e recobertos com material condutor (ex: cobre). Também são construídos eletrodos de liga de tungstênio pela técnica do 3D Keltool.	Eletrodos podem ser facilmente obtidos em 2 ou 4 dias, mas a fabricação do molde pode ser um pouco mais demorada pois são necessários mais de um eletrodo para a fabricação de cada inserto.

Tabela 4 - Métodos para obtenção de insertos para moldagem por injeção com o auxílio da estereolitografia

ⁱ O termo não é mais utilizado devido à variedade de resinas, máquinas e processos atuais que não condizem com *Direct AIM: Direct ACES (Accurate Cristal Epoxi Solid) Injection Molding*.

ⁱⁱ Dados obtidos em: <http://www.3dsystems.com> (26/04/2001).

- “Direct Aim®”

O *Direct Aim* (*Direct-Aim – ACES - accurate clear epoxy structures - Injection Molding*³¹), apresentado no trabalho de mestrado de Gomide³⁵, é um método direto de *soft tooling* que permite obter de maneira direta um molde ou cavidade para injeção de alguns termoplásticos (ou fundição de substâncias de baixo ponto de fusão) a partir de uma resina no estado líquido.

Mesmo quando a geometria é complexa o método de ferramentaria rápida Direct AIM, é capaz de manter tolerâncias dimensionais nas direções X e Y de +/- 0,46 mm e em Z de +/- 0,51 mm, em detalhes pequenos.³⁶

Através da estereolitografia são produzidos diretamente insertos da cavidade e do macho. Como a temperatura máxima de transição vítrea da resina é de 75°C e os materiais termoplásticos são injetados em temperaturas de até 300°C, diversas limitações são impostas ao uso desta técnica.

Os fatores chave que influenciam o número de peças que um molde pode produzir antes de falhar são as condições de processamento do material injetado e a geometria dos detalhes do molde¹⁶. Estes fatores, que determinam a vida do molde, ainda não são compreendidos totalmente³⁷.

Existem diversos fatores que limitam a eficiência do processo de Ferramentaria Rápida baseada em Estereolitografia, dentre eles as limitadas propriedades de moldagem por injeção devidas à baixa condutividade térmica da resina³⁷.

Por ter a resina uma condutividade térmica significativamente menor³⁰ que a dos aços empregados na fabricação de cavidades de moldes (para a resina Somos[®] 7100 tem-se aproximadamente 0,18 W/mK, como apresentado na folha de informações do produto¹⁸), é necessário utilizar ciclos de injeção muito superiores aos normalmente utilizados. Pode-se observar o valor desta propriedade para outros materiais na Tabela 5.

<i>Substância</i>	<i>Condutividade Térmica [W/m^oC]</i>	
Metais (a 25°C)		
	Alumínio	238
	Chumbo	34,7
	Cobre	397
	Ferro	79,5
	Ouro	314
	Prata	427
Gases (a 20°C)		
	Ar	0,0234
	Hélio	0,138
	Hidrogênio	0,172
	Nitrogênio	0,0234
	Oxigênio	0,0238
Materiais não Metálicos (valores aproximados)		
	Água	0,6
	Asbesto	0,08
	Borracha	0,2
	Concreto	0,8
	Gelo	2
	Madeira	0,08
	Vidro	0,8

Tabela 5- Condutividade térmica de vários materiais³⁸

Para auxiliar na troca de calor, na parte interna dos insertos, são colocados tubos de cobre para a passagem de líquido refrigerante e o espaço vazio é preenchido com um material que possui boa condutividade térmica e resistência mecânica. Exemplos de materiais que podem ser utilizados são vistos na Tabela 6, abaixo. O preenchimento metálico da parte de trás dos insertos minimiza o tempo para construir a cavidade e reduz o custo¹⁷.

<i>Produto – Metspec</i>	<i>117</i>	<i>136</i>	<i>158</i>	<i>158/190</i>	<i>255</i>	<i>281</i>	
Temperatura de fusão [°C]	47,5	58	70	70-88	124	138,5	
Densidade [g/cm ³]	9,36	9,23	9,67	9,98	10,73	8,58	
Calor Específico [cal/g.°C]	Sólido	0,039	0,040	0,035	0,036	0,030	0,040
	Líquido	0,047	0,048	0,044	0,043	0,037	0,048
Calor Específico de Fusão [cal/g]	8,8	6,9	9,5	8,2	5,0	10,7	
Condutividade Térmica [cal/s.cm.°C]	0,035	0,024	0,043	0,041	0,022	0,044	
Composição [%]	Bismuto	44,7	49,0	50	42,5	55,5	58,0
	Chumbo	22,6	18,0	26,7	37,7	44,5	
	Estanho	8,3	12,0	13,3	11,3		42,0
	Cádmio	5,3		10	8,5		
	Índio	19,1	21,0				

Tabela 6 - Ligas de baixo ponto de fusão utilizadas para preencher moldes construídos em forma de casca³⁹

Após o preenchimento da parte interna do inserto, este deverá ser montado em um molde para a injeção das peças, como é visto na Figura 13.



Figura 13 - Insertos fabricados por "Direct Aim®" em um porta moldes

- "Quick Cast®"

A técnica do *Quick Cast®*, apresentada no trabalho de Grellmann⁴⁰, é um método indireto de *hard tooling* onde, a partir do modelo em CAD, é fabricado por estereolitografia (resina líquida) um protótipo "oco" do inserto, que será utilizado para a fundição, pelo método da cera perdida, para produzir os insertos para moldagem por injeção.

Este protótipo "oco" tem um padrão de construção próprio, desenvolvido pela 3D Systems, e que recebe o nome de padrão "QuickCast", apresentando como característica interna a forma de alvéolos hexagonais (como uma colméia de abelhas). Isto faz com que, com uma pequena quantidade de resina fotocurada, se ocupe todo o volume do inserto.

Após sair da máquina de estereolitografia, os modelos "ocos" são devidamente drenados, para que toda a resina líquida que possa se encontrar no seu interior saia. Estes são então fotocurados e/ou termocurados, para que então se proceda à verificação de eventuais

vazamentos, que implicariam em penetração da cobertura cerâmica na etapa seguinte. Os orifícios de esgotamento de resina e eventuais “furos” são cobertos com cera ou resina para formar um objeto completamente estanque.

Este modelo é então montado em uma árvore de cera, que fará o papel de canal de alimentação e massalote. Em seguida, esta árvore, com o modelo, é recoberta por várias camadas cerâmicas para produzir uma casca. A aplicação das diversas camadas de cerâmica líquida é intercalada com a pulverização de particulado sólido de elementos (grãos) refratários.

Após a casca ter secado é colocada em um forno aquecido a altas temperaturas, no qual a cera e o modelo são queimados completamente. No período de permanência no forno se dá a cura da casca, não sobrando resíduos (cinzas) no interior da mesma.

A casca obtida é preenchida, em processo convencional de fundição, por metal líquido que, ao se solidificar, toma a forma do inserto desejado. Após o resfriamento, a casca é quebrada, normalmente em moinhos, e os insertos são separados da árvore/massalote.

Neste processo é necessário realizar uma etapa de acabamento, que consiste no ajuste e polimento do inserto, necessitando, muitas vezes, de operações com máquinas operatrizes para retirada de material em excesso e correção de empenamentos. As peças, ao final do processo, devem passar por um controle dimensional para verificar se ocorreram distorções ou deformações durante o processo.

Pronto o inserto, este é montado em um molde para a injeção de peças, como em um molde convencional. Uma representação do processo é vista na Figura 14, nesta figura as etapas sucessivas estão enumeradas seqüencialmente na ordem em que foram descritas no texto.

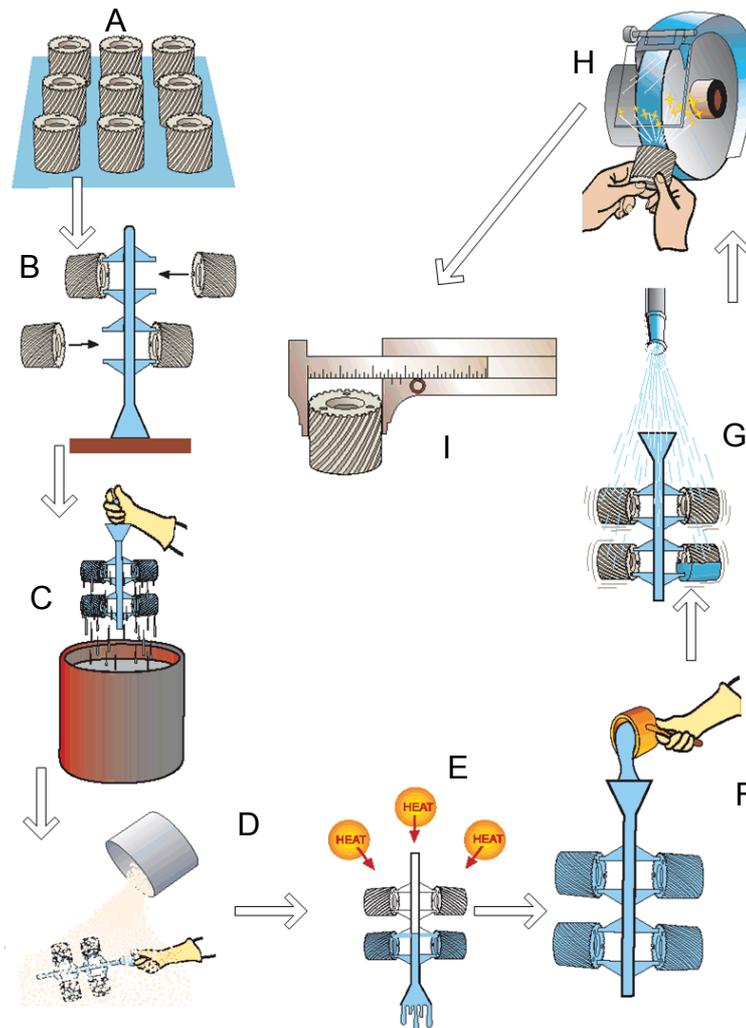


Figura 14 - Princípio do "Quick Cast®"

De acordo com o fabricante que desenvolveu este método a 3D Systems⁴¹, as tolerâncias dimensionais típicas de fundições pelo método da cera perdida podem ser obtidas utilizando os padrões QuickCast. Melhores tolerâncias poderão ser obtidas, mas necessitarão de mais operações de processamento e implicarão em maiores custos. A Tabela 7, adaptada da mesma fonte, mostra as faixas de tolerância linear para o método de fundição por cera perdida.

<i>DIMENSÃO</i>		<i>TOLERÂNCIA</i>	
Até 25,4 mm	(até 1 in)	±0,25 mm	±0,010 in
Até 50,8 mm	(até 2 in)	±0,33 mm	±0,013 in
Até 76,2 mm	(até 3 in)	±0,41 mm	±0,016 in
Até 102 mm	(até 4 in)	±0,48mm	±0,019 in
Até 127 mm	(até 5 in)	±0,56 mm	±0,022 in
Até 152 mm	(até 6 in)	±0,64 mm	±0,025 in
Até 178 mm	(até 7 in)	±0,71 mm	±0,028 in
Até 203 mm	(até 8 in)	±0,79 mm	±0,031in
Até 229 mm	(até 9 in)	±0,86 mm	±0,034 in
Até 254 mm	(até 10 in)	±0,94 mm	±0,037 in
Maior que 254 mm	(maior que 10 in)	±0,13 mm/25,4 mm	±0,005 in /1in

Tabela 7 - Tolerâncias lineares típicas para fundição por cera perdida

2.5 A técnica do núcleo perdido

Muitas peças não podem ser moldadas por injeção em moldes convencionais. Isso se aplica principalmente para peças com rebaixos complicados ou corpos finos tridimensionais, como coletores de ar para motores de combustão interna. Nestes casos o uso de moldes em que o macho simplesmente sai do interior da peça não é possível⁴².



Figura 15 - Coletor de admissão fabricado pela técnica do núcleo perdido⁴³

O processo do núcleo perdido, que é conhecido por *lost-core*, *fusible core*⁴⁴ ou ainda *metal core technology* é uma técnica de moldagem por injeção especial utilizada na produção de peças ocas de paredes finas (*hollow*), como a mostrada na Figura 15.

Este método consiste do posicionamento de um núcleo metálico, obtido por fundição, no interior de um molde de injeção, e encapsulação deste núcleo com plástico, usando um processo normal de injeção.

Após a remoção da liga, através de um processo de fusão, obtém-se uma fina capa plástica, como produto final²¹. Operações secundárias, como a colocação de insertos, soldagem por ultra-som ou vibração, podem ainda ser realizadas na peça. Recuperada, a liga metálica líquida do processo de fusão da extração do núcleo é bombeada (injetada) na ferramenta de moldagem do núcleo (essencialmente uma operação de fundição) para fabricar um novo núcleo metálico.

Este processo produtivo é utilizado quase que exclusivamente na fabricação de coletores de admissão de ar injetados em termoplásticos. O alto capital investido em uma planta totalmente automatizada para o processo do núcleo perdido, na fabricação de coletores de admissão, é estimada na faixa de 5 a 10 milhões de dólares, dependendo basicamente da complexidade da peça.

Requisitos de alto volume de produção podem justificar o gasto deste capital elevado. Devido à alta integração do sistema e ao uso extensivo de automatização, é difícil fabricar múltiplas partes em uma dada célula, pois isto implica em grandes tempos de preparação das máquinas e recursos, mas nada impede que seja feito.

Os núcleos são formados por processo muito similar ao da fundição por injeção, em uma máquina utilizando moldes de aço. O metal é normalmente uma liga metálica de estanho e bismuto, tem um ponto de fusão de cerca de 140°C e apresenta alta densidade (similar à do chumbo) em relação a outros materiais, como pode-se observar na tabela adaptada de Gerges⁴⁵. Os núcleos, ou são fabricados como uma peça única, ou são feitos de múltiplos componentes, que são unidos automaticamente.

<i>Substância</i>	<i>Densidade [kg/m³]</i>
Alumínio	2700
Bronze	8500
Cobre	8900
Cortiça	250
Vidro (pirex)	2300
Granito	2700
Gelo	920
Chumbo	11300
Magnésio	1700
Plástico	1200
Borracha (dura)	1100
Estanho	7300
Madeira	650
Zinco	7100
<i>Aço 1020</i>	<i>7870</i>
<i>Resina para Estereolitografia</i>	<i>935</i>
<i>Polímero – PA</i>	<i>1140</i>
<i>Polímero – ABS</i>	<i>1050</i>
<i>Polímero – PEAD</i>	<i>950</i>
<i>Cera para Microfusão</i>	<i>1450</i>

Tabela 8 - Densidade de diversos materiais sólidos (adaptada de Gerges⁴⁵)

Como os núcleos, no caso de coletores de admissão, são muito pesados (chegam a pesar até 80 quilogramas) e estão quentes, pois acabaram de sair do molde de fundição, devem ser manipulados por robôs⁴⁶. O ciclo total para produzir um núcleo leva tipicamente o dobro do tempo do processo de injeção da peça, sendo, portanto, necessárias duas ferramentas para produzir núcleos para cada molde de injeção.

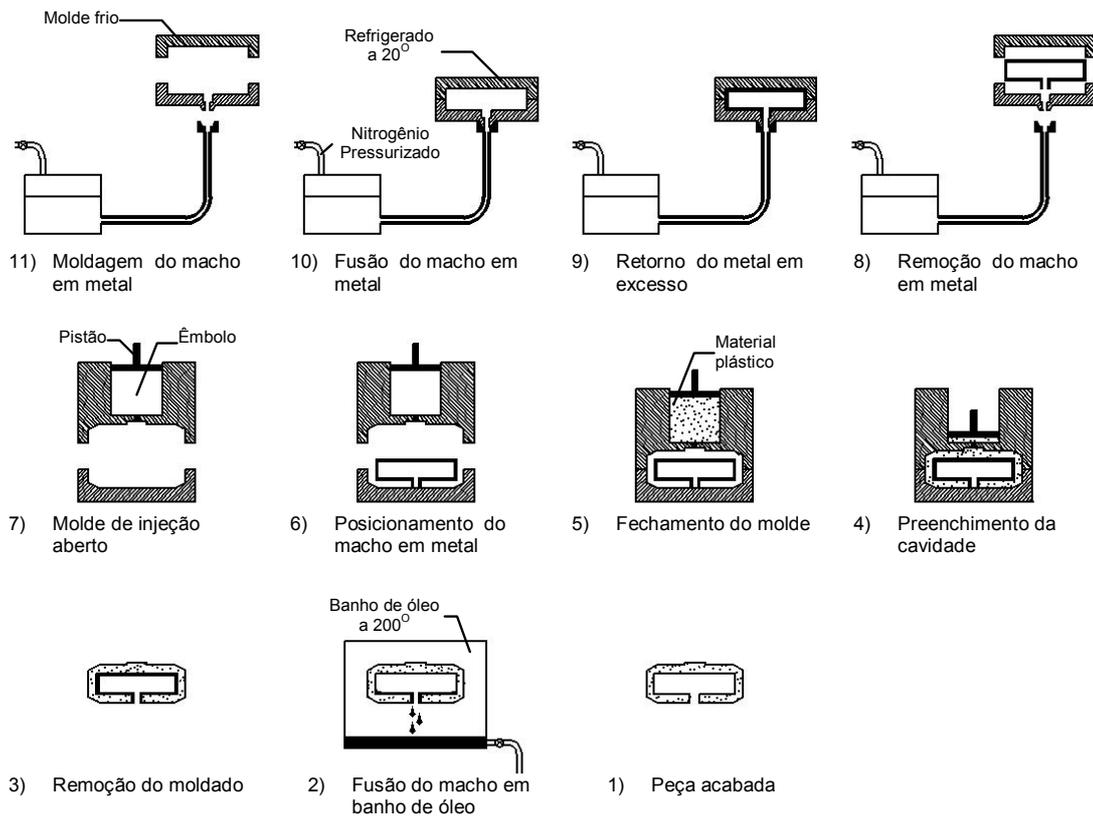


Figura 16 - Processo do núcleo perdido

Existe muito pouca ou nenhuma contração na liga, assim a temperatura do núcleo tem pouca ou nenhuma influência no processo, mas a possibilidade da existência de alguma rebarba pode requerer remoção manual em uma estação de inspeção.

Na moldagem por injeção, devido à relevância do tempo do ciclo utilizado para o carregamento do núcleo e retirada da peça, muitas máquinas injetoras utilizadas no processo do núcleo perdido, são verticais, utilizando moldes com duas metades inferiores em uma placa rotativa e uma única metade, fixa na placa móvel. As metades inferiores giram 180° em cada ciclo para permitir a remoção da peça e a colocação do núcleo.

O método de injeção vertical tem algumas vantagens. A gravidade auxilia no posicionamento do núcleo e há mais espaço para a movimentação dos braços dos robôs. Como desvantagens, tem-se que existem poucos fornecedores de máquinas injetoras capazes de fabricar grandes injetoras verticais com placa rotativa na faixa acima de 600 toneladas de força de fechamento. O custo das máquinas é significativamente maior se comparado com máquinas horizontais de mesma capacidade. Segundo Tom Baltus¹³, da DuPont Canadá, são necessárias duas máquinas horizontais para igualar a produtividade de uma única máquina vertical, produzindo com a metodologia do núcleo perdido.

Na fabricação de coletores de admissão de ar para motores de combustão interna utilizando o núcleo perdido, o material plástico escolhido é o náilon 66 reforçado com carga de fibra de vidro a uma taxa de 30 a 35%. Mesmo ignorando as características propícias que este material tem para a fabricação de coletores de admissão, suas características de processamento fazem com que seja o mais propício para a tecnologia do núcleo perdido.

A baixa viscosidade da resina permite o preenchimento de seções finas e compridas com pressão de injeção relativamente baixa, o que ajuda a prevenir, ou ao menos minimizar, problemas de movimentação do núcleo dentro da cavidade. Ainda tem-se a característica da rápida formação de uma camada de solidificação na frente de injeção (*freeze-off layer*) que cria um isolamento térmico durante o preenchimento, que evita que o núcleo se derreta ou seja “lavado” durante o preenchimento da cavidade (é importante lembrar que a temperatura de fusão do material do núcleo é de cerca de 140°C e a temperatura de injeção desta resina é da ordem de 285° a 320°C).

O posicionamento dos canais de injeção também é um fator de suma importância para evitar o impacto direto do material fundido (polímero) sobre o núcleo. A impactação direta na entrada do material fundido não é impossível, mas devem ser utilizadas taxas de preenchimento menores para que se tenha certeza de manter uma camada congelada aderida ao lado oposto do canal.

A localização e “centragem” do núcleo no molde também é crítica; sendo assim, para minimizar a movimentação do núcleo, é necessário que ocorra um “empacotamento” do núcleo pela frente de injeção. Idealmente, a pressão no fundido é distribuída uniformemente em todas as superfícies do núcleo, sendo assim ele vai estar centrado na ferramenta.

Por fim, a peça é retirada do molde e colocada em um tanque para a retirada do núcleo. Neste tanque tem-se um banho aquecido a aproximadamente 175°C de propileno glicol (glicerina líquida) ou algum líquido similar por cerca de uma hora. Durante este tempo no tanque, a peça é movimentada, girada e recebe jatos direcionados do líquido aquecido, para que todo o material do núcleo seja retirado. A liga líquida do núcleo se deposita no fundo do tanque e é bombeada novamente para a fabricação dos núcleos.

Como última etapa do processo a peça é lavada para retirada do glicol e passa por uma inspeção para verificar se alguma porção do núcleo ainda está aderida à peça⁴⁷.

A bibliografia disponível não apresenta outras aplicações para esta técnica nem faz referência a um modelamento matemático que apresente a relação entre a temperatura de fusão da liga metálica empregada e a temperatura de injeção do polímero utilizado (nem suas relações geométricas).

2.6 Discussão

Para se trabalhar em ferramentaria rápida é fundamental desenvolver, de forma adequada, a compreensão de todo o processo de moldagem por injeção. Este processo, para análise, pode ser visualizado na forma de três agentes principais: o molde, a máquina e o sistema de climatização do molde (aquecimento, resfriamento ou nulo).

Quando se comenta a respeito da injeção de peças plásticas em moldes obtidos diretamente por ferramentaria rápida, estamos na maioria das vezes buscando a fabricação de peças protótipo. Deseja-se que estas tenham características de fabricação (parâmetros de injeção) próximas das que seriam utilizadas em moldes definitivos. Porém, a diferença nos parâmetros ainda é grande, principalmente em função da condutividade térmica das resinas e de sua resistência mecânica. Sendo assim, em diversos aspectos, as peças produzidas possuem propriedades mecânicas e dimensionais bastante distintas das que teríamos em um molde convencional, mas esta diferença normalmente é aceitável, já que o mais importante é “preencher a cavidade” obtendo uma peça íntegra, e não tanto a preocupação com propriedades mecânicas, empenamento, compactação, etc..

Caso estejamos lidando com a fabricação de um produto único (*one of a kind*), ou uma produção em pequena escala (lotes de até 100 peças), não poderemos comparar as características do processo de moldagem por injeção com “o que seria” em uma ferramenta definitiva, pois a que é produzida através da ferramentaria rápida é a definitiva para este produto, e assim os parâmetros utilizados são, em tese, os mais adequados para aquele molde, para a obtenção da peça naquele material, naquela máquina.

Ao lidar com o custo, teremos de avaliar se a utilização de parâmetros de injeção com valores reduzidos de temperatura e pressão, são realmente efetivos no aumento da vida do molde, e se isto é o desejado, ou, se utilizarmos parâmetros de injeção usuais para que tenha-se uma peça com propriedades e dimensões mais “técnicas”, aceitaremos o risco de não conseguir produzir o número desejado de peças por uma falha no molde (necessidade da fabricação de mais um ou alguns moldes). Cada caso é um caso. Cada molde é um produto único.

Uma mesma máquina injetora pode trabalhar com diversos parâmetros de injeção (dentro de uma determinada faixa), e pode ser utilizada com uma grande gama de moldes diferentes.

A preparação para a injeção, quando da utilização de moldes obtidos por ferramentaria rápida requer ainda mais cuidados do que na utilização de moldes convencionais. A correta escolha da máquina e de suas faixas de operação, a sua precisão de fechamento e as opções de controle de ciclo, vai contribuir muito na vida do molde.

Na moldagem por injeção utilizando ferramental rápido, não dispomos de *try-outs* de moldes para ajustes e testes. É necessário adaptar o molde à máquina e os parâmetros de injeção, do material desejado, ao molde no menor número de injeções (*shots*) possível, já que cada peça perdida é, com certeza, uma peça a menos na vida daquele molde. Sendo assim, a análise CAE para determinação de volume de injeção, pressão necessária, temperatura do moldado, tempo de injeção, tempo de abertura, etc., são imprescindíveis para que se desperdice o menor número de injeções possível. É preciso acertar da primeira vez.

Como as máquinas utilizadas para a injeção, nestes casos, são geralmente as mesmas utilizadas para a produção seriada, alguns aspectos construtivos e de funcionamento acabam por provocar ainda mais diferenças no produto moldado.

Tome-se, por exemplo, a necessidade do tempo de resfriamento da cavidade para preservar a resistência dos moldes fabricados por estereolitografia. Após a injeção, a máquina já dosou o polímero que será utilizado na próxima peça. Este material já se encontra fundido, aguardando à frente da rosca da máquina para ser injetado. Como o ciclo de injeção é “parado” para o resfriamento da cavidade, este material se degrada. É necessário a cada ciclo esvaziar a rosca e proceder nova dosagem quando a cavidade já se encontrar pronta para a injeção.

Este procedimento, normalmente, é feito por comandos manuais, em tempos diferentes, o que faz com que cada peça seja produzida com o polímero em uma determinada condição. Quanto menor o intervalo de tempo entre os ciclos (menor o tempo necessário entre a injeção de uma peça e outra) melhores serão as características das peças (mais próximas das que se obtém na moldagem por injeção convencional). Ou seja, se for possível trabalhar com a máquina em ciclo automático, em moldes produzidos por ferramentaria rápida, não estaremos garantindo as melhores condições de processamento, mas teremos todas as peças produzidas nas mesmas condições.

Existem muitas pesquisas em desenvolvimento e inúmeras publicações tratando da análise dos mecanismos que levam os moldes à falha. Para os moldes produzidos por estereolitografia há indicativos de que a fragilização decorrente do aumento da temperatura da resina que compõe o molde é um fator relevante.

Outros estudos apresentam mecanismos que proporcionam o aumento da taxa de troca de calor entre o moldado e o sistema de climatização do molde (aquecimento, resfriamento ou nulo).

A opção de construir o inserto maciço implica em maiores custos e uma menor taxa de troca de calor, já que a condutividade térmica da resina é baixa. As soluções encontradas variam, mas pode-se citar:

- a) o preenchimento da parte traseira dos insertos (construídos na forma de cascas) com resina epóxi com carga de metal condutor de calor;
- b) o preenchimento com uma liga metálica de baixo ponto de fusão;
- c) a utilização de tubos de cobre para circulação de água embutidos em liga metálica ou resina epóxi com carga utilizados no preenchimento;
- d) a utilização de pontos de contato direto do moldado com o metal de preenchimento (com tubos de cobre embutidos) para aumentar a troca de calor em alguns pontos;
- e) e, por fim, a utilização de canais de circulação do fluido refrigerante, logo abaixo da superfície do inserto, construídos diretamente na casca de estereolitografia, os canais de refrigeração incorporados (*conformal cooling*).

Todos estes métodos procuram melhorar a interface entre o moldado e o sistema de climatização do molde, para aumentar a troca de calor, promovendo um resfriamento mais rápido do moldado e da cavidade, para reduzir a fragilização e reduzir o tempo entre as sucessivas injeções.

Estes fatores foram levados em consideração para a execução deste trabalho e nortearam os caminhos seguidos na busca de uma solução para o problema proposto.

A prototipagem rápida é uma tecnologia que chegou para ficar. Em termos de desenvolvimento de produto foi um grande avanço, por permitir a rápida visualização de elementos e a antecipação de problemas que viriam a ser detectados apenas em fases finais dos projetos.

Diversas soluções para o mesmo problema foram encontradas. Seja a partir de sólidos, líquidos ou de pós (quem sabe um dia teremos algum método a partir de gases), o objetivo é comum: ter em mãos um objeto que represente fielmente o que tínhamos em mente. Este objeto poderá ser utilizado para os mais diversos fins, entre eles, o de fabricar mais peças através de outros métodos diretos ou indiretos, sendo que um deles é a moldagem por injeção.

As classificações encontradas parecem confusas, mas buscam uma forma de organizar os diferentes processos em categorias com propriedades comuns (e que muitas vezes se enquadram em mais de uma), tudo isto para permitir uma melhor escolha, por parte dos usuários, das qualidades e conhecimento de restrições dos diversos métodos. Felizmente, ou infelizmente, de quando em quando surgem novos métodos de prototipagem rápida, alguns originais, que provocam mudanças na classificação, outras vezes, compostos, ou seja, que unem características de processos já existentes, de diferentes categorias.

Dizer que a prototipagem rápida chegou não implica em afirmar que ela vai tomar o lugar de um concorrente que, desde a década de 40 já nos serve para a fabricação de peças complexas com repetibilidade e precisão dimensionais invejáveis: o CNC.

A engenharia tem progredido muito nestas duas frentes. Os avanços na usinagem de alta velocidade *high speed milling* bem como na usinagem por 5 ou mais eixos, tem permitido que a fabricação por remoção de material continue forte na briga para a fabricação de protótipos, ou mesmo na utilização na ferramentaria rápida.

A ferramentaria rápida (*Rapid Tooling*) segue o mesmo caminho, tem evoluído muito e conta com uma classificação cada vez mais ampla para poder abranger todos os processos que são desenvolvidos e apresentados pelos fabricantes e centros de pesquisa da área.

Cada fabricante de máquina de prototipagem rápida se vê na obrigação de apresentar um método (ou vários) de ferramentaria rápida, para que a capacidade técnica (*capability*) das máquinas não seja depreciada. Acaba-se assim por ter mais métodos de ferramentaria rápida do que métodos de fabricação por camada.

Pode-se afirmar que alguns destes métodos se firmam no mercado, enquanto outros se apagam, servindo apenas como exemplo e fonte de idéias para outras pesquisas na mesma área.

Neste trabalho utilizamos um apanhado de diversas idéias de métodos diferentes para a solução de problemas, porém a base (em função da disponibilidade da máquina de estereolitografia) para a pesquisa foi uma derivação do *DirectAim* e do *QuickCast* da *3D Systems*. O mesmo caminho poderia ter sido seguido para a adaptação da técnica do núcleo perdido para outros processos igualmente solidificados no mercado.

A técnica do núcleo perdido é apresentada na bibliografia como uma solução singular para um problema único. A injeção de náilon 66 com 30% de fibra de vidro para a fabricação de coletores de admissão para motores de combustão interna, utilizando núcleos de liga de bismuto com ponto de fusão em torno de 140°C. São poucas as referências da utilização desta técnica em outras peças, ou com o emprego de outros materiais. Não se encontra informação precisa dos fenômenos envolvidos e não há contestação das afirmações de que esta combinação é a melhor encontrada. Não há referências de estudo científico para a análise da técnica. Sendo assim, este ramo de conhecimento dentro da moldagem por injeção pode ser considerado ainda pouco explorado e muito amplo para a pesquisa.

Com vistas à pesquisa bibliográfica realizada é possível concluir que muito pode ser desenvolvido na moldagem por injeção, sendo que sempre devem ser levados em conta aspectos do molde e do processo (máquina) para que se obtenha um melhor resultado (peça).

A prototipagem rápida e a ferramentaria rápida, (neste estudo mais profundamente a estereolitografia e as técnicas decorrentes desta) podem oferecer tanto a projetistas quanto a fabricantes um número sem igual de soluções de problemas de fabricação e projeto, porém é necessário estudar mais a fundo cada método, ao invés de fazer uma abordagem superficial de cada novidade que aparece no mercado. Pouco se sabe do muito que há.

Por fim, a técnica do núcleo perdido, que cada vez mais perde lugar à soldagem por ultra-som na fabricação de peças complexas, pode solucionar também um número bastante grande de problemas, porém quase nada há em termos de pesquisa sobre o seu desenvolvimento e aplicações, a não ser um achismo baseado em conclusões de um par polímero/núcleo utilizados para uma aplicação singular.

CAPÍTULO 3

SELEÇÃO DE MATERIAIS E ORIENTAÇÕES DE PROJETO

Neste capítulo são descritos processos físicos de troca de calor e mudança de fase envolvidas na injeção de termoplásticos; é desenvolvido modelo matemático descritivo do processo de injeção do termoplástico sobre núcleo metálico, que resulta em modelo aproximado para seleção de pares de materiais para que não ocorra a fusão do núcleo, durante o processo, em função de propriedades físicas e geométricas, sendo comentados fatores relevantes à seleção de metais e polímeros para a utilização em injeção com núcleo perdido.

3.1 Embasamento físico

3.1.1 Calor

A teoria moderna do calor começa a se formular no decênio de 1840, quando James Joule mostrou que o ganho ou a perda de uma certa quantidade de calor era acompanhada pelo desaparecimento ou aparecimento de quantidade equivalente de energia mecânica. O calor, portanto, não se conserva, mas é uma forma de energia, e é a energia a grandeza que se conserva.

Chama-se fluxo de calor ao processo de transferência de energia que ocorre exclusivamente em virtude da diferença de temperaturas⁴⁸. A transferência de energia também pode ocorrer sem fluxo de calor, através da realização de trabalho sobre o corpo ou material. Fenômenos compostos também podem ocorrer, quando tem-se o fluxo de energia resultante da diferença de temperatura associada à energia resultante do trabalho realizado.

Quando uma pequena quantidade de calor, dQ , é transferida entre um sistema e sua vizinhança, se o sistema sofrer uma mudança de temperatura, dT , a capacidade calorífica específica, ou calor específico, c , do sistema é definido como:

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

Ou seja, o calor dQ necessário para aumentar de dT a temperatura da massa m do material é dada por:

$$dQ = mcdT \quad (2)$$

Uma unidade de massa freqüentemente usada, por conveniência é o molécula-grama, ou mais precisamente o *mol*, que é definido como o número de gramas igual à massa

molecular (peso molecular). Para calcularmos o número de moles, n , divide-se a massa em gramas pelo peso molecular M , ($n=m/M$). Substituindo m na equação (1), tem-se:

$$Mc = \frac{dQ}{ndT} \quad (3)$$

Se definimos o produto Mc como capacidade calorífica molar, C , teremos:

$$dQ = nCdT \quad (4)$$

O calor específico de todos os materiais varia de alguma forma com a temperatura e com a pressão. Quando esta variação não puder ser desprezada, o calor necessário para uma variação de T_1 a T_2 é obtido pela integração da equação (2), com c expresso em função de T , o que resulta em:

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} cdT \quad (5)$$

Segundo Sears⁴⁸ medidas precisas de calor específico requerem muita habilidade experimental, em parte por causa da dificuldade de se evitar e compensar perdas de calor da amostra, transferidas para o ambiente.

A bibliografia em geral apresenta o valor de 4,186 [J/g°C] como o calor específico para a água. Se observarmos os valores expressos na Tabela 9, abaixo, observaremos que os calores específicos dos metais são menores que o da água e decrescem com a massa molecular. A última coluna desta tabela mostra uma regularidade interessante, notada pela primeira vez em 1819 por dois físicos franceses, Dulong e Petit⁴⁸. As capacidades caloríficas molares médias, a pressão constante, de todos os metais, exceto os mais leves, são aproximadamente as mesmas, iguais a cerca de 25 [J/mol°C], resultado este que é conhecido como a *Lei de Dulong e Petit*. Em outras palavras, o calor necessário para elevar a temperatura de uma amostra de metal depende apenas do número de moléculas contidas na amostra e não da massa de cada molécula.

<i>Metal</i>	<i>Específico [J/g°C]</i>	<i>Intervalo de Temperatura [°C]</i>	<i>M, [g/mol]</i>	<i>Molar, C=Mc [J/mol°C]</i>
Berílio	1,97	20-100	9,01	17,7
Alumínio	0,91	17-100	27,0	14,6
Ferro	0,47	18-100	55,9	26,3
Cobre	0,39	15-100	63,5	24,8
Prata	0,234	15-100	108	25,3
Mercúrio	0,138	0-100	201	27,7
Chumbo	0,130	20-100	207	26,9

Tabela 9 - Calores específicos e capacidades caloríficas molares médias de metais⁴⁸

3.1.2 Mudança de fase

Há situações em que o fluxo de calor entre dois corpos, ou entre uma substância e o meio, não provoca variação da temperatura. Isto ocorre sempre que uma característica física da substância se altera, de uma forma para outra, o que se denomina, comumente, de mudança de fase. Algumas mudanças de fase comuns são as de sólido para líquido (fusão), de líquido para gás (vaporização) e a mudança da estrutura cristalina de um sólido.

A quantidade de energia necessária para a mudança de fase de uma certa massa m de uma substância pura é dada por:

$$Q = mL \quad (6)$$

Na equação (6), L é o calor latente da substância e depende da natureza da mudança de fase, além das propriedades da substância. O calor de fusão, L_f , é o calor latente quando a mudança de fase se dá do sólido para o líquido; e o calor de vaporização L_v , é o calor correspondente à mudança de fase do líquido para o vapor. Por exemplo, o calor de fusão da água, sob pressão atmosférica, é de $3,33 \times 10^5$ [J/kg], enquanto que o calor latente de vaporização da água é de $2,26 \times 10^6$ [J/kg]³⁸. Os calores latentes de diversas substâncias, variam consideravelmente, como pode-se observar na Tabela 10, abaixo.

<i>Substância</i>	<i>Ponto de Fusão [°C]</i>	<i>Calor de fusão L_f [J/kg]</i>	<i>Ponto de Ebulição [°C]</i>	<i>Calor de Vaporização L_v [J/kg]</i>
Hélio	-269,65	$5,23 \times 10^3$	-268,93	$2,09 \times 10^4$
Nitrogênio	-209,97	$2,55 \times 10^4$	-195,81	$2,01 \times 10^5$
Oxigênio	-218,79	$1,38 \times 10^4$	-182,97	$2,13 \times 10^5$
Álcool etílico	-114	$1,04 \times 10^5$	78	$8,54 \times 10^5$
Água	0,00	$3,33 \times 10^5$	100,00	$2,26 \times 10^6$
Enxofre	119	$3,81 \times 10^4$	444,60	$3,26 \times 10^5$
Chumbo	327,3	$2,45 \times 10^4$	1750	$8,70 \times 10^5$
Alumínio	660	$3,97 \times 10^5$	2450	$1,14 \times 10^7$
Prata	960,80	$8,82 \times 10^4$	2193	$2,33 \times 10^6$
Ouro	1063,00	$6,44 \times 10^4$	2660	$1,58 \times 10^6$
Cobre	1083	$1,34 \times 10^5$	1187	$5,06 \times 10^6$

Tabela 10 - Calores latentes de fusão e vaporização³⁸

As mudanças de fase podem ser descritas em termos da reorganização das moléculas quando a substância recebe ou cede calor. Consideremos a mudança de fase de líquido para vapor. As moléculas, na fase líquida, estão muito próximas, e as forças entre elas são mais fortes do que num gás, em que as moléculas estão muito afastadas. Por isso, é necessário efetuar trabalho sobre o líquido contra estas forças atrativas moleculares, a fim de separar as

moléculas. Calor de vaporização é a quantidade de energia que deve ser injetada no líquido, a fim de conseguir tal efeito.

Analogamente, no ponto de fusão de um sólido, imaginamos que a amplitude de vibração dos átomos em torno da posição de equilíbrio seja suficientemente grande para superar as forças atrativas da ligação dos átomos nas respectivas posições fixas. A energia térmica necessária para a fusão total de certa massa do sólido é igual ao trabalho necessário para o rompimento das ligações e transformação da massa de fase sólida ordenada em massa de fase líquida desordenada.

3.1.3 Transferência de calor

A energia térmica é transferida de um para outro lugar por três processos: condução, convecção e radiação. Na condução, a energia térmica é transferida pelas interações dos átomos ou moléculas vizinhos, embora não haja transporte destes átomos ou moléculas. Na convecção, o calor é transferido pelo transporte direto de massa. Na radiação, a energia térmica é transportada através do espaço na forma de ondas eletromagnéticas que se deslocam com a velocidade da luz.

Em todos os mecanismos de transferência de calor, a velocidade de resfriamento de um corpo é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e as suas vizinhanças.

Em muitas circunstâncias, estão ativos os três processos de transferência de calor, embora um deles possa ser mais eficaz que os outros.

A condução de calor só se dá quando existe uma diferença de temperatura entre duas partes do meio condutor. Imaginemos uma placa de um determinado material tendo uma espessura Δx e uma área de seção reta A . Se as faces opostas desta placa estiverem com temperaturas diferentes T_1 e T_2 com ($T_2 > T_1$) é possível medir a quantidade de calor ΔQ que é transferida no intervalo de tempo Δt , da face quente para a face fria. A taxa de condução de calor, $\Delta Q / \Delta t$, conforme se observa, é proporcional à área de seção reta A , à diferença de temperatura ΔT e inversamente proporcional à espessura da placa Δx . Ou seja:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (7)$$

Por conveniência se utiliza o símbolo H para representar a taxa de transferência de calor $\Delta Q / \Delta t$, ou seja, definimos $H = \Delta Q / \Delta t$. No Sistema Internacional de Medidas, utilizamos H em watts quando ΔQ estiver em joules e Δt em segundos, já que $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Se tomarmos uma placa de espessura infinitesimal dx , com diferença de temperatura dT , pode-se escrever a lei da condução de calor da seguinte maneira:

$$H = -kA \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

Na equação (8) a constante de proporcionalidade k é a condutividade térmica do material. Na Tabela 5, apresentada no capítulo 2, pode-se observar o valor de k para diversos materiais. É possível constatar que, em geral, os metais são melhores condutores de calor que os não-metais (substâncias que são boas condutoras de calor têm condutividades térmicas elevadas, enquanto as substâncias que são bons isolantes térmicos apresentam baixos valores de condutividade térmica). Este equacionamento é válido para condições de regime permanente. É necessário considerar a resistência de contato entre dois corpos quando consideramos um caso real de transferência de calor. Com este equacionamento é possível determinar a distribuição da temperatura ao longo da placa, quando em regime permanente.

A convecção é o calor que é transmitido pelo movimento de certa massa de substância aquecida. Quando o movimento é provocado por diferenças de densidade, como no caso do ar sobre uma chama, se diz que a convecção é natural; quando a substância aquecida é forçada a se deslocar pela ação de um ventilador ou de uma bomba, se diz que a convecção é forçada.

O calor perdido ou ganho por uma seção a uma temperatura em contato com um fluido a outra temperatura depende de muitos fatores, como a forma e a orientação da superfície, as propriedades mecânicas e térmicas do fluido e a natureza do fluxo do líquido, se laminar ou turbulento.

O equacionamento matemático do calor que é transferido por convecção é mais complexo do que o que foi apresentado para a condução de calor, já que envolve outras condições do meio. A obra de Incropera e De Witt⁴⁹ apresenta diversos casos de transferência de calor por convecção e seu equacionamento matemático.

Uma simplificação que pode ser adotada para o cálculo da troca de calor por convecção é definir um coeficiente de convecção, h , por meio da equação abaixo:

$$H = hA\Delta T \quad (9)$$

Na equação (9) H é a corrente térmica de convecção (o calor ganho ou perdido por convecção, por uma superfície, na unidade de tempo), A é a área da superfície e ΔT , a diferença de temperatura entre a superfície e a massa do fluido. Os valores de h são determinados experimentalmente, e são dependentes do valor de ΔT . A Tabela 11, abaixo, reproduzida de Sears⁴⁸, apresenta alguns valores característicos de h .

<i>Peça</i>	<i>Coefficiente de Convecção h [cal/s.cm².°C]</i>
Chapa horizontal, voltada para cima	$0,595 \times 10^{-4} (\Delta T)^{1/4}$
Chapa horizontal, voltada para baixo	$0,314 \times 10^{-4} (\Delta T)^{1/4}$
Chapa vertical	$0,424 \times 10^{-4} (\Delta T)^{1/4}$
Tubo horizontal ou vertical (D=diâmetro)	$1,000 \times 10^{-4} (\Delta T / D)^{1/4}$

Tabela 11- Coeficientes de convecção natural no ar a pressão atmosférica

A terceira forma de transferência de calor é a radiação. Todos os corpos irradiam continuamente energia, na forma de ondas eletromagnéticas. O tipo de radiação associada à transferência de energia térmica, de um ponto para outro no espaço, é a radiação infravermelha.

A taxa de emissão de energia radiante por um corpo é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta. Esta é a lei de Stefan, que pode ser expressa pela equação³⁸

$$P = \sigma A e T^4 \quad (10)$$

Na equação (10), P é a potência irradiada pelo corpo, em watts, σ é uma constante igual a $5,6696 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴], A é a área superficial do corpo em metros quadrados, e é um parâmetro denominado emissividade, e T é a temperatura do corpo em kelvins. O valor da emissividade e pode variar entre zero e a unidade, dependendo das propriedades da superfície. Todos os corpos absorvem também energia através da radiação. Se esse processo de absorção não ocorresse, um corpo acabaria por irradiar toda a sua energia, e a sua temperatura atingiria o zero absoluto.

A energia absorvida por um corpo provém de suas adjacências, onde se encontram outros corpos, que irradiam energia. Se um corpo estiver na temperatura T e suas adjacências na temperatura T_0 , a energia líquida ganha ou perdida por ele, em cada segundo, em função da irradiação pode ser estimada por

$$P_{liq} = \sigma A e (T^4 - T_0^4) \quad (11)$$

Um corpo, estando em equilíbrio com sua vizinhança, irradia e absorve energia à mesma taxa, e, por isso a sua temperatura permanece constante. Um corpo mais quente que sua vizinhança, irradia mais energia do que absorve, e por isso se resfria. O absorvedor ideal se define como um corpo que absorve toda a energia que incida sobre ele. A emissividade de um absorvedor ideal é igual à unidade. Este corpo é chamado, muitas vezes de corpo negro.

A obra de Incropera e De Witt⁴⁹ apresenta diversos casos de transferência de calor por radiação e seu equacionamento matemático.

3.1.4 Transferência de calor e mudança de fase na moldagem por injeção

Para compreendermos os processos de troca de calor e mudança de fase na moldagem por injeção é necessário, novamente, para análise, separar os dois elementos principais: a máquina injetora e o molde.

O material que vai ser moldado por injeção é colocado no funil da máquina injetora, manualmente ou através de um sistema automático. Normalmente este material vem acondicionado em sacos, e, antes de sua utilização pode passar por um processo de secagem ou pré-aquecimento, dependendo de suas características de processamento ou condições de armazenagem. A Tabela 12, reproduzida abaixo, apresenta alguns materiais e a necessidade de pré-processamento para a moldagem por injeção.

<i>Material</i>		<i>Tempo [horas]</i>	<i>Temperatura [°C]</i>
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno	2-4	60-80
CA	Acetato de celulose	2-6	70-80
CAB	Acetato butirato de celulose	2-4	70-80
CP	Propionato de celulose	2-4	70-80
SAN	Acrilonitrila estireno acrilonitrila	Não é necessário	Não é necessário
PA	Poliamida	10-16	80-100
PC	Policarbonato	4-6	120
PE	Poliétileno	Não é necessário	Não é necessário
PMMA	Polimetil metacrilato	6-10	70-100
PP	Polipropileno	Não é necessário	Não é necessário
POM	Poliacetil	1-2	90-110
PS	Poliestireno	1-4	60-80
PVC	Poli(cloreto de vinila)	Não é necessário	Não é necessário

Tabela 12 - Tempo de secagem⁵¹

Na máquina injetora o material recebe calor proveniente das resistências elétricas que envolvem o cilindro de plastificação (no interior do qual fica a rosca da máquina injetora). Estas resistências elétricas definem diversas zonas de aquecimento ao longo do cilindro de plastificação, e podem ser reguladas para temperaturas diferentes.

O controle destas resistências, ou seja, o processo de ligar e desligar o aquecimento, é realizado pelo comando da máquina, que pode apresentar uma precisão maior ou menor, dependendo do fabricante e do modelo da máquina injetora.

Por se tratar de um sistema de resistências elétricas, controladas por informações de sensores, é de se esperar que a faixa de temperaturas determinada no controle apresente uma variação cíclica, já que as resistências são ligadas e desligadas ao se atingir valores em torno do valor regulado. Quanto mais preciso for este controle, mais próxima será a temperatura do polímero em cada faixa do cilindro de plastificação.

O material também recebe energia na forma de atrito e pressão, já que a rosca gira continuamente para homogeneizar o mesmo, movimentando-o e comprimindo-o à frente da mesma. Na verdade, a energia é fornecida ao polímero principalmente pelo trabalho exercido pela rosca, que transforma energia mecânica em calor pelo atrito.

Esta quantidade de calor fornecida através do atrito e da pressão não pode ser facilmente controlada pela máquina injetora, porém vai influenciar grandemente no tempo em que as resistências elétricas do cilindro de plastificação ficam ligadas. Cada cilindro plastificador tem uma característica de rosca que vai permitir a plastificação de uma certa quantidade de material polimérico por unidade de tempo. Esta capacidade, em quilogramas por hora, varia em função do material a ser plastificado.

Outro fator relevante na transferência de calor da máquina injetora para o material a ser moldado é que este é dependente das condições de processamento momentâneo, já que a quantidade de calor necessária para plastificar o material depende da temperatura inicial que este apresenta, da temperatura ambiente, etc..

Quando do momento da injeção, o material é forçado sob grande pressão a se deslocar pela ponta do cilindro de plastificação, que é um orifício bastante pequeno. Nesta passagem o material realiza mais uma troca de calor com a máquina, porém é muito difícil determinar quanto calor é trocado nestas condições.

Sendo assim, para se determinar a condição exata com que se dá a injeção de um material em um molde, é necessário realizar a medição da temperatura instantânea em cada ciclo, já que esta pode variar estatisticamente, durante a fabricação de um dado componente.

No processo de aquecimento do material a ser moldado por injeção é controlado o estado final (temperatura), não se tendo controle exato do fluxo de calor ou da quantidade de calor fornecida ao material para atingir aquela temperatura.

Quanto mais precisa a máquina, menos variações existirão entre um ciclo de injeção e outro, no que diz respeito à temperatura do moldado, já que um ciclo pode ocorrer com as resistências do cilindro de plastificação ligadas e outro ciclo pode ocorrer, na mesma condição de temperatura regulada, com as resistências desligadas.

Assim sendo, a temperatura com que o material é injetado na cavidade varia, dentro de certos valores, ciclo a ciclo, dependendo das condições ambientes, da regulagem da máquina e da configuração da máquina (sua capacidade técnica). Esta variação precisa ser pequena o suficiente para que não influencie a qualidade do moldado gerando diferença significativa entre as peças de um lote.

A Tabela 13, reproduzida da obra de Rees⁵⁰, apresenta para diversos materiais uma faixa de temperaturas de injeção e uma faixa de temperaturas para o molde, que servem de

referência para a regulação da máquina injetora, quando do processamento destes materiais. É importante salientar que diversos parâmetros regulados nas máquinas injetoras sofrem variação em função de condições climáticas como umidade e temperatura no ambiente fabril, e ainda de diferenças práticas das propriedades da matéria prima, que variam de lote para lote, algumas vezes, de forma significativa.

<i>Material</i>	<i>Temperatura do Fundido [°C]</i>	<i>Temperatura do Molde [°C]</i>
Polietileno (PE)	170-320	0-70
Poliestireno (PS)	200-250	0-60
Poliamida (náilon)	240-320	40-120
Acrlonitrila-estireno	230-260	50-80
Policarbonato (PC)	280-310	85-140
Poliacetal (Delrin)	180-230	70-130
Polipropileno (PP)	180-280	0-80
Acrlonitrila- butadieno-estireno (ABS)	180-240	50-120

Tabela 13 - Temperatura do material fundido das principais resinas

O molde é o elemento responsável por transformar o polímero quente (plastificado) no produto desejado. Para que a peça possa ser extraída do molde, o produto tem que resistir às forças de extração sem se deformar (permanentemente).

Assim a temperatura do plástico no momento da extração deve ser mais baixa do que aquela predominante durante o processo de injeção, mas não necessariamente o produto, para ser extraído, deve estar frio. Novamente pode-se afirmar que uma das funções do molde é a de resfriar o material fundido até a sua solidificação.

Rees⁵⁰ afirma que um transformador (ou projetista de moldes) experiente sabe que as propriedades físicas e/ou a aparência de um produto moldado por injeção dependem diretamente da taxa de resfriamento. Por exemplo, um produto pode se tornar fosco ou brilhante, quando resfriado muito rápido ou a uma temperatura muito baixa, ou pode apresentar cristalização indesejada quando resfriado muito lentamente ou em um molde não suficientemente frio.

No material apresentado pela Semeraro⁵¹, e reproduzido na Tabela 14, pode-se observar, para diversos materiais, as temperaturas sugeridas para extração, dadas as de injeção do fundido e temperatura do molde. Verifica-se que as temperaturas de extração são bastante superiores à temperatura ambiente.

<i>Material</i>	<i>Temperatura do Fundido [°C]</i>	<i>Temperatura do Molde [°C]</i>	<i>Temperatura de Extração [°C]</i>
PA6 (poliamida)	230	80	130
PA66 (poliamida)	280	80	130
PC (policarbonato)	300	100	130
ABS (acrilonitrila butadieno estireno)	250	60	95
PBT (polibutileno tereftalato)	270	100	130
PET (poli-tereftalato de etileno)	280	100	140

Tabela 14 - Condições de injeção típicas⁵¹

No projeto e fabricação de moldes convencionais (em aço), um dos aspectos importantes a ser observado é a refrigeração do molde, isto porque a refrigeração é um fator determinante da produtividade do molde. Quanto mais eficiente a retirada de calor da cavidade, mais rápido será atingida a temperatura de extração no moldado, e, conseqüentemente menor o tempo de cada ciclo de injeção, e portanto maior o número de peças que pode ser produzida por unidade de tempo.

Para analisarmos as trocas de calor no molde, pode-se estudá-lo como um trocador de calor, que deverá ser dimensionado para remover das cavidades uma dada quantidade de calor proporcional ao tipo e quantidade de material injetado, em dadas condições. A Tabela 15 apresenta valores típicos de conteúdo total de calor do material plastificado para alguns materiais (1 [kcal/kg] equivale a 4183,8 [J/kg]).

<i>Material</i>	<i>Q [kcal/kg]</i>
Acetato de Celulose	124
Butirato Acetato de Celulose	111
Poliamida	300-350
PVC	90
Metil Metacrilato	123
Poliestireno	120-150
ABS	170-170
Acrilnitrila estireno	120-150
Polietileno de baixa densidade	250-300
Polietileno de alta densidade	300-350
Polipropileno	250-300
Poliacetal	180

Tabela 15 - Valores típicos do conteúdo total de calor do material plastificado⁵²

A diferença no conteúdo de calor do material plastificado injetado (massa da peça somada ao canal de alimentação) da condição de injeção até a condição de extração é uma aproximação da quantidade de calor que deverá ser retirada do molde a cada ciclo de injeção,

porém esta quantidade de calor não é removida totalmente no tempo de resfriamento com o molde fechado, mas durante todo o tempo do ciclo.

Isto pode ser mais bem entendido se imaginarmos que, ao montar o molde na máquina injetora, ambos devem estar à mesma temperatura. Quando tratamos de moldes convencionais quase sempre contamos com um sistema de refrigeração (ou aquecimento) constituído de canais (ou resistências) por onde passa um fluido, normalmente água tratada, com temperatura e vazão controladas, para promover uma troca de calor com o objetivo de manter constante a temperatura do molde.

Ao conectarmos o molde ao sistema de refrigeração (fluxo de fluido refrigerante) e acionarmos o mesmo, a temperatura do molde diminui, pois o fluido refrigerante normalmente se encontra numa temperatura inferior à temperatura ambiente (por exemplo 5°C). A temperatura do molde continuará a cair, podendo até atingir o mesmo valor do fluido refrigerante, caso não se forneça calor ao molde, neste caso, iniciando o processo de injeção.

Quando o processo de injeção se inicia, a temperatura do molde volta a subir e, se mantidas as condições de injeção e de refrigeração, irá entrar em regime, oscilando pouco em torno de um valor (maior que a temperatura do fluido refrigerante e menor que a temperatura do polímero injetado). O que se observa a partir deste momento de equilíbrio é que a quantidade de calor que é removida pelo sistema de refrigeração é aproximadamente igual à que é retirada do material injetado para a sua solidificação. O calor continua a ser removido mesmo quando não há peça moldada no interior do molde ou ainda com o molde aberto.

Nota-se que o calor não é somente removido pelo fluido refrigerante mas também, em parte, pelas peças extraídas, já que elas deixam o molde ainda quentes, carregando uma parcela de calor do material antes totalmente plastificado.

Na obra de Menges e Mohren²³ e no trabalho de Janczynk⁵³ é apresentado um balanço de energia em que o calor que entra no molde no momento da injeção do plástico é conduzido da cavidade, através das paredes do molde para as placas e para a máquina, principalmente para os canais de refrigeração, e de lá é removido por convecção forçada pelo fluido refrigerante; também se leva em conta que uma pequena quantidade de calor é trocada na forma de convecção natural para o meio ambiente e uma outra parcela, ainda menor, é perdida na forma de radiação para o ambiente, como pode ser visualizado na Figura 17, abaixo.

Nestas obras também se encontra um modelamento matemático para cálculo do calor trocado, bem como do tempo de resfriamento esperado para as peças plásticas, em função de propriedades dos materiais, geometria e parâmetros de processamento.

Esta formulação, ainda que simples, permite o dimensionamento e a quantificação do calor trocado pela condução através das paredes do molde e removido pela convecção forçada dos canais de refrigeração, empregados principalmente nos moldes com canais de refrigeração incorporados (*conformal cooling*).

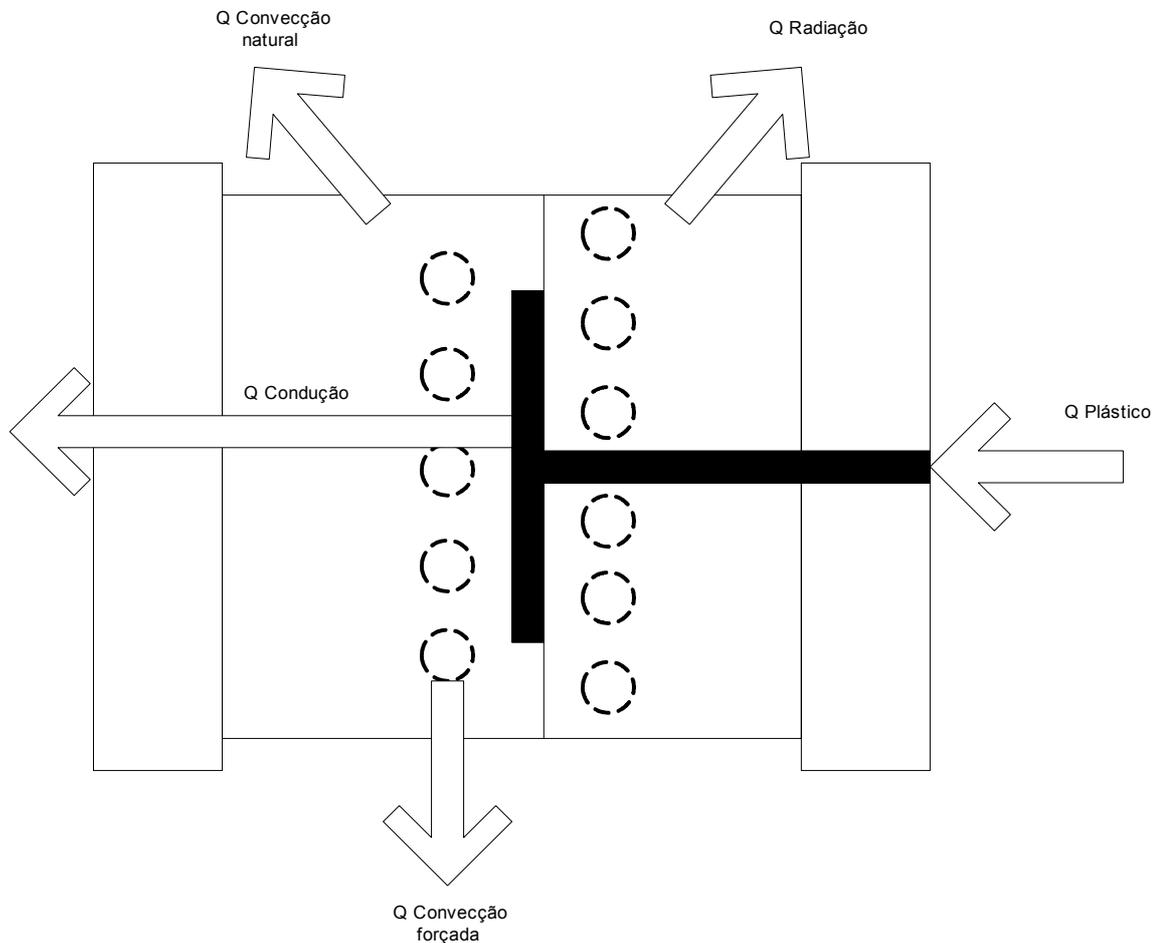


Figura 17- Balanço de energia na moldagem por injeção antes da extração

Esta preocupação pela refrigeração do molde, ou seja, a necessidade de manter a temperatura da cavidade dentro de uma certa faixa de valores, é ainda mais importante quando trabalhamos com ferramentaria rápida baseada em estereolitografia.

Lafratta²⁰ afirma em seu trabalho que todos os autores por ele pesquisados, sobre o estudo dos principais mecanismos de falha de insertos SL, “são unânimes em afirmar que o controle de temperatura e o conhecimento de sua interação com as propriedades da resina são fundamentais para o bom desempenho dos mesmos”.

Nas obras de Menges & Mohren²³, Amaral⁵², Rees⁵⁰ e Pötsch & Michaeli²¹, entre outras, é apresentado o método para dimensionamento dos sistemas de refrigeração para moldes convencionais. O consenso entre estes autores é que a refrigeração é tão mais eficiente quanto mais uniformemente distribuída.

Para se atingir esta melhor distribuição, o projetista do molde deve levar em conta a espessura do moldado, a distância do canal de refrigeração até a superfície da cavidade e o tipo de material empregado, tanto no moldado quanto no molde, além, é claro, das condições de injeção estimadas.

Há uma grande limitação técnica que separa a teoria da melhor refrigeração, da prática da construção dos moldes que deve ser considerada mesmo quando estamos utilizando um sistema CAE, como o *Moldflow*, para verificação dos sistemas de refrigeração envolvidos em um molde. Esta limitação diz respeito à furação (ou usinagem) das placas e insertos do molde, para que o fluido refrigerante possa circular próximo à superfície da cavidade. Existe uma limitação pois a furação, seja através de brocas ou eletrodos para eletro-erosão, não consegue percorrer caminhos curvos, e assim acompanhar a forma complexa de diversas cavidades.

Outro problema, no que diz respeito à refrigeração, é que por ser o molde um produto bastante complexo, e, em alguns casos composto de diversas partes que apresentam mecanismos de movimentação relativa, o sistema de refrigeração é o último a ser fabricado e os canais de refrigeração acabam por passar não no local ideal para a refrigeração, mas sim no espaço que sobrou, onde ainda é possível realizar a furação.

Diz-se que quanto melhor o projetista do molde e o ferramenteiro que o constrói, melhor o sistema de refrigeração obtido e, portanto, melhor sua produtividade, quando em operação. Aqui mais uma vez se vê a complexidade envolvida na fabricação de moldes para injeção, e também o empirismo envolvido no dimensionamento, inclusive dos canais de refrigeração.

Quando é necessária uma melhor troca de calor, uma das soluções apresentadas é a do emprego de insertos de cobre-berílio para uma maior remoção de calor localizada em alguns pontos ou pontos de difícil acesso. Outros artifícios também podem ser empregados e, normalmente o são, quando o sistema inicialmente empregado não apresenta resultados satisfatórios de produtividade, ou ainda quando tivermos de fazer um retrabalho no molde para solucionar problemas como empenamentos ou tensões residuais nos produtos moldados.

Quando tratamos de ferramentas convencionais, o que muitas vezes ocorre é que o molde é fabricado com um sistema de refrigeração bastante simples, e nos testes de injeção (*try-out*) são verificados os pontos onde o produto apresentou defeitos (como empenamentos), e a partir destas informações o sistema de refrigeração é melhorado, através da fabricação de outros canais de refrigeração ou o emprego de insertos de outros materiais que facilitem a condução de calor para fora daquela região. Esta é, normalmente, a forma mais econômica de se obter um bom sistema de refrigeração do molde, que garanta a obtenção de peças boas.

Dependendo da qualidade do sistema de troca de calor obtido na fabricação do molde, além da relação direta com a qualidade do produto moldado, teremos influência no tempo de ciclo, fator diretamente relacionado com a produtividade.

Em virtude da diferença das propriedades térmicas entre os moldes fabricados em metal e os moldes fabricados por estereolitografia, a abordagem para estudo e dimensionamento do sistema de refrigeração tem de ser diferente. A condutividade térmica da resina de estereolitografia é significativamente menor do que a dos metais empregados normalmente para a fabricação de cavidades, porém, não há quase limitações para as formas e os artifícios de refrigeração que podem ser empregados.

Uma diferença marcante que se encontra, quando tratamos da fabricação de canais de refrigeração em moldes de estereolitografia é que, por permitir a fabricação de geometrias livres (não precisamos nos preocupar com a retirada de material por uma ferramenta de forma definida) permite a fabricação ou colocação dos canais de refrigeração muito próximos à superfície da cavidade, na forma e dimensão desejados (o que não se obtém em ferramentaria convencional).

Os trabalhos de Janczyk⁵³ e de Lafratta²⁰ apresentam um modelo matemático que leva em consideração estes fatores para o dimensionamento dos canais de refrigeração incorporados (*conformal cooling*), bem como estudos de caso que mostram a validade do emprego desta técnica para melhorar a troca de calor sem diminuir a resistência dos insertos assim fabricados.

A Figura 18, apresenta três alternativas de construção para insertos fabricados em ferramentaria rápida, bastante difundidos na literatura. No primeiro exemplo, a construção do inserto em casca, permite, além de uma redução do custo para a fabricação do inserto (tempo e material), uma melhor troca de calor entre a superfície da cavidade e os canais de refrigeração (tubos de cobre engastados no preenchimento de material termo-condutor). Contudo estes canais são limitados pela possibilidade da conformação dos tubos de cobre e da forma com que se dá o preenchimento, para evitar vazios.

No segundo exemplo, tem-se um inserto totalmente construído em resina de estereolitografia. Neste caso não tem-se a retirada de calor por convecção forçada pelo fluido refrigerante. Sendo assim, as trocas de calor se limitam à convecção natural e radiação com o meio, bem como à condução através do inserto, o que provoca um aumento na temperatura do mesmo.

No terceiro e último exemplo tem-se a retirada de calor da superfície da cavidade por convecção forçada através de canais fabricados na própria casca do inserto. Pode-se observar que estes canais acompanham toda a superfície da cavidade, estando mais próximos e mais

bem distribuídos, permitem uma melhor troca de calor entre o moldado e o fluido refrigerante, provocando um menor aumento na temperatura do inserto.

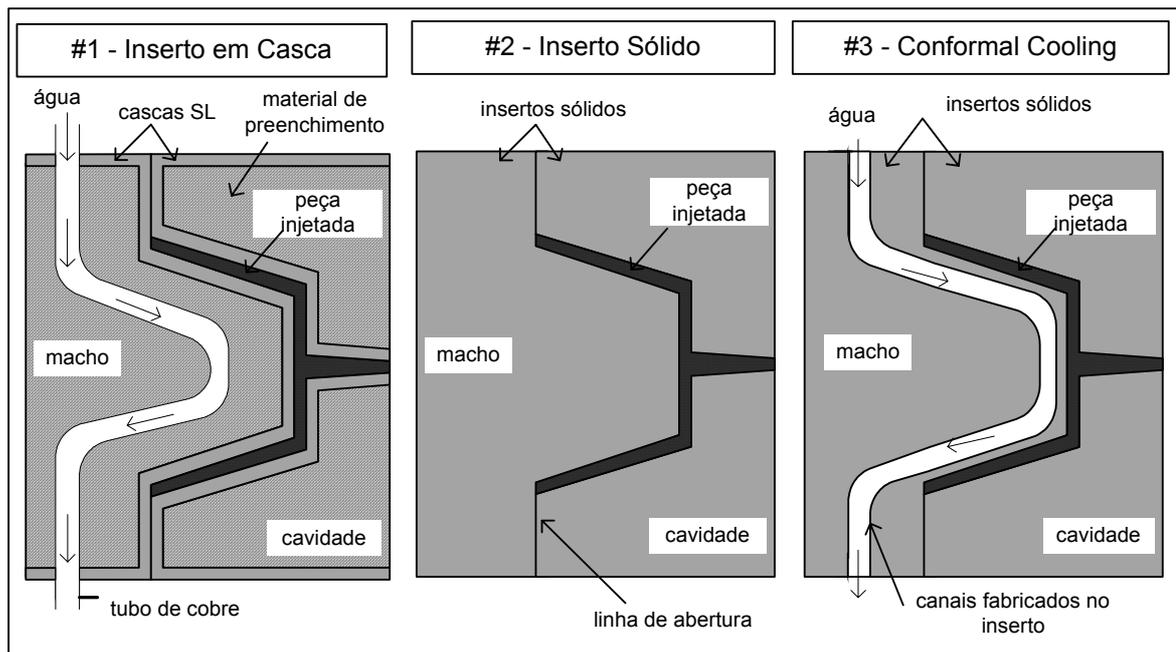


Figura 18 - Tipos de sistemas de resfriamento utilizados em insertsos SL⁵⁴

O trabalho de Li, Gargiulo e Keefe⁵⁵ apresenta uma comparação teórico-prática de três insertsos com diferentes soluções para refrigeração, obtendo melhores características térmicas se comparadas com o uso de um inserto maciço.

As soluções estudadas foram o emprego do inserto construído por estereolitografia na forma de uma fina casca, preenchido por um material condutor de calor (metal de baixo ponto de fusão ou resina epóxi com carga metálica); inserto similar a este último, porém com aplicação de canais de refrigeração na forma de tubos de cobre engastados no preenchimento e por último insertsos metalizados em sua superfície.

Este estudo demonstrou que, embora sejam realizados esforços para melhorar a resposta térmica nos moldes fabricados por estereolitografia, obtendo-se assim peças aceitáveis, é pouco provável que se chegue a duplicar as características de um molde convencional. Porém, este diferencial de refrigeração vai permitir uma diminuição em parâmetros de processamento, como por exemplo a pressão de injeção, o que nos leva a uma menor solicitação na cavidade.

Também é conclusão do referido trabalho que o emprego da metalização das cavidades não auxilia significativamente na troca de calor, porém contribui com a diminuição do atrito durante o processo de injeção, aumentando a vida da ferramenta, e contribui, também

para uma distribuição homogênea do calor em toda a cavidade, o que é uma característica importante para uma melhor qualidade de moldado.

O trabalho de Ahrens et al.⁵⁴ apresentou uma forma inovadora de refrigeração para insertos fabricados por meio de estereolitografia, denominada de “sistemas de canais de fluxo de calor”.

Esta forma consiste em uma modificação do exemplo 1 apresentado na Figura 18, em que tem-se o preenchimento da parte traseira do inserto com material termo-condutor, neste caso uma liga metálica de baixo ponto de fusão, na qual estão engastados tubos de cobre por onde circula o fluido refrigerante.

Para melhorar a retirada de calor são construídas ilhas de contato do metal de preenchimento diretamente com o moldado. A Figura 19 representa a seqüência de obtenção destas ilhas de contato.

Esta solução apresentou resultados significativos na melhoria da retirada de calor da superfície da cavidade. Com isso foi possível reduzir o tempo de resfriamento do moldado no interior da cavidade, e portanto o tempo entre injeções, já que a temperatura da resina da casca também se mantém mais baixa, o que diminui a fragilização do material da mesma.

Alguns inconvenientes são também apresentados, como marcas de refrigeração diferenciada na superfície do moldado e maior dificuldade no acabamento superficial da cavidade.

Ainda não foram realizados estudos aprofundados para verificar se estas ilhas de refrigeração provocam maior concentração de tensões, levando a uma diminuição da vida do inserto.

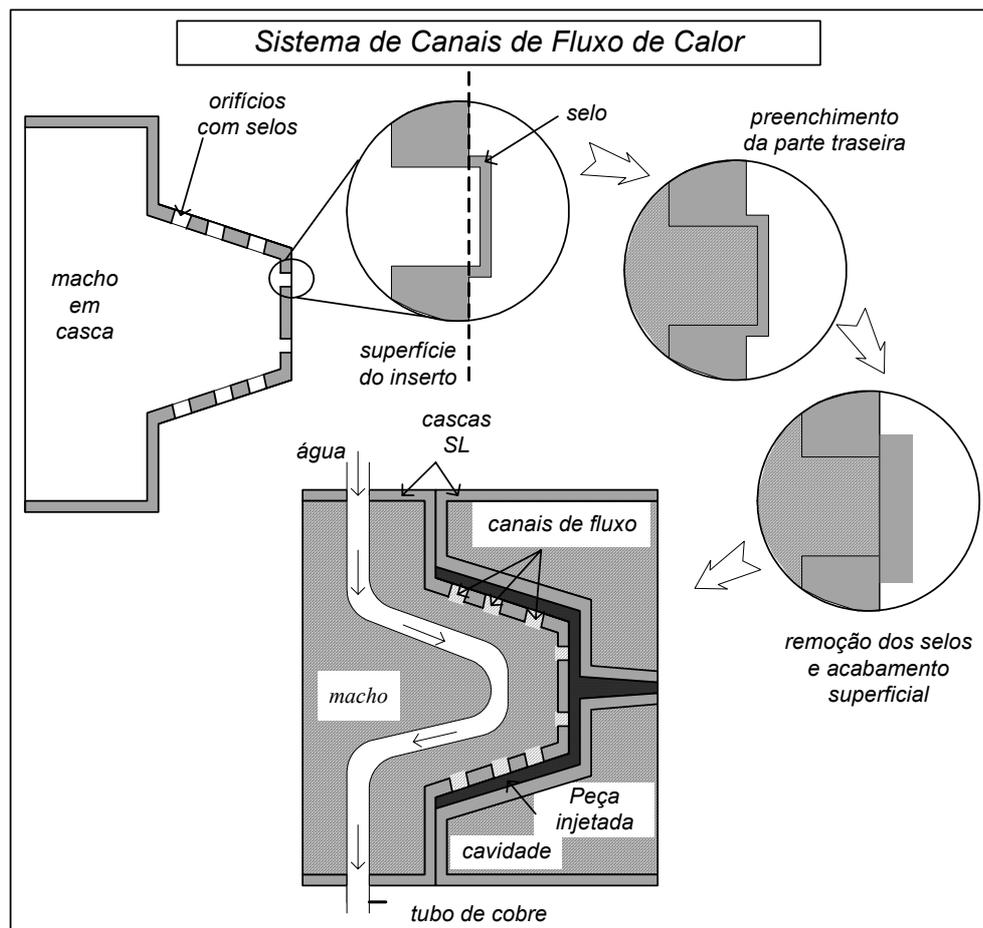


Figura 19 - Procedimento para a fabricação de insertos com de canais de fluxo de calor⁵⁴.

Os trabalhos de Palmer & Colton¹⁶, Ribeiro Jr.¹⁹ e ainda Colton & Lebaut³¹, apresentam como principal causa para a fragilidade do processo de injeção em moldes SL a dificuldade de remoção de calor causada pela ineficiência dos sistemas de refrigeração em função da baixa condutividade térmica da resina, associada à diminuição significativa de sua resistência com o aumento da temperatura.

Muitos estudos estão sendo realizados nesta linha de pesquisa. Alguns pesquisadores ainda estão construindo insertos maciços e outros estão utilizando diversas soluções para melhorar a resposta térmica dos insertos, utilizando canais de refrigeração construídos na própria casca, ou engastados em material termocondutor que preenche a parte traseira dos insertos construídos na forma de finas cascas. Todos eles obtêm peças injetadas dentro das características esperadas, em quantidade suficiente.

Quando consideramos a técnica do núcleo perdido, há uma parcela maior de calor que será removida do processo, juntamente com a peça, ou seja, não é preciso remover tanto calor “através” do molde, nem tão rapidamente, já que o núcleo “frio” é colocado a cada ciclo de

injeção. Com isso, este núcleo, normalmente em temperatura menor que a cavidade, irá remover calor da mesma até o momento da injeção, funcionando, portanto, como mais um mecanismo de retirada de calor.

Desta forma é preciso fazer um novo balanço de energia no molde empregado para injetar, utilizando a técnica do núcleo perdido. Além de considerar o calor que é liberado por convecção natural, por radiação, por condução através das placas do molde e o calor que é removido por convecção forçada pelo fluido refrigerante que circula no molde, teremos de levar em conta a parcela de calor que vai ser conduzida para o núcleo.

Verificamos que uma quantidade de calor é removida do molde antes da injeção por condução para o núcleo, que foi colocado frio no interior da cavidade. Esta quantidade de calor, que participaria do aquecimento do molde como um todo, ou seria em parte removida pelo sistema de refrigeração, agora aquecerá em parte o núcleo.

Quando da injeção, o material plastificado entrará em contato rapidamente com as paredes do núcleo e com as paredes do molde. O tempo de preenchimento das cavidades em geral é pequeno, variando em função do volume, da forma, do tipo de material injetado e das condições reguladas na máquina. Para peças pequenas um valor de 3 segundos é bastante aceitável para o preenchimento da cavidade.

É razoável admitir que o polímero irá atingir instantaneamente toda a superfície da cavidade, bem como toda a superfície do núcleo, trocando calor com ambos, já que a condutividade térmica do núcleo é da mesma ordem de grandeza da cavidade (na técnica convencional). Tem-se assim também uma distribuição uniforme de temperatura em toda a cavidade e em todo o núcleo.

Sendo assim, uma parcela significativa de calor que atua no resfriamento do polímero até a temperatura de extração é também removida pelo núcleo.

Se utilizarmos um exemplo hipotético de uma peça de parede fina, de forma esférica, com um diâmetro interno significativo (núcleo grande), pode-se estimar que metade do resfriamento da peça será feito pelo núcleo e metade pela cavidade. Assim, a necessidade de refrigeração do molde, neste caso, cai pela metade, em um molde convencional.

Utilizando este exemplo, porém com a cavidade construída de um material com condutividade térmica bastante reduzida, como a resina de estereolitografia, pode-se estimar que grande parte do resfriamento será realizado pelo núcleo, e apenas uma pequena parcela será transferida para a cavidade (e de lá será conduzida para os canais de refrigeração ou participará do aquecimento global do inserto).

Diversos estudos já foram realizados, buscando encontrar uma temperatura de compromisso, para moldes construídos em estereolitografia, em que o tempo de resfriamento

da cavidade não é tão grande e a fragilização do material que compõe o molde, em função do aquecimento é aceitável. Assumir uma temperatura de 50°C como temperatura limite de compromisso para a resina em insertos construídos por estereolitografia é razoável, conforme observado por Ribeiro Jr.¹⁹.

Partindo de um molde a temperatura ambiente são necessários diversos ciclos de injeção para que o molde se aqueça e chegue a esta temperatura de referência e entre em equilíbrio. Dependendo do tipo de material que está sendo injetado e do tamanho do lote, é possível que, mesmo empregando tempos de ciclo característicos de moldes convencionais, se termine o processo de injeção daquele lote de peças sem que o molde atinja a temperatura adotada como referência para se iniciar um ciclo diferenciado (com nova injeção de peças quando a cavidade atinge um determinado valor pré-estabelecido de temperatura).

Se compararmos hipoteticamente a injeção de duas peças (com mesma massa, mesma espessura de parede e mesma área superficial) em moldes construídos por estereolitografia, uma injetada com o uso da técnica do núcleo perdido (metade de sua área em contato com o núcleo) e uma outra em um molde simples, é de se esperar que a peça em contato com o núcleo irá resfriar mais rápido, já que a troca de calor com o núcleo metálico é maior (quase a mesma que é trocada em um molde convencional) portanto o tempo para a extração será também menor e com isso o tempo em que a cavidade estará sujeita ao moldado aquecido será também menor.

Esta hipótese comparativa não busca quantificar a diferença na quantidade de calor removida, mas, intuitivamente demonstrar que o emprego do núcleo metálico provocará uma mais rápida remoção de calor do moldado. Consideramos também que a quantidade de calor que é removida no processo, da cavidade construída por estereolitografia, continua inalterada, mas que também contribui significativamente para o resfriamento global do moldado.

Ao trabalhar com a técnica do núcleo perdido verificamos que grande parte do calor proveniente do resfriamento do polímero até a sua temperatura de extração sai tanto na forma de polímero solidificado ainda quente, quanto na forma de núcleo perdido aquecido até próximo a sua temperatura de fusão.

Como o tempo para a extração será menor, o material aquecido permanece menos tempo no interior da cavidade e, por ser mais fácil, o fluxo de calor se dá principalmente para o interior do núcleo e não para as paredes da cavidade. Com isso tem-se um aquecimento menor do molde por condução, e, portanto, uma menor redução nas propriedades mecânicas da resina.

Como os outros modelos de refrigeração já foram bastante discutidos e utilizados, o emprego da técnica do núcleo perdido só vem para melhorar o processo de remoção de calor da cavidade, além, é claro, de permitir a fabricação de peças complexas de paredes finas.

3.2 Modelamento matemático

Nos trabalhos já comentados se encontra um equacionamento matemático refinado das trocas de calor em um molde convencional, bem como em moldes construídos com o emprego de estereolitografia.

Esta troca de calor através da resina de estereolitografia, apesar de ser significativamente menor do que através das paredes de um molde convencional construído em metal, não é desprezível, pois do contrário não seria possível obter peças injetadas em moldes assim construídos. Esta menor qualidade de resfriamento implica em maiores tempos de resfriamento do moldado, maior aumento da temperatura do inserto e conseqüente redução de suas propriedades mecânicas (que pode causar diminuição da vida do inserto).

O emprego da técnica do núcleo perdido em moldes construídos através da estereolitografia vai contribuir para uma melhor e mais rápida retirada de calor do moldado, reduzindo o tempo de resfriamento e também reduzindo o aquecimento do inserto, o que conduzirá a um ciclo de injeção mais próximo do convencional, bem como diminuirá a fragilização do inserto (aumentando, portanto, a sua vida).

Ao estudar a técnica do núcleo perdido, verifica-se que tem-se duas grandes limitações no seu emprego, que são:

- o núcleo deve se fundir, na etapa subsequente à injeção, em temperatura que não deforme o moldado, e
- é preciso utilizar um núcleo que não se funda até o endurecimento do polímero, durante a injeção.

Há, ainda uma terceira limitação significativa: na prática não se dispõe de materiais com propriedades que cubram todo o espectro de necessidades de engenharia. Não pode-se, portanto, pré-determinar uma série de características desejadas e simplesmente designar um material que as possua. É preciso selecionar, dentro de um grupo de materiais existentes e economicamente disponíveis, aqueles que podem ser utilizados. Esta seleção de materiais a serem empregados será abordada no próximo item deste capítulo.

Abordando, separadamente, as limitações acima citadas, verificamos que a seleção do material que será empregado para núcleo se dará em função do polímero empregado e de sua temperatura máxima de utilização, tanto na injeção, quanto no processo de retirada. Sendo assim, a temperatura de fusão do núcleo deverá ser menor (digamos 10%, por segurança) do

que a temperatura de amolecimento daquele polímero específico utilizado na injeção. É necessário também levar em consideração que o material empregado para o núcleo não deverá reagir com o material injetado nem tampouco com a cavidade; outrossim, ambos (núcleo e peça injetada) não podem reagir com o meio empregado para aquecimento e remoção do núcleo (na técnica convencional se emprega poli-etilenoglicol, que é encontrado como glicerina ou como fluido para radiadores de automóveis).

A segunda limitação, que é a não fusão do núcleo, do momento de injeção até o endurecimento do polímero, requer que se façam algumas considerações e se assumam algumas hipóteses simplificativas, como veremos a seguir, sempre levando em consideração o lado da segurança para o sucesso do processo.

Para que o núcleo não se funda, ele só pode absorver uma quantidade de energia tal que a sua temperatura não suba até a temperatura de fusão. Portanto, a variação da temperatura do núcleo se dará da Temperatura Ambiente (T_{amb}) até uma temperatura próxima à Temperatura de Fusão (T_{fus}).

Assim, o máximo de calor que o núcleo poderá absorver sem se fundir, será dado por:

$$Q_{núcleo} = m.c.\Delta T \quad (12)$$

$$m = \rho.V \quad (13)$$

$$Q_{núcleo} = \rho.V.c.\Delta T \quad (14)$$

$$Q_{núcleo} = \rho.V.c.(T_{fus} - T_{amb}) \quad (15)$$

O calor que será removido do polímero será aquele necessário para que a sua temperatura diminua da temperatura em que foi injetado até a temperatura de extração (quando se encontra solidificado).

Buscando trabalhar neste equacionamento matemático, dentro de uma maior faixa de segurança, assumiremos que o polímero irá trocar uma quantidade de calor ainda maior, considerando que o calor fornecido ao núcleo será aquele necessário para levar o polímero da sua temperatura da Temperatura de Injeção (T_{inj}) até a temperatura de Fusão do Núcleo (T_{fus}). Esta é, na maioria dos casos, inferior à temperatura de extração (tem-se assim um resfriamento maior do polímero do que seria necessário para a extração).

No caso do núcleo, não desejamos que ele mude de fase (não se funda), assim assumimos que receba apenas calor sensível.

No caso do polímero, precisamos que ele mude de fase, ou seja, que ele se torne sólido novamente. Assim, a quantidade de calor retirada para a solidificação de um polímero cristalino é

$$Q_{Total}^{T_{inj}}_{T_{fus}} = Q_{sensível}^{T_{inj}}_{T_{solidificação}} + Q_{latente} + Q_{sensível}^{T_{solidificação}}_{T_{fus}} \quad (16)$$

$$Q_{Total}^{T_{inj}}_{T_{fus}} = m.c_{liq} \cdot (T_{inj} - T_{solidificação}) + m.L + m.c_{sol} \cdot (T_{solidificação} - T_{fus}) \quad (17)$$

No caso de um polímero amorfo, como por exemplo o ABS, pode-se considerar apenas uma variação no calor sensível, da seguinte forma:

$$Q_{polímero} = m.c.\Delta T \quad (18)$$

$$Q_{polímero} = m.c.(T_{inj} - T_{fus}) \quad (19)$$

$$m = \rho.V \quad (20)$$

$$Q_{polímero} = \rho.V.c.(T_{inj} - T_{fus}) \quad (21)$$

No caso dos polímeros, o calor específico varia significativamente em função da temperatura (este aspecto será abordado no próximo capítulo). Pode-se, entretanto, determinar um valor médio do calor específico, para estimar com segurança a quantidade de calor trocada.

Como teremos a possibilidade de injetar tanto polímeros amorfos (como o ABS) quanto cristalinos (como o PEAD e o PA), é mais interessante considerar a variação da entalpia no polímero ΔH_p , de sua temperatura de injeção até o seu resfriamento para a temperatura de injeção do núcleo utilizado no processo. O valor de ΔH_p pode ser obtido com bastante precisão através de uma análise em calorímetro diferencial de varredura (*Differential scanning calorimetry – DSC*), como veremos mais adiante, e utilizado como função de T_{inj} como dado de entrada neste equacionamento.

$$Q_{Total}^{T_{inj}}_{T_{fus}} = \Delta H_p \quad (22)$$

$$Q_{Total}^{T_{inj}}_{T_{fus}} = \Delta h_p \cdot m_p \quad (23)$$

$$Q_{Total}^{T_{inj}}_{T_{fus}} = \Delta h_p \cdot \rho.V \quad (24)$$

A aproximação do valor de ΔH_p pela equação (21), utilizando um valor médio de calor específico, será empregada no modelo matemático aqui apresentado. O valor correto pode ser obtido pela integração da função $c=f(T_{inj})$ obtida através de uma análise DSC da amostra do material a ser empregado.

3.2.1 Modelo aproximado para a seleção de pares polímero/núcleo

Considerando que a cavidade construída em estereolitografia é um recipiente adiabático (não troca calor com o meio) e considerando que o polímero tem uma área significativa de contato com o núcleo para a troca de calor, pode-se assumir que todo o calor

liberado pelo polímero será absorvido pelo núcleo, em um tempo infinito. Se assim fizermos, obteremos uma relação de volumes entre polímero e núcleo, dadas as propriedades térmicas dos materiais envolvidos, para que a temperatura de equilíbrio seja (igual a) a temperatura de fusão do núcleo:

Assim tem-se:

$$Q_{polímero} = Q_{núcleo} \quad (25)$$

$$Q_{polímero} = (V \cdot \rho \cdot \Delta h)_{polímero} \quad (26)$$

$$Q_{núcleo} = [\rho \cdot V \cdot c \cdot (T_{fus} - T_{amb})]_{núcleo} \quad (27)$$

$$(V \cdot \rho \cdot \Delta h)_{polímero} = [\rho \cdot V \cdot c \cdot (T_{fus} - T_{amb})]_{núcleo} \quad (28)$$

$$(V_p \cdot \rho_p \cdot \Delta h_p)_{polímero} = [\rho_n \cdot V_n \cdot c_n \cdot (T_{fus_n} - T_{amb_n})]_{núcleo} \quad (29)$$

$$\frac{V_n}{V_p} = \frac{\rho_p \cdot \Delta h_p}{\rho_n \cdot c_n \cdot (T_{fus_n} - T_{amb_n})} \quad (30)$$

Neste modelo inicial, considera-se que as propriedades são totalmente determinadas e não variam em função do tempo e da temperatura.

Para que este equilíbrio seja atingido, um tempo considerável deve ser admitido, ou seja, tempo de equilíbrio \gg tempo do ciclo de injeção convencional.

Esta relação de volumes pode ser mais bem desenvolvida para alguns formatos básicos como a esfera ou o cilindro. Neste caso pode-se utilizar relações entre volume e espessuras para empregar esta relação em outros formatos de peças.

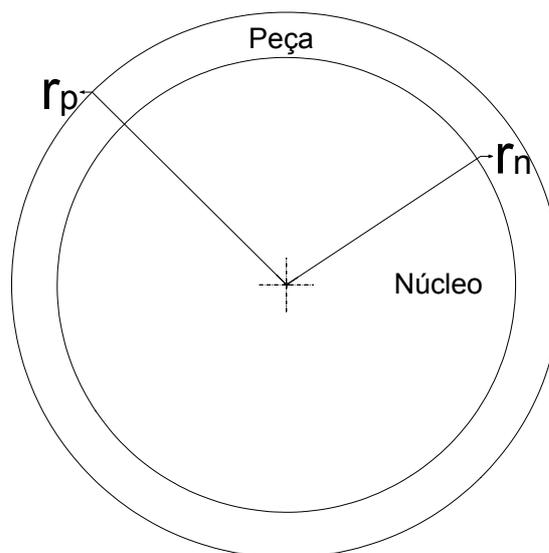


Figura 20- Modelo geométrico de esfera/cilindro para técnica do núcleo perdido

Sendo

Esfera

$$V_n = \frac{4.\pi.r_n^3}{3}$$

$$V_p = \frac{4.\pi.r_p^3}{3} - \frac{4.\pi.r_n^3}{3}$$

$$V_p = \frac{4.\pi.(r_p^3 - r_n^3)}{3}$$

$$\frac{V_n}{V_p} = \frac{\frac{4.\pi.r_n^3}{3}}{\frac{4.\pi.(r_p^3 - r_n^3)}{3}}$$

$$\frac{V_n}{V_p} = \frac{r_n^3}{r_p^3 - r_n^3}$$

$$\frac{r_n^3}{r_p^3 - r_n^3} = \frac{\rho_p.\Delta h_p}{\rho_n.c_n.(T_{fus_n} - T_{amb_n})} = \frac{V_n}{V_p}$$

Cilindro

$$V_n = \pi.r_n^2.h \quad (31)$$

$$V_p = \pi.r_p^2.h - \pi.r_n^2.h \quad (32)$$

$$V_p = \pi.h.(r_p^2 - r_n^2) \quad (33)$$

$$\frac{V_n}{V_p} = \frac{\pi.h.r_n^2}{\pi.h.(r_p^2 - r_n^2)} \quad (34)$$

$$\frac{V_n}{V_p} = \frac{r_n^2}{r_p^2 - r_n^2} \quad (35)$$

$$\frac{r_n^2}{r_p^2 - r_n^2} = \frac{\rho_p.\Delta h_p}{\rho_n.c_n.(T_{fus_n} - T_{amb_n})} = \frac{V_n}{V_p} \quad (36)$$

Como na transferência de calor por condução a área de contato é dominante, pode-se determinar esta mesma relação para um comprimento equivalente, que pode ser determinado para peças cujas características geométricas não permitam o rápido e fácil equacionamento geométrico.

Tem-se, por definição, que o volume V de uma peça prismática regular pode ser calculado através da multiplicação da sua secção de área A pelo seu comprimento equivalente L (espessura equivalente).

Pode-se assim determinar uma relação aproximada entre as espessuras equivalentes do núcleo e da peça, para verificar uma relação mínima que permita estimar se haverá ou não fusão do núcleo quando a moldagem por injeção for realizada a uma temperatura T_{inj} :

$$V_p = Leq_{peça} \cdot A_{peça} \quad (37)$$

$$V_n = Leq_{núcleo} \cdot A_{núcleo} \quad (38)$$

$$\frac{V_n}{V_p} = \frac{Leq_{núcleo} \cdot A_{núcleo}}{Leq_{peça} \cdot A_{peça}}; A_{núcleo} \cong A_{peça} \therefore \frac{V_n}{V_p} = \frac{Leq_{núcleo}}{Leq_{peça}}; \quad (39)$$

$$\frac{Leq_{núcleo}}{Leq_{peça}} = \frac{\rho_p.\Delta h_p}{\rho_n.c_n.(T_{fus_n} - T_{amb_n})} = \frac{V_n}{V_p} \quad (40)$$

É possível então, para um par de materiais (com propriedades bem definidas), representar a relação de volumes em função da variável temperatura de injeção (T_{inj}) na

forma de gráficos. Vale lembrar que as diversas fontes de consulta disponíveis apresentam valores de propriedades que destoam muito entre si, tanto para os materiais metálicos quanto para os não metálicos.

Para exemplificar o emprego deste modelo matemático, elegemos os materiais poliméricos, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 16. Estas propriedades são gerais e representam os valores médios encontrados para estas classes, e não um valor específico para um determinado *grade* de um fornecedor específico. Em destaque estão as propriedades da resina de estereolitografia empregada na construção de cavidades.

	<i>Resina SL</i>	<i>PP</i>	<i>HDPE</i>	<i>ABS</i>	<i>PA 6.6</i>
Densidade [g/cm ³]	1130	0,90	0,940	0,99	1,14
Calor Específico _{médio} [kJ/kg°C]	1,82	1,77	2,2	1,38	1,68
Condutividade Térmica [W/m°C]	0,18	0,14	0,46	0,06	0,22
Temp. de distorção térmica a 0,45 MPa [°C]	-	90	60	74	149
Ponto de amolecimento Vicat [°C]	-	150	120	85	264

Tabela 16 - Propriedades dos materiais injetados⁵⁶ (resina SLA como referência)

Na Tabela 17, abaixo, são apresentadas as propriedades das ligas de baixo ponto de fusão escolhidas para a fabricação dos núcleos empregados neste trabalho de tese. Em destaque tem-se como referência o Aço 1020 e a cera para microfusão. Observa-se que as ligas, apesar da diferença de ponto de fusão, apresentam propriedades térmicas da mesma ordem de grandeza. A cera de microfusão apresenta um calor específico muito mais alto que as ligas de baixo ponto de fusão e também uma condutividade térmica muito baixa, o que vai influenciar muito as características de emprego deste material como núcleo no processo.

<i>Material</i>	<i>Aço 1020</i>	<i>Liga 72 °C</i>	<i>Liga 103 °C</i>	<i>Liga 125 °C</i>	<i>Cera</i>
Densidade [kg/m ³]	7870	9580	8780	10440	1450
Calor específico _{médio} [J/kg*K]	486	146	170	126	1489
Condutividade [W/m*k]	51,9	18	17	16,74	1,09

Tabela 17 - Propriedades dos materiais empregados como núcleo (aço como referência)

De posse dos gráficos gerados para as combinações dos diversos materiais é possível determinar, de forma aproximada, e consideradas algumas limitações (hipóteses simplificativas), a relação máxima entre os volumes (ou raios) para um par de materiais (núcleo e polímero) para uma dada temperatura de injeção ou, ainda, determinar a máxima temperatura de injeção para um dado polímero em um núcleo, para uma relação de volumes dada (mais interessante), como pode ser verificado na Tabela 18 e na Tabela 19.

Nestas tabelas é possível determinar a temperatura de injeção para que o núcleo sofra uma variação de temperatura tal que atinja no máximo a sua temperatura de fusão (para que ele se funda é necessário fornecer mais calor ou apresentar uma temperatura de injeção maior). As tabelas foram elaboradas para empregar como exemplo as peças escolhidas para os estudos de caso deste trabalho, uma de forma esférica e outra na forma de cubo, denominadas peça Esfera e peça Dado, que são descritas nos Capítulos seguintes.

Como cada material demanda uma temperatura mínima de injeção, como apresentado na Tabela 13 do Capítulo 2, dependendo da relação de volumes da peça em estudo, não será possível afirmar com certeza que não haverá fusão do núcleo. Vale lembrar que a escolha da temperatura de injeção é função não só do material, mas também da forma da peça. Quanto menor a temperatura de injeção, maior será a pressão necessária para o total preenchimento da cavidade.

Para a peça Dado, como pode ser verificado na Tabela 18, os pares materiais destacados apresentam possibilidade de fusão, já que a temperatura de injeção mínima para o polímero excede a máxima permitida.

<i>Temperatura Máxima de Injeção [°C]</i>	<i>PEAD $T_{inj}=170$ a 320</i>	<i>PP $T_{inj}=180$ a 280</i>	<i>ABS $T_{inj}=180$ a 240</i>	<i>PA $T_{inj}=240$ a 320</i>
Cera	133	156	172	140
Liga 1	142	162	177	147
Liga 2	226	263	290	236
Liga 3	264	306	336	275

Tabela 18 - Temperatura máxima de injeção para a peça Dado - $[V_n/V_p] = 2,191$

Para a peça Esfera, como pode ser verificado na Tabela 19, quase todas as combinações de pares materiais são possíveis, já que a relação de volumes já é significativamente maior.

<i>Temperatura Máxima de Injeção [°C]</i>	<i>PEAD $T_{inj}=170$ a 320</i>	<i>PP $T_{inj}=180$ a 280</i>	<i>ABS $T_{inj}=180$ a 240</i>	<i>PA $T_{inj}=240$ a 320</i>
Cera	194	234	263	204
Liga 1	197	234	261	207
Liga 2	325	391	438	342
Liga 3	375	450	504	395

Tabela 19 - Temperatura máxima de injeção para a peça Esfera - $[V_n/V_p] = 3,937$

Buscando generalizar estes conceitos e permitir uma fácil visualização dos resultados para diversas relações de volume, é apresentado nas Figuras 21, 22, 23, e 24 o relacionamento entre os volumes do núcleo e da peça, em função da temperatura de injeção, para cada um dos materiais escolhidos como núcleo neste estudo.

Nestas figuras, para uma dada relação de volumes (linha vertical), é possível encontrar o ponto de máxima temperatura de injeção para cada polímero, fazendo encontrar a linha da relação de volumes com a linha característica do polímero e determinando no eixo das abscissas o valor máximo de temperatura.

Outra forma de utilizar estas figuras é determinando para uma dada peça a menor relação de volumes (raios ou espessuras), e, ligando esta reta vertical à reta horizontal característica da temperatura de injeção ideal para aquele polímero, encontrar o ponto de encontro de ambas. Se este ponto estiver abaixo da linha característica do polímero, a injeção é possível, se o ponto estiver acima da linha, é aconselhável proceder melhor análise, seja através de simulação numérica, seja através de experimentação.

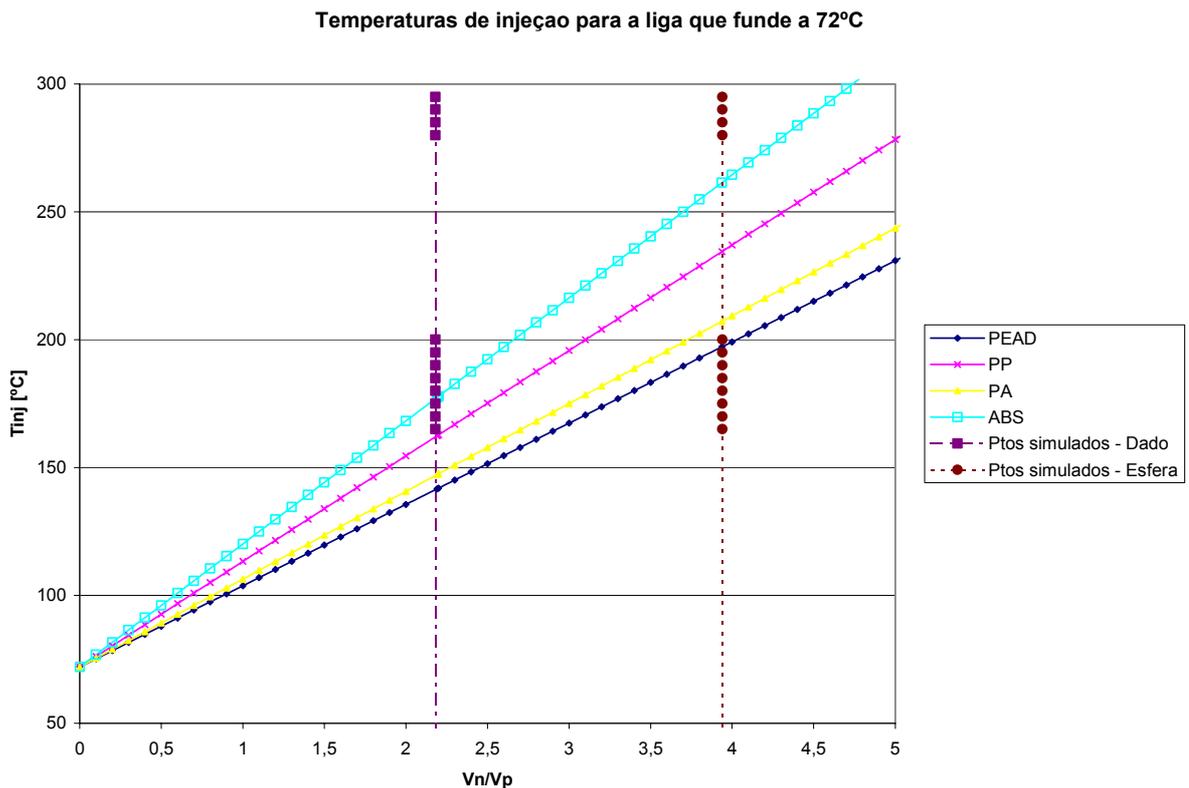


Figura 21- Relação de volumes com temperatura de injeção para liga de 72°C

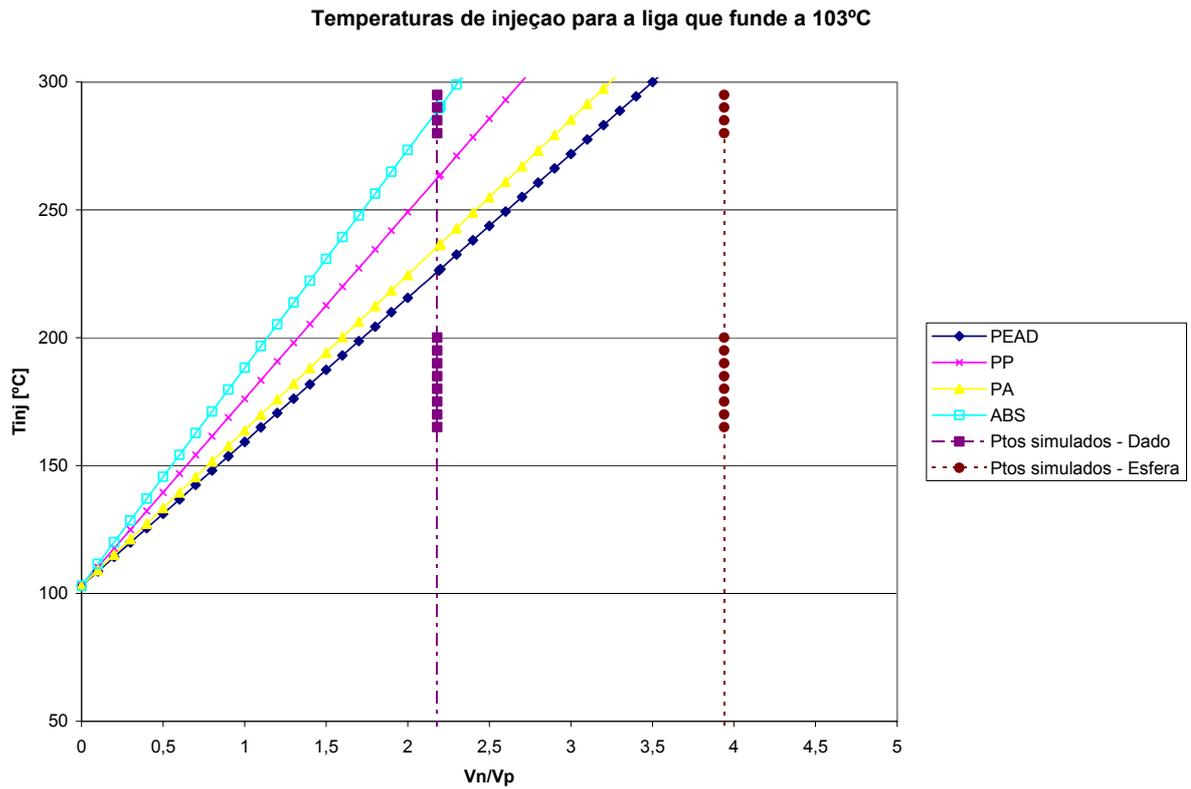


Figura 22 - Relação de volumes com temperatura de injeção para liga de 103°C

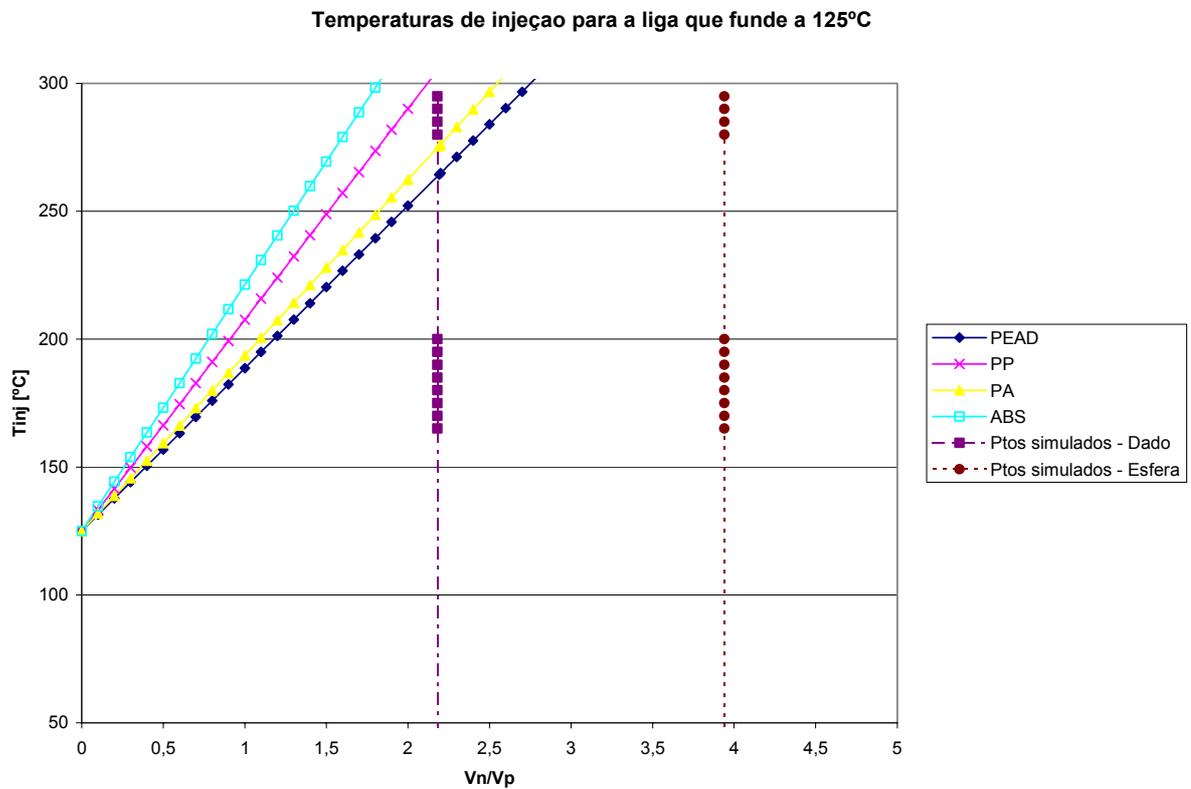


Figura 23 - Relação de volumes com temperatura de injeção para liga de 125°C

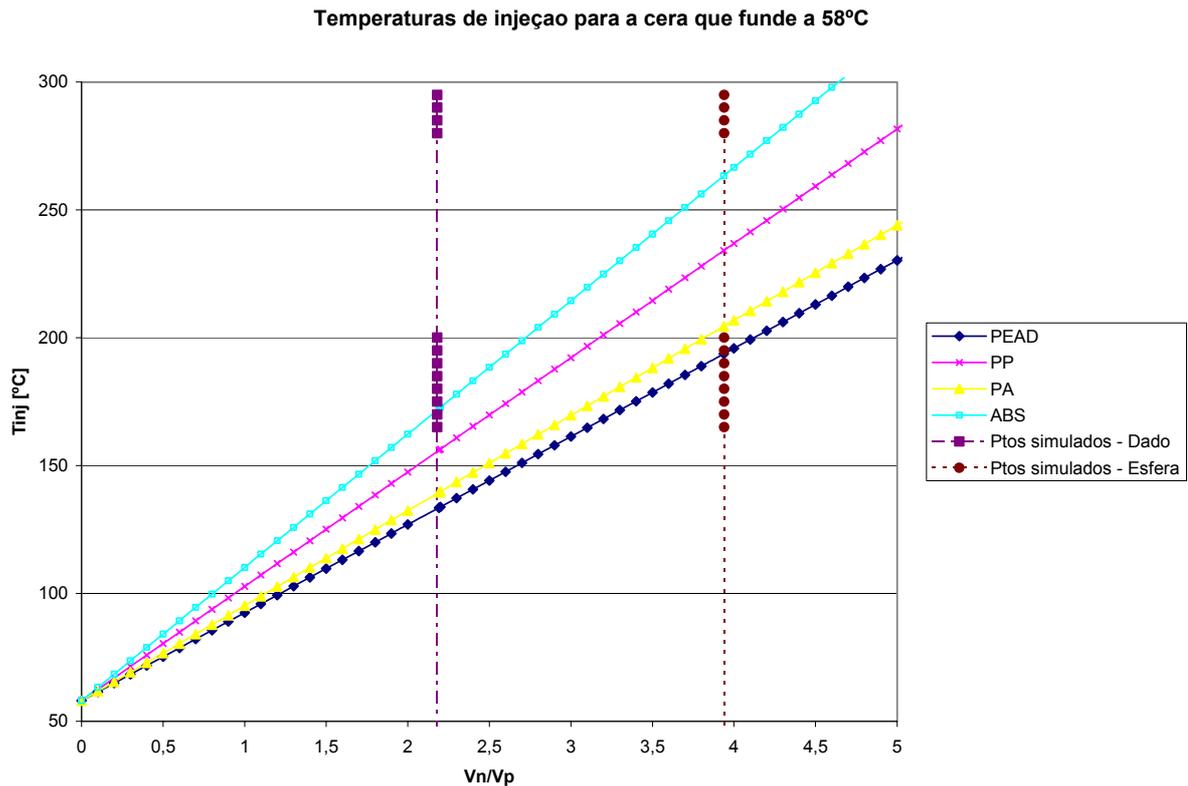


Figura 24 - Relação de volumes com temperatura de injeção para cera de microfusão

Nos gráficos apresentados estão indicadas as relações de volume referentes às peças Dado e Esfera (retas verticais), bem como os pontos referentes às condições de injeção simuladas para alguns pares materiais, empregando modelo 2D ou 3D e um pacote CAE comercial, visando validar este modelo juntamente com os experimentos práticos realizados.

Na prática, como já foi comentado, a cavidade construída com resina de estereolitografia não é adiabática, e troca calor com o molde e com o meio ambiente e a máquina (placas e sistema de refrigeração). Com isso este modelo apresentado sempre indicará uma condição (para um tempo significativamente grande) em que a relação de volumes poderia ser menor (peças maiores para um mesmo núcleo) ou, ainda, em que as temperaturas de injeção poderiam ser ainda maiores.

Se considerarmos um tempo finito, como o que acontece em um ciclo normal de injeção, por exemplo um minuto, notaremos que o calor continuará a ser trocado entre a peça e o núcleo (a peça ainda estará a uma temperatura superior à do núcleo) após a extração, até que um equilíbrio térmico seja estabelecido (trocando também calor com o meio em que forem depositados)

A bibliografia que apresenta comentários ou melhor detalhamento a respeito dos aspectos inerentes ao processamento do núcleo perdido é esparsa, porém é consenso a

afirmação de que o emprego mais difundido é o da injeção de náilon 6/6 com 30% de fibra de vidro como carga, sobre um núcleo metálico com ponto de fusão de 140°C na fabricação de coletores de admissão para o sistema de indução de ar em modernos motores de combustão interna, em função das suas características de utilização no motor, bem como as características próprias de processamento deste material por esta técnica.

Uma afirmação que chama a atenção e que talvez leve muitos pesquisadores e processadores de matéria prima a não usarem outros pares de materiais no emprego desta técnica é a afirmação de que o núcleo não funde localmente ao entrar em contato com o polímero a uma temperatura muito maior que o seu ponto de fusão, em decorrência da formação de uma camada de solidificação (*freeze-off layer*), ou seja, de uma camada de polímero que rapidamente se solidifica, sem trocar muito calor com o núcleo, agindo como uma camada rígida e isolante na qual a troca de calor é lenta e gradual e se dá a uma temperatura inferior à temperatura de fusão do núcleo.

Se esta formação de camada fosse característica única e significativa do náilon 6/6 com carga de 30% de fibra de vidro, este seria o único material beneficiado com o advento desta técnica.

O modelo matemático ora apresentado está embasado implicitamente em dois conceitos advindos do estudo da condução de calor em regime transiente, em especial o método da capacitância global (*lumped capacitance methode*)⁴⁹.

O primeiro conceito importante, o Número de Biot,

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} \quad (41)$$

nos leva a admitir que a resistência térmica condutiva no interior do núcleo é muito menor do que a resistência térmica convectiva na interface polímero/núcleo e no interior do polímero. Desta forma, a hipótese da existência de uma distribuição uniforme de temperaturas no núcleo é razoável, já que o calor flui mais facilmente no metal (R_{cond}) do que no polímero (R_{conv}).

Assim, a temperatura global do núcleo varia com o tempo, atingindo valores de equilíbrio diferentes em função das propriedades dos materiais envolvidos e da temperatura de injeção do polímero. Não tem-se, portanto, uma concentração de energia na superfície do núcleo que possa provocar uma fusão localizada.

O segundo conceito importante, que também apresenta grande validade quando do processo de simulação numérica, é o da Temperatura de Contato – T_{cont} .

Este conceito, conseqüente do estudo da transferência de calor por condução no regime transiente em um sólido semi-infinito, traz o equacionamento matemático para o

cálculo de uma temperatura aproximada da interface de contato entre dois sólidos com temperaturas significativamente distintas:

$$T_{cont} = \frac{\sqrt{k_n \cdot \rho_n \cdot c_n} \cdot T_{amb_n} + \sqrt{k_p \cdot \rho_p \cdot c_p} \cdot T_{inj}}{\sqrt{k_n \cdot \rho_n \cdot c_n} + \sqrt{k_p \cdot \rho_p \cdot c_p}} \quad (42)$$

Assim sendo, observamos que na interface de contato o que poderia ser associado com a camada de solidificação, é uma temperatura intermediária, muito mais próxima da temperatura do núcleo do que da temperatura de injeção do polímero. Esta troca de calor a uma temperatura menor reduz a taxa de transmissão de calor e permite que o polímero se solidifique na superfície do núcleo sem provocar neste a fusão.

A temperatura de contato também pode ser expressa na forma gráfica para os pares materiais que se tem interesse em estudar, como pode ser observado nas figuras abaixo.

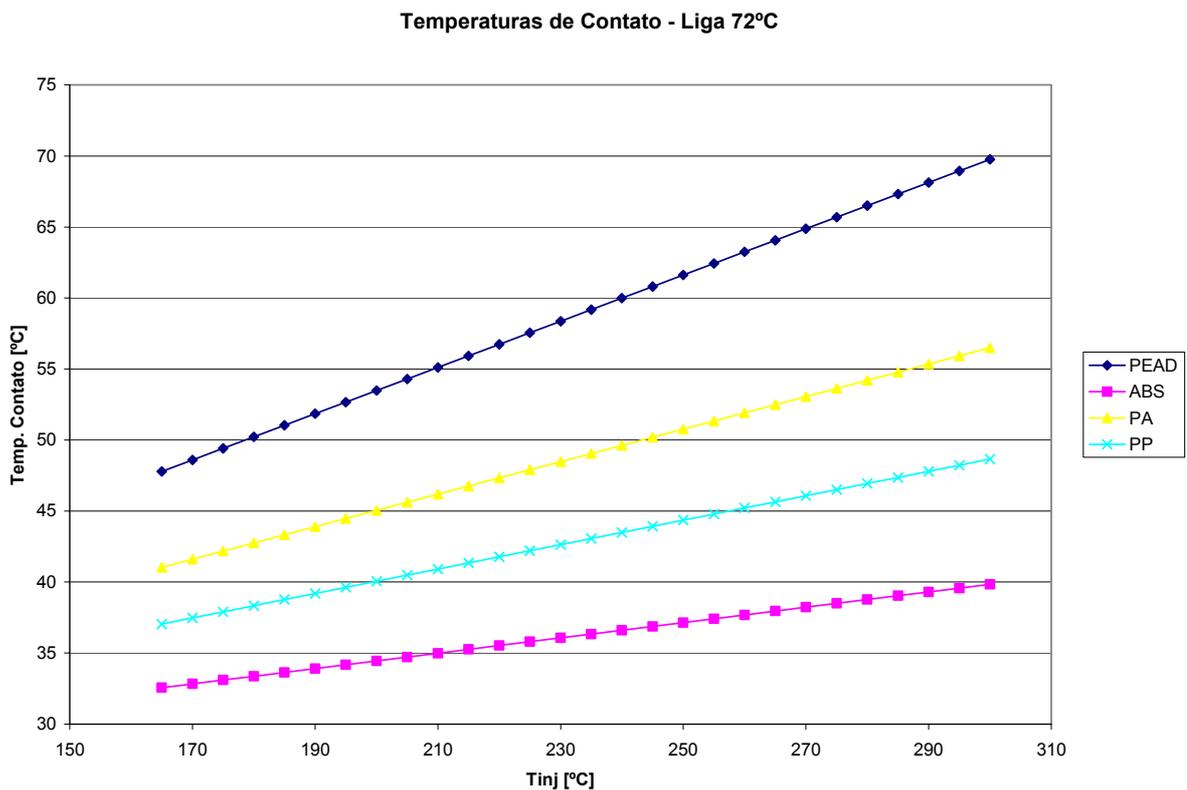


Figura 25 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a liga de 72°C

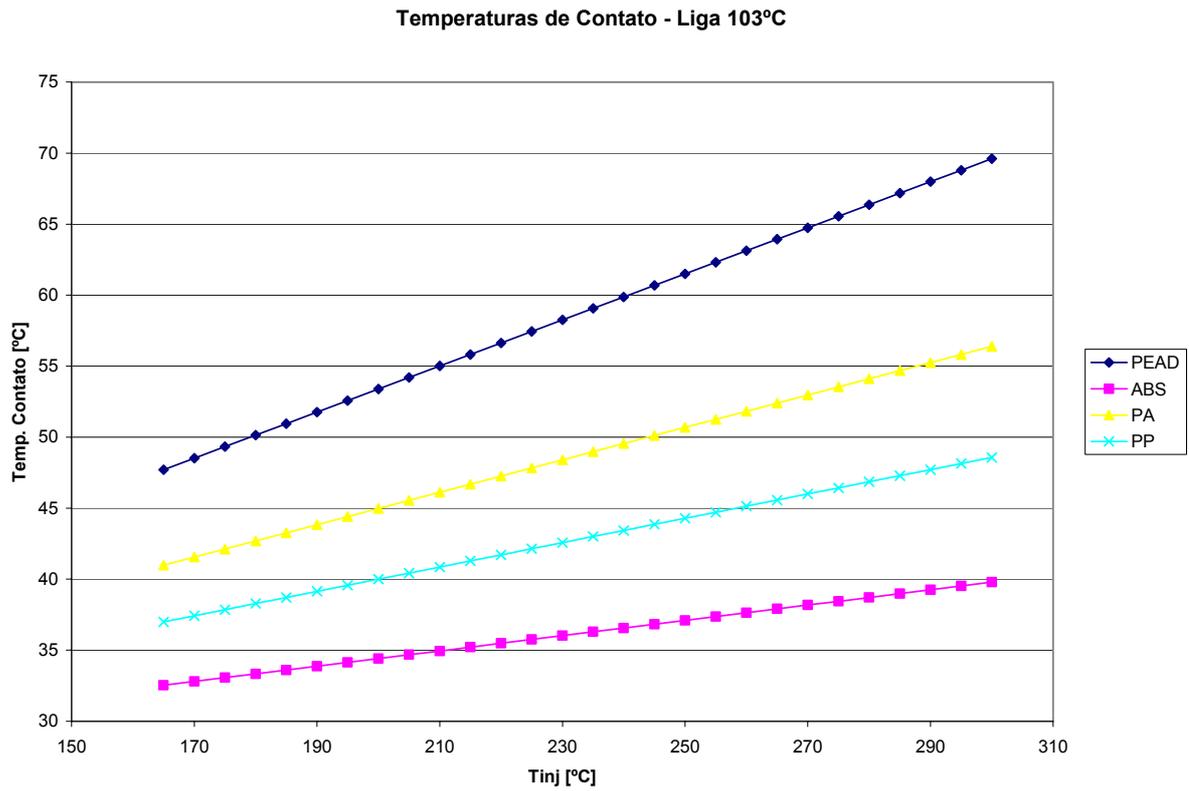


Figura 26 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a liga de 103°C

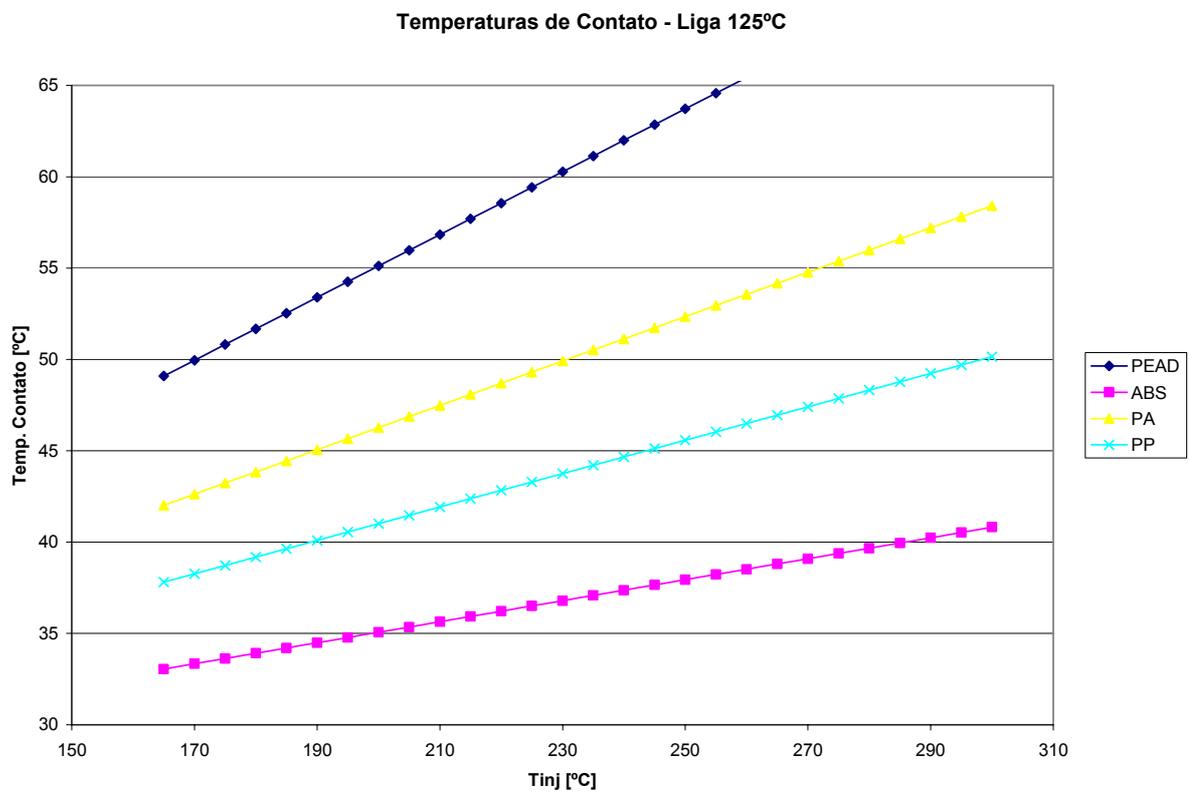


Figura 27 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a liga de 125°C

Analisando os gráficos é possível verificar que, para as temperaturas de processamento dos polímeros indicados, nas ligas metálicas selecionadas, a temperatura de contato não excede em momento algum a temperatura de fusão dos núcleos. Porém, para a cera de microfusão esta observação não é válida, já que o seu ponto de fusão é bastante baixo e a sua condutividade térmica é muito pequena. Teremos, por isso, a fusão na superfície ($Bi \gg 1$).

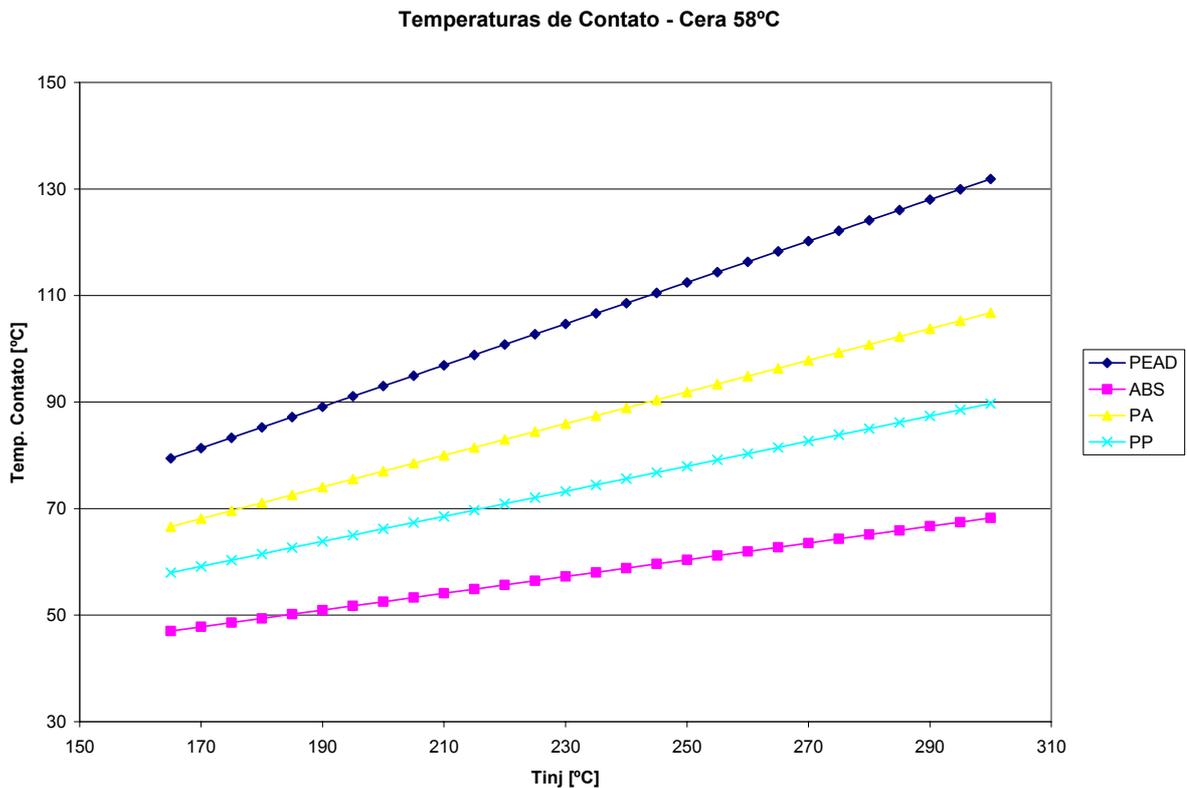


Figura 28 - Relação da T_{cont} com T_{inj} para a cera de microfusão

Esta temperatura inferior (T_{cont}) também justifica a dificuldade de se remover o calor do polímero quando da injeção, mesmo em ferramentaria convencional.

Estes dois conceitos (Bi e T_{cont}) têm sido empregados largamente no cálculo do tempo de resfriamento de componentes plásticos injetados e são de uso comum na literatura que busca um equacionamento matemático dos fenômenos envolvidos no processamento.

3.3 Seleção de ligas metálicas para a técnica do núcleo perdido

Um material a ser utilizado como núcleo não pode ser deformado, fundido ou atacado quimicamente pelo polímero durante o ciclo de injeção, e deve permanecer íntegro até a total solidificação do mesmo. Esta afirmação é válida para a moldagem por injeção em geral, independentemente do fato de o núcleo ser removido automaticamente do interior da peça durante

o processo de abertura do molde ou em etapa subsequente, através de algum processo químico, físico ou mecânico.

Apresentar propriedades térmicas que contribuam para o processo de resfriamento do moldado, facilitando a remoção de calor da peça e, também, promovendo a condução desta energia para fora do molde, são propriedades desejáveis, porém não necessárias. Poderíamos construir um núcleo (inserto) de um molde convencional de injeção em madeira (baixo condutor de calor) e, se este suportasse os esforços mecânicos, conseguiríamos injetar diversas peças.

Quando resolvemos empregar uma técnica não convencional de injeção, ou seja, uma técnica que implique em uma etapa subsequente para a remoção do núcleo, poderíamos optar pela remoção do núcleo de maneira química, mecânica ou física.

Para realizar a remoção química, é necessário encontrar um material que apresente as características de resistência para suportar o processo de injeção e que possa ser “dissolvido” por alguma substância que não reaja com o material da peça que foi injetada. Incluiremos nesta categoria, remoção por ataque biológico a algum material.

Esta solução dificilmente apresentará a possibilidade de reutilização dos materiais empregados como núcleo e “removedor”, já que ocorrerá uma reação química durante a retirada do núcleo, reação esta que provavelmente será irreversível, implicando em um consumo constante dos dois materiais.

Alguns autores apresentam a remoção mecânica do núcleo como uma solução para a remoção dos núcleos no processo de extração das peças. O mais conhecido é o “quebra-cabeças tridimensional” (*3D Puzzle*), em que em um molde de abertura simples são posicionados os elementos que atuam como núcleo para moldagem das partes internas e externas das peças. Porém a cada injeção é necessário desmontar este sistema manualmente e inserir novos núcleos, que são removidos por “desmontagem” do interior das peças, como se fosse um verdadeiro quebra-cabeças em três dimensões.

Este método de remoção mecânica dos núcleos pode ser utilizado, em ferramentaria rápida, quando houver a necessidade da fabricação de algum componente injetado que apresente detalhes perpendiculares à linha de abertura do molde. Como já foi comentado, não é usual, mesmo em pesquisa, utilizar moldes dotados de movimentos relativos para a extração de peças, em ferramentaria rápida. Isto é válido para pequenos lotes de peça, ou sistemas de baixa produtividade, já que o tempo de ciclo se torna elevado, devido ao tempo necessário para montar e desmoldar estes componentes no molde/peça.

A terceira forma de remoção do núcleo, que é empregada na técnica do núcleo perdido descrita anteriormente, é a remoção física, por fusão do material empregado no núcleo.

Na seleção do material para a confecção do núcleo perdido o fator preponderante é que este possa ser removido após a injeção do plástico na cavidade do molde. Para tanto, sua temperatura de fusão deve ser inferior à temperatura de amolecimento ou distorção ao calor do termoplástico (*Heat Deflection Temperature - HDT*).

Nos catálogos de fornecedores de polímeros encontramos normalmente as respectivas temperaturas de distorção ao calor, ao ar, nas pressões de 0,45 MPa e 1,8 MPa. Como o processo de remoção se dá em banho aquecido, em que a sollicitação mecânica é apenas o peso próprio da peça e do núcleo, é conveniente utilizar a temperatura de distorção ao calor a 0,45 MPa como referência, ou, ainda, empregar a temperatura de amolecimento.

Este material empregado para núcleo não pode reagir quimicamente com o material injetado, com as paredes da cavidade ou com o meio empregado para a sua remoção (normalmente um banho). Por fim, o material empregado deve apresentar resistência mecânica suficiente para resistir ao processo de injeção sem se deformar (deformação mecânica ou térmica).

Em princípio, a solução encontrada foi a utilização de ligas metálicas com baixo ponto de fusão para fabricar o núcleo. Entretanto, poderia ser pesquisada a utilização de outros materiais (poliméricos, compósitos, silicatos, etc.), além, é claro, do emprego de um material trivial, como o gelo.

O emprego de uma liga metálica de baixo ponto de fusão permite obter uma precisão dimensional do núcleo que pode atingir até 0,04 mm (0,0015 in)⁵⁷ por dimensão. A recuperação da liga para retornar à fabricação de núcleos pode chegar a 100%, já que não há perdas no processo. Este é um fator ambiental importante.

Com a fundição de ligas metálicas há a possibilidade de imprimir uma textura interna ao produto, produzindo um núcleo com acabamento diferenciado, o que não pode ser obtido quando empregamos areia, areia com resina, sais, ceras, gelo ou polímeros solúveis. Todos estes métodos pode apresentar algum sucesso, porém nenhum para a precisão necessária à moldagem por injeção.

Optando-se por outros materiais que não ligas metálicas de baixo ponto de fusão, teríamos de lidar com limitações: o núcleo pode provocar um acabamento superficial ruim; o núcleo pode quebrar ou mudar de forma durante a injeção de termoplásticos; pode-se ter pouca repetibilidade dimensional interna das peças; o método empregado para a fabricação dos núcleos pode não ser adequado para a fabricação em pequena escala; pouca ou nenhuma recuperação do material do núcleo pode ser possível. Além disso, pode haver problemas de meio ambiente com os materiais empregados.

A opção pelas ligas metálicas se justifica pelo fato de se buscar permanecer o mais fiel possível à técnica do núcleo perdido convencional, além de aproveitar as suas propriedades térmicas para aumentar a troca de calor no interior da cavidade dos insertos fabricados por estereolitografia.

Utilizando-se ligas metálicas deve-se atentar para as seguintes questões complementares: deve-se prever a dilatação durante a injeção no dimensionamento do núcleo; deve ser estudada a dissipação do calor da massa de injeção no núcleo e nas paredes da cavidade; para que se tenha um bom acabamento da peça injetada nas partes em contato com o núcleo, a fundição do mesmo deve ser tal que seja minimizada a rugosidade e que o acabamento seja bom.

Para selecionar ligas metálicas para a fundição do núcleo perdido, devem ser considerados ainda alguns outros fatores:

- o ponto de fusão da liga deve ser inferior à temperatura de deformação do polímero;
- se a liga é comercial (facilidade de obtenção);
- custo do material;
- características do processamento (necessidade de adição de dessulfurizantes, desoxidantes, outros elementos de liga, etc.);
- questões ambientais e de segurança do trabalho (elementos radioativos, geração de sub-produtos tóxicos, materiais cancerígenos) ;
- resistência à abrasão;
- acabamento superficial do núcleo.

Em função deste estudo, podem ser apresentados os seguintes aspectos relevantes para a escolha de uma liga metálica para o emprego em uma determinada resina:

Temperatura de injeção – temperatura do molde; temperatura de injeção da resina através dos canais de injeção; temperatura inicial do núcleo. As temperaturas do núcleo e do molde devem ser mantidas tão baixa o quanto possível, para dar ao núcleo uma maior possibilidade de sobrevivência. Normalmente os núcleos deverão estar à temperatura ambiente. A temperatura de injeção deve ser a mais baixa possível, mas ainda suficiente para promover o preenchimento e manter as características físicas da peça moldada.

Pressão de injeção – pressão durante o ciclo de moldagem; efeitos na estabilidade dimensional do núcleo; efeitos na posição do núcleo no molde. A pressão de moldagem, assim como a temperatura de injeção, deve ser a mais baixa possível, respeitando a mínima necessária para o preenchimento do molde. Se for possível empregar alta velocidade e baixa pressão, associadas a uma maior pressão de recalque, isto pode ser mais interessante, a fim de preservar os moldes construídos por estereolitografia. Os parâmetros selecionados serão

aqueles que provoquem o mínimo efeito sobre a estabilidade dimensional do núcleo e que também não provoquem uma movimentação do mesmo no interior da cavidade.

O posicionamento dos canais de injeção tem uma maior influência nestes casos. Canais inadequadamente posicionados podem provocar possibilidade de fusão localizada, além de deformação ou deslocamento do núcleo dentro do molde. O ideal é que a linha de fluxo contorne totalmente o núcleo e então se desloque axialmente ao longo do mesmo, provocando uma centragem por uniformização da pressão do molde na cavidade.

Duração do ciclo de injeção – tempo em que o moldado permanece dentro do molde; o efeito combinado da temperatura e pressão de injeção, associado à taxa de remoção de calor, vai determinar este parâmetro. Ciclos de injeção muito longos podem provocar uma elevação da temperatura do núcleo, particularmente em seções de pequena massa de liga. Este aquecimento, associado a grandes tempos de pressão de recalque, pode provocar a diminuição da resistência necessária que, sob carga, pode provocar imperfeições na peça produzida. Sendo assim deve-se empregar um tempo de recalque pequeno e o menor tempo de injeção e de ciclo possível.

Remoção do núcleo – temperatura que o plástico pode suportar sem deformação ou ocorrência de danos; tempo estimado necessário para permitir a completa fusão do núcleo; compatibilidade da resina com o meio de aquecimento. Eles são fatores relevantes quando da seleção do método para a fabricação de uma determinada peça por esta técnica. Quando não se pode escolher dentro de um espectro de materiais, talvez não seja possível fabricar o componente desta forma.

Na fase inicial dos estudos analisamos os metais puros, tendo como restrição um ponto de fusão de até 450 °C, pois entre o ponto de fusão do chumbo (Pb 327,5°C) e o do magnésio (Mg 650°C), há apenas o zinco (Zn 419,5°C) e o telúrio (Te 449,5°C).

Em seguida selecionamos todos os metais com ponto de fusão inferior ao do chumbo, sendo eles: o cádmio (Cd); o tálio (Tl); o bismuto (Bi); o estanho (Sn); o selênio (Se); o polônio (Po); o lítio (Li); o índio (In); o sódio (Na); o potássio (K); o fósforo (P); o rubídio (Rb); o gálio (Ga); o céscio (Cs); o frâncio (Fr) e o mercúrio (Hg).

Em uma análise mais detalhada, descartamos vários destes metais, pois não se enquadram com os fatores acima listados. Alguns metais são radioativos, como o céscio, outros reativos, como o lítio, alguns não possuem resistência mecânica adequada, como o potássio e o sódio, e, no caso específico do mercúrio, ele é líquido à temperatura ambiente.

Confrontados os requisitos com os materiais, concluímos que deveriam ser selecionados o chumbo (Pb), o bismuto (Bi), o estanho (Sn) e o cádmio (Cd). Não foram descartados o tálio, o selênio, o índio e o gálio, que poderiam ser utilizados como elementos

de liga, em pequena quantidade. Porém, a utilização destes materiais na forma pura não é possível, já que poucos são os polímeros que resistem a estas temperaturas de fusão sem se deformarem.

A seleção dos metais pode ser mais bem observada através da tabela abaixo.

<i>Símbolo</i>	<i>Nome</i>	T_{fus} [°C]	<i>Observações</i>	<i>Decisão</i>
Pb	Chumbo	327,5	Tóxico	Selecionado
Cd	Cádmio	320,9	Tóxico	Selecionado
Tl	Tálio	303,5		Não descartado
Bi	Bismuto	271,3		Selecionado
Pó	Polônio	254	Radioativo	Descartado
Sn	Estanho	231,9		Selecionado
Se	Selênio	217	alto custo; liga não comercial; ametal;	Não descartado
Li	Lítio	180,54	tóxico; alto custo	Descartado
In	Índio	156,61		Não descartado
Na	Sódio	97,8	alcalino; oxidante; quebradiço;	Descartado
K	Potássio	63,65	alcalino; oxidante; quebradiço;	Descartado
P	Fósforo	44,1	alcalino; oxidante; quebradiço;	Descartado
Rb	Rubídio	38,89	Alcalino	Descartado
Ga	Gálio	29,78	Oxidante	Não descartado
Cs	Césio	28,5	Radioativo	Descartado
Hg	Mercúrio	-38,87	líquido à temperatura ambiente	Descartado

Tabela 20 - Análise de viabilidade de metais puros

Como a utilização dos metais na sua forma pura não é possível, por ser a temperatura de fusão dos mesmos superior à temperatura de amolecimento de grande parte dos polímeros comerciais, optamos por fazer um estudo das ligas metálicas, ou seja de combinações de dois ou mais materiais, buscando obter uma liga com um ponto de fusão mais baixo do que os componentes individuais da mesma.

Passamos, então, a buscar informações que permitam a seleção de ligas binárias, empregando principalmente os materiais selecionados, procurando ligas com baixo ponto de fusão, com propriedades adequadas às nossas necessidades.

Em função do grande número de combinações destes materiais, e principalmente pela dificuldade de encontrar informações como diagramas de fase das ligas, pesquisamos as mais comuns, apresentadas nos manuais (*Handbooks*) de metalurgia, procuramos ligas comerciais em referências e catálogos de fornecedores, além de páginas disponíveis na rede que forneçam igualmente estas informações.

Chumbo (Pb) como base: o chumbo é um metal leve, de coloração esbranquiçada, muito maleável, dúctil, resistente à corrosão, porém um mau condutor de energia elétrica.

Atualmente grande percentual do chumbo utilizado é obtido por reciclagem e, o principal minério do qual é extraído é a galena. A principal aplicação do chumbo (60% do total) é na fabricação de baterias para veículos automotores. Das ligas comerciais que pode-se utilizar, em função dos requisitos estabelecidos, tem-se a liga Pb-Sn (ponto eutético de 183°C para 38,1% Pb em peso).

Estanho (Sn) como base: este metal foi um dos primeiros a ser trabalhado pelo ser humano, desde as tribos que habitavam a Mesopotâmia, há aproximadamente 5500 anos. Sua principal aplicação é como elemento de liga nos aços, aumentando a resistência à oxidação, sendo também muito aplicado em ligas para fundição, como com o titânio (indústria aeroespacial), e para soldagem. Das ligas comerciais que pode-se utilizar, em função dos requisitos estabelecidos, tem-se as ligas Sn-Tl (ponto eutético de 170°C para 56,5% Sn em peso); ou Sn-Ga (ponto de fusão de 175°C para 80% Sn em peso).

Índio como base: este elemento recebeu o nome devido à coloração azul índigo de seu espectro; é um metal semi-precioso, maleável, um sub-produto dos minérios donde são extraídos o zinco e o estanho. Sua comercialização começou há menos de 100 anos, em ligas que podem chegar a 99,9999% de pureza. Tem importantes aplicações na soldagem e na eletro-eletrônica. Das ligas comerciais que pode-se utilizar, em função dos requisitos estabelecidos, tem-se: In-Sn (ponto eutético de 117°C com 52% In em peso) e In-Pb (apresenta dois pontos eutéticos 159°C e 173°C, ambos com menos de 20% Pb em peso).

Bismuto como base: o bismuto é um metal prateado, que vem substituindo o chumbo em inúmeras aplicações. O bismuto é pesado, atóxico, não cancerígeno e possui um baixo coeficiente de dilatação térmica, sendo comercializado geralmente como aditivo em ligas de aço, alumínio, cobre e bronze. Das ligas comerciais que pode-se utilizar, em função dos requisitos estabelecidos, tem-se: Bi-In (ponto eutético de 110 °C com 67% Bi em peso); Bi-Sn (ponto eutético de 139°C com 57% Bi em peso); Bi-Pb (ponto de fusão de 138°C para 58% Bi, conhecido comercialmente como cerrotro) e, ainda, a liga eutética com ponto de fusão de 125°C constituída de 56,5% de Bi e 43,5% de Pb, comercializada no Brasil pela Softmetals.

A seleção das ligas binárias pode ser mais bem compreendida consultando-se a Figura 29.

ligas binárias	Tl*	Bi	Sn	Se*	In**	Ga*
Pb	ponto eutético de 380°C	CERROTRU ponto eutético de 132°C	ponto eutético de 183°C para 38,1% Pb em peso	ponto eutético superior a 1000°C	pontos peritéticos - 159°C e 173°C, %Pb<20 em peso	ponto eutético superior a 900°C
	Tl*	ponto eutético sempre > 182°C	p.e. de 170°C para 56,5% Sn em peso	desconsiderado	desconsiderado	desconsiderado
		Bi	ponto eutético de 139°C com 57% Bi em peso	ponto eutético superior a 700°C	ponto eutético de 110°C com 67% Bi em peso	pontos peritéticos de 225°C e 271°C
			Sn	ponto peritético de 650°C	ponto eutético de 117°C com 48% Sn em peso	para 80% em peso de Sn, fusão a 175°C
				Se*	desconsiderado	desconsiderado
					In**	desconsiderado
						Ga*

* somente como elemento de liga

** o índio tem alto custo, deve ter percentagem máxima de aproximadamente 50%

Figura 29 - Combinação de elementos nas ligas binárias

Poderiam ser utilizadas inúmeras ligas compostas por dois ou mais elementos, de acordo com os critérios selecionados, porém a obtenção das propriedades físicas destas ligas, bem como seus diagramas de fase ou pontos eutéticos, dependem de uma grande gama de ensaios e análises, nem sempre disponíveis. Se diagramas de fase para ligas binárias de baixo ponto de fusão já são raros, pode-se dizer que diagramas para ligas ternárias e quaternárias são impossíveis de encontrar. A Tabela 21, reproduzida da obra de Wassink⁵⁸, apresenta a composição para diversos pontos de fusão, empregando os elementos selecionados neste estudo.

<i>Ponto de Fusão [°C]</i>	<i>Composição em percentual de massa [%]</i>					<i>Outros</i>	<i>Nome</i>
	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>	<i>Bi</i>	<i>In</i>	<i>Cd</i>		
16				24		76 Ga	
20	8					92 Ga	
25						95 Ga; 5 Zn	
29,8						100 Ga	
46,5	10,8	22,4	40,6	18	8,2		
47,2	8,3	22,6	44,7	19,1	5,3		
58	12	18	49	21			
61	16		33	51			
70	13,1	27,3	49,5		10,1		Lippowiz
70-74	12,5	25	50		12,5		Wood
72,4			34	66			
79	17		57	26			
91,5		40,2	51,7		8,1		
93	42			44	14		
95	18,7	31,3	50				Newton
96	15,5	32	52,5				
96-98	25	25	50				d'Arcet
103,0	26		53,5		20,5		
96-100	20	30	50				Onion
96-110	22	28	50				Rose
117	48			52			
125		43,5	56,5				
127,7				75	25		
139	43		57				
144		62		38			
145	49,8	32			18,2		
156,4				100			
170	57					43 Tl	
176	67				33		
178	62,5	36				1,5 Ag	
180	63	34	3				
183	61,9	38,1					

Tabela 21 - Ligas de baixo ponto de fusão, conhecida a base dos elementos selecionados

O estudo das ligas ternárias e quaternárias foi feito basicamente pelo estudo dos catálogos de fornecedores, em especial aqueles que apresentavam outras propriedades que necessitamos para o modelamento do processo.

Muitas ligas que estão disponíveis em fornecedores internacionais poderiam ser empregadas neste estudo, porém o custo de aquisição das ligas associado ao transporte e desembaraço deste material as tornava impraticáveis.

Buscando junto a fornecedores nacionais, o espectro de ligas de baixo ponto de fusão disponível se mostrou bastante reduzido, porém foi possível selecionar ainda assim algumas ligas que se apresentaram adequadas para o estudo proposto.

Optamos por empregar o bismuto como base, já que este é atóxico e apresenta boas características de processamento, como já descrito anteriormente.

A liga ternária composta por 53,5% Bi, 25,9% Sn e 20,1% Cd, com ponto eutético de fusão de 103°C, fornecida pela Softmetals, foi também selecionada.

Dentre as ligas comerciais existentes, e das quais se possuía as propriedades termo-químicas, a mais conhecida comercialmente é a Wood (50%Bi; 25%Pb; 12,5%Sn e 12,5%Cd, com ponto de fusão de 70 a 72°C), também fornecida no Brasil pela Softmetals (há algumas diferenças relativas ao ponto de fusão em relação à bibliografia disponível, em função do controle de outros elementos de liga no processo).

A decisão sobre quais ligas seriam utilizadas a priori, baseou-se em dois fatores: possibilidade de aquisição do material (em lingotes, barras ou pó) no mercado nacional e de serem conhecidas as suas propriedades físicas. O escalonamento se deu em função do ponto de fusão, para permitir uma gama de combinações de núcleos e resinas com temperatura de deformação mais baixas. As composições das ligas empregadas podem ser observadas na Tabela 22. Há diferença entre os pontos de fusão de uma fonte para outra, em função do controle das impurezas no processo de fabricação das ligas.

<i>Liga</i>	<i>Bi [%]</i>	<i>Sn [%]</i>	<i>Pb [%]</i>	<i>Cd [%]</i>	<i>T_{fus} [°C]</i>
Liga 1 – BI51.W88	50	12,5	25	12,5	70 – 72
Liga 2 – BI54.W88	53,9	25,9		20,2	103
Liga 3 – BI58.W01	55,5		44,5		125

Tabela 22 - Composição química das ligas empregadas no estudo⁵⁹

O emprego da técnica do núcleo perdido deve ser restrito a peças que apresentem certas características. Para selecionar as que são mais se adequadas é preciso considerar inicialmente que existem quatro áreas básicas que governam os parâmetros de projeto, e então verificar, através do modelo matemático proposto, se será possível a injeção:

A forma externa – a principal consideração para facilitar o processo é tentar remover todos os detalhes e reentrâncias que requeiram partes do molde com movimento relativo. Um detalhamento cuidadoso nos estágios iniciais deste processo irá economizar muito tempo e dinheiro no processo de projeto da ferramenta.

A forma interna – novamente, para o projeto da forma interna das peças, é interessante minimizar o número de linhas de partição.

Escolha da resina – a escolha da resina deve ser tal que permita a fabricabilidade da peça mas com duas observações que são: ser compatível com o meio de retirada do núcleo

(normalmente polietilenoglicol) e a disponibilidade de uma liga que apresente uma janela de processamento para a injeção e para a remoção.

Espessura de parede – a espessura de parede deve ser uniforme em toda a peça, mas algumas vezes a geometria da peça ou o comprimento do caminho de fluxo podem indicar a necessidade do uso de canais de fluxo para auxiliar no perfil de preenchimento. Em peças complexas a movimentação do núcleo na cavidade pode ser antecipado e o uso de canais de fluxo pode ajudar a estabilizar a posição do mesmo.

Além das considerações gerais de projeto para as peças, devemos ainda atentar, no uso da técnica do núcleo perdido para:

Geometria do núcleo – a geometria interna (da peça) deve ser revisada para assegurar que não existam pequenos diâmetros e que seções finas e estreitas não existam. O material que preenche regiões de diâmetro reduzido tende a derreter durante a moldagem por injeção e seções longas poderiam também estar sujeitas a deflexão e/ou fusão durante a moldagem por injeção.

Múltiplos núcleos – em múltiplas ocasiões, devido à complexidade interna das peças, não é possível fabricá-las com um núcleo único. Múltiplos núcleos são relativamente fáceis de projetar e podem ser dimensionados para serem montados por encaixe, como uma montagem anterior ao seu posicionamento na cavidade. Uma alternativa é também o emprego de núcleos simples e núcleos montados para atingir os resultados desejados. O emprego de núcleos externos também é particularmente útil em protótipos de moldes para economizar na construção de componentes complexos evitando gavetas nos moldes.

Fabricação dos núcleos – um aspecto importante na fabricação dos núcleos é o posicionamento dos mesmos na cavidade de fundição para assegurar qualidade superficial e precisão dimensional. Com este posicionamento adequado, que deve ser determinado já nos estágios iniciais do processo, evitaremos defeitos como ar aprisionado, falta de preenchimento e marcas dos canais (e massalotes) de alimentação.

Número de apoios do núcleo – em algumas peças técnicas não existem orifícios suficientes no componente injetado para que se construam apoios para os núcleos, ou então não há, no local ideal, um orifício com as características que permitam o suporte e fixação do núcleo durante o processo de injeção. Normalmente os projetistas das peças ou o consumidor final do componente estarão dispostos a fazer concessões de pontos a serem “fechados” posteriormente por soldagem, colagem, encaixe ou outra solução, de forma a permitir o emprego da técnica do núcleo perdido na fabricação do componente.

Fusão e retirada do núcleo – esta etapa é muito importante no projeto do sistema peça/núcleo, pois o ideal seria que o componente pudesse ser suspenso em uma posição angular tal que permita que todo o metal líquido possa ser drenado do interior da peça, e que todo o líquido do banho possa ser removido da peça quando esta for levada para a estação de limpeza e verificação. Qualquer tipo de retenção de metal ou de banho irão implicar na necessidade de se agitar ou girar a peça para a total remoção de material do núcleo.

3.4 Discussão

Conceitos físicos de temperatura, calor, mudança de fase, transferência de calor devem ser lembrados e bastante bem assimilados para que se possa compreender a fundo a relação entre os elementos núcleo e polímero durante o processo de injeção. Não se pode admitir deixar-se levar pela intuição e afirmar que, ao injetarmos um polímero sobre um núcleo a uma temperatura duas vezes maior que a temperatura de fusão do mesmo, este virá a se fundir imediatamente (e totalmente).

É preciso estudar a fundo principalmente a transferência de calor envolvida na moldagem por injeção, estudo esse que deve ser feito em dois pontos específicos: a máquina injetora, responsável pelo aquecimento e pressão de injeção; e o molde, que, além de dar forma ao moldado e resistir aos esforços mecânicos envolvidos, é o principal agente no resfriamento da peça injetada, influenciando diretamente o processo, seja em termos de precisão dimensional, seja em termos de tempo de ciclo.

Ao analisar a literatura disponível, bem como ao comparar os métodos gráficos, matemáticos e numéricos para dimensionamento e verificação dos sistemas de refrigeração, vemos que muitas vezes nos deparamos com resultados que não representam exatamente a realidade, já que os “contratiposⁱⁱⁱ” para as resinas em estudo não estão disponíveis, ou então as propriedades de que dispomos não foram levantadas para a amostra que estamos processando, que os valores tabelados são genéricos para uma classe de materiais. Não é por este motivo que deixamos de empregá-los como linhas mestras para a definição de canais de refrigeração, canais de injeção, etc.. Tem-se, sim, de saber as limitações destes métodos e empregá-los com cautela.

A transferência de calor em moldes construídos pelo processo da estereolitografia, sejam eles maciços; preenchidos internamente por algum material termocondutor ou não; preenchidos com material termocondutor e ainda com canais de circulação de fluido refrigerante; moldes com canais de refrigeração incorporados (*conformal cooling*),

ⁱⁱⁱ Contratipo – polímero cadastrado no banco de dados do sistema CAE, do qual as propriedades são semelhantes ao que se deseja simular

construídos na própria casca de estereolitografia e, ainda, moldes nos quais são construídos canais de fluxo de calor para permitir uma melhor refrigeração em alguns pontos do moldado relativamente a outros, tem sido objeto de estudo dos pesquisadores que trabalham com ferramentaria rápida, desde o seu início.

Ainda não há um consenso a respeito de qual é o mais eficiente, ou o mais adequado, porém são muitos os autores que já apresentam modelos representativos da transferência de calor nestes processos, que permitem determinar o tempo de resfriamento do moldado e avaliar o aquecimento da resina que compõe a cavidade, para verificação, principalmente, da sua fragilização em função do aumento de temperatura.

A literatura disponível até o momento não apresenta um modelo matemático para a representação da transferência de calor em moldagem por injeção utilizando a técnica do núcleo perdido, mas os modelos convencionais, dentro de certos limites, também podem ser empregados. A grande diferença está no fato de que a cada ciclo de injeção é inserido no sistema em análise um novo núcleo mantido a uma temperatura inicial que independe do processo de injeção em andamento (a temperatura inicial do núcleo não é função do número de ciclos de injeção já realizados).

O modelo matemático, desenvolvido neste estudo, contrasta a relação de volumes do núcleo e da peça (ou a relação de raios na esfera e cilindro ou espessuras equivalentes de parede) com uma relação de propriedades dos materiais envolvidos, indicando a possibilidade de fusão do núcleo.

É sabido que este modelo apresenta simplificações e limitações, porém estas foram selecionadas para a segurança do processo. Com o mesmo é possível determinar quais opções de núcleo/polímero/temperatura de injeção podem ser utilizadas para a injeção de uma determinada peça, de forma a não haver fusão do núcleo.

Ele pode ser empregado na forma de solução de equações para determinar se dada liga irá fundir se por sobre ela for injetado um dado polímero a uma certa temperatura ou ainda na forma de gráficos, com que pode-se determinar rapidamente, para cada relação de volumes (ou raios ou espessuras em cada local da peça), a máxima temperatura de injeção.

O Número de Biot e a Temperatura de Contato são grandezas também empregadas em outros modelamentos matemáticos que corroboram as simplificações adotadas no modelo, servindo de guia para o emprego do mesmo.

A seleção de ligas metálicas a base de bismuto para emprego na técnica do núcleo perdido se deu em função dos fatores expostos, porém é importante ressaltar que outras ligas poderiam ser empregadas, se as propriedades das mesmas forem da mesma ordem de grandeza das selecionadas para este estudo. O grande problema é a obtenção das ligas e

obtendo as ligas, a determinação de suas propriedades, com um grau de segurança significativo.

A seleção de ligas para emprego na técnica do núcleo perdido leva em conta que as ligas de baixo ponto de fusão apresentam tipicamente um valor de calor latente de fusão elevados; estas ligas tem tipicamente altos coeficientes de condutividade térmica; a massa de resina injetada é normalmente pequena, se comparada com a massa do núcleo; a resina sendo injetada em grande velocidade, recobre o núcleo metálico com uma fina camada que quase imediatamente começa a solidificar, e assim promove uma camada isolante em torno do núcleo.

A combinação dos fatores físicos da liga do núcleo permitem que o núcleo absorva uma grande quantidade de calor, dissipando-a rapidamente no seu interior, e como o calor latente de fusão é elevado, isto promove uma estocagem suficientemente grande de energia, que previne a fusão do núcleo.

O núcleo será escolhido para suportar o meio de moldagem por injeção do termoplástico sem degradação e de forma que o plástico resista à fusão do núcleo sem degradação.

O núcleo deverá ter apoios, quanto mais numerosos e maiores, melhor será, já que com isso aumenta ainda mais a relação V_n/V_p .

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA À TÉCNICA DO NÚCLEO PERDIDO

O Capítulo inicia com a descrição da tecnologia empregada na simulação numérica do problema, através do uso de pacote computacional CAE. São discutidos aspectos técnicos e simplificações adotadas. Por fim são apresentados os resultados obtidos com diversos tipos de simulação e a comparação com os experimentos realizados.

4.1 Simulação numérica – sistemas CAE

Simular significa fazer parecer real; reproduzir, representar ou imitar, com o auxílio de um sistema computacional, as características e a evolução de fenômeno, situação ou processo concretos⁶⁰. Simular é submeter modelos a ensaios, sob diversas condições, para observar como eles se comportam. Assim, avalia-se a resposta que deve ser esperada do sistema físico que se quer representar.

A simulação, o ato de simular, pode envolver protótipos ou modelos submetidos a ambientes físicos reais. No caso particular de modelos matemáticos, eles são submetidos a distúrbios matemáticos para avaliar a condição de serviço esperada.

Simulação numérica (ou computacional) é a experiência ou ensaio constituído por uma série de cálculos numéricos e decisões de escolha limitada, executados de acordo com um conjunto de normas preestabelecidas e apropriadas à utilização de computadores.

É conveniente lembrar que, para simular um sistema físico em operação, quer por experimentação em laboratório ou em campo, quer através de formulações matemáticas, é necessário que sejam adotadas hipóteses simplificativas desta realidade física.

Com a simulação consegue-se a reprodução, em condições diferentes das reais, do funcionamento de um determinado sistema. Isto permite a comparação de diferentes soluções sem incorrer nas despesas, demoras e riscos, algumas vezes proibitivos, em geral inevitáveis, nos ensaios em verdadeira grandeza, sob condições reais⁶¹.

A simulação matemática de um sistema físico, usando a modelagem matemática, é um instrumento de previsão muito útil, em que as características essenciais dos elementos idealizados são descritas por símbolos matemáticos. Neste caso, distúrbios nas variáveis envolvidas nas equações simulam o comportamento do sistema representado. Isto fornece um modelo de previsão tipo entrada-saída, em que são introduzidos os dados iniciais e obtido, na saída, o resultado final. Pode-se classificar este tipo de simulação como sendo simbólica. Um

exemplo de simulação matemática empregada é o modelo desenvolvido no Capítulo 3, para a previsão da fusão do núcleo, dada uma temperatura de injeção.

O computador permite a simulação de vários casos com diferentes formas de solicitação e geometria, com relativa simplicidade e maior flexibilidade, com respostas rápidas às necessidades do consumidor e o conseqüente aumento da produtividade por parte das empresas.

O incessante crescimento da velocidade de processamento dos computadores, bem como sua capacidade de armazenamento, vem tornar possível, recentemente, a análise numérica de fenômenos físicos cada vez mais complexos e variados⁶².

A simulação numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor, ou Dinâmica dos Fluidos Computacional, também conhecida como CFD –*Computational Fluid Dynamics*, teve um desenvolvimento impressionante nos últimos 20 anos, inicialmente como ferramenta para análise de problemas físicos em nível de investigação científica, e, atualmente, como uma ferramenta poderosa para a solução de importantes problemas aplicados da engenharia⁶³.

Este trabalho de tese vem demonstrar a utilização da simulação numérica como uma ferramenta de análise, certificando que o uso desta ferramenta, quando empregada de forma correta e específica, gera resultados que traduzem em muito a situação real do problema, e portanto podem ser considerados seguros e precisos.

As simulações numéricas se iniciam com as simplificações em relação ao sistema físico real, a modelagem matemática, a metodologia numérica, o pré-processamento como o dimensionamento da geometria e a criação de malhas, o estudo da malha realizado, visualização das condições de contorno utilizadas para a resolução do problema, e seguem até a etapa de pós-processamento, com a visualização dos gradientes de temperatura e análise crítica dos dados produzidos pelo programa escolhido, neste caso o Ansys 5.7, disponível na UFSC, para este estudo.

Para validar o modelo matemático apresentado no Capítulo 3 foram empregadas duas estratégias: primeiramente um modelo numérico de simulação, que nos permite uma melhor previsão em relação a um tempo finito (o modelo matemático considera tempo de equilíbrio que tende ao infinito); e, em segundo lugar, a aplicação das condições simuladas em experimentos práticos, apresentadas no Capítulo 5.

4.1.1 Métodos de elementos finitos

O método dos elementos finitos, desenvolvido ao longo das três últimas décadas, juntamente com o desenvolvimento e acessibilidade dos meios computacionais, tornou-se a ferramenta mais poderosa para a análise de problemas estruturais no meio técnico e científico⁶⁴.

Embora a bibliografia sobre o método seja bastante extensa, normalmente são dirigidas para um público com conhecimentos mais aprofundados sobre a mecânica estrutural e determinados tópicos matemáticos e numéricos. A falta de conhecimento teórico sobre estes assuntos, como também da própria formulação do método, conduz muitos engenheiros experientes, como usuários de programas baseado no Método de Elementos Finitos, a erros grosseiros comprometendo seriamente a análise, principalmente de problemas complexos⁶⁴.

Todo fenômeno físico da natureza pode ser avaliado com algum grau de precisão, desde que o modelo físico-matemático adotado para representá-lo, descreva adequadamente o comportamento que se quer analisar.

De uma forma geral, um modelo pode ser expresso por meio de uma ou mais equações diferenciais ou integrais. Através da solução das equações formuladas pode-se encontrar as relações de comportamento entre as diversas variáveis envolvidas no problema.

O método de elementos finitos é uma ferramenta numérico-computacional utilizada para a solução aproximada de equações diferenciais. Sendo assim, verifica-se que o mesmo pode ser aplicado a quase todas as áreas da engenharia. Além da área de estruturas (de onde o método se originou), pode-se aplicá-lo em transferência de calor, escoamento de fluidos, lubrificação, campos elétricos e magnéticos, e muitos outros.

Nem sempre é possível encontrar uma solução analítica exata para as equações diferenciais representativas dos fenômenos. Sendo assim, se faz uso de hipóteses simplificativas do modelo em análise, o que o torna mais simples em sua descrição e conseqüente solução. Isto nem sempre resolve, pois, alguns fenômenos importantes deixam de ser representados quando se processa tal simplificação⁶⁵.

Outra solução é a utilização de métodos aproximados, sejam analíticos (expansão em séries, resíduos ponderados, Rayleigh-Ritz, etc) ou numéricos (método dos elementos finitos, diferenças finitas, elementos de contorno, etc.). Os métodos analíticos aproximados podem resolver um grande número de problemas, porém, quando os mesmos se tornam mais complexos e trabalhosos, a utilização desta técnica torna-se quase inviável. A obra de Shih⁶⁶ apresenta um melhor detalhamento destes métodos.

No seu trabalho, Mendonça⁶⁷ apresenta o método e sua aplicação a problemas bi- e tri-dimensionais de transmissão de calor envolvendo condução e convecção em problemas estacionários e transientes. Neste trabalho são deduzidas as expressões para a Lei de Fourier e a primeira Lei da Termodinâmica, de forma a obter as equações diferenciais do problema, com as devidas condições de contorno. Mendonça apresenta ainda as formas integrais através dos resíduos ponderados. Apresenta, por fim, a discretização do problema para a transmissão do calor em corpos bidimensionais.

4.1.2 Simulação do processo de injeção no *Moldflow*

Atualmente, pode-se descrever com muita precisão o comportamento de fenômenos altamente complexos, graças à sofisticação dos algoritmos numéricos, aliada à grande capacidade de armazenamento e processamento, de sistemas computacionais. O melhor exemplo disto, segundo Bernhardt⁶⁸ é a moldagem por injeção, pois pode-se fácil e rapidamente, a partir de um modelo geométrico CAD, em uma ferramenta CAE como o Moldflow, determinar as condições ideais de injeção para um componente.

A utilização de um programa computacional apropriado para simular numericamente o processo de injeção é útil para obter uma avaliação inicial dos seus resultados. Através desta análise preliminar, os valores dos parâmetros do processo que serão utilizados na prática podem ser estabelecidos de maneira aproximada, diminuindo assim o tempo de preparação da máquina e a margem de erro do operador. Em outras palavras, os resultados encontrados poderão ser utilizados como ponto de partida para determinar os parâmetros ótimos de injeção ou para sugerir alterações no projeto da peça ou do inserto, quando for necessário¹⁹.

O trabalho de Ribeiro Jr.¹⁹ apresenta de forma bastante detalhada a sistemática para a simulação numérica do processo de injeção de termoplásticos em moldes de estereolitografia. A Figura 30, abaixo, retirada deste trabalho resume bem todas as etapas do processo, com suas entradas e saídas.

É preciso lembrar que para as simulações numéricas em geral, a complexidade do modelo CAD é diretamente (se não exponencialmente) proporcional ao tamanho da malha de elementos finitos necessária para a representação da peça. Também é necessário lembrar que quanto maior a malha, maiores são as matrizes representativas e maior também será o tempo para se obter os resultados.

Neste trabalho de pesquisa fizemos o uso do pacote comercial Moldflow, disponível no Laboratório Cimject, para determinar as condições iniciais de processamento das peças escolhidas para o estudo.

Foram simuladas as duas peças escolhidas, Dado e Esfera, com os materiais disponíveis no banco de dados do sistema, que mais se aproximavam dos materiais que utilizamos nos experimentos. Os “contratipos” específicos não estavam disponíveis.

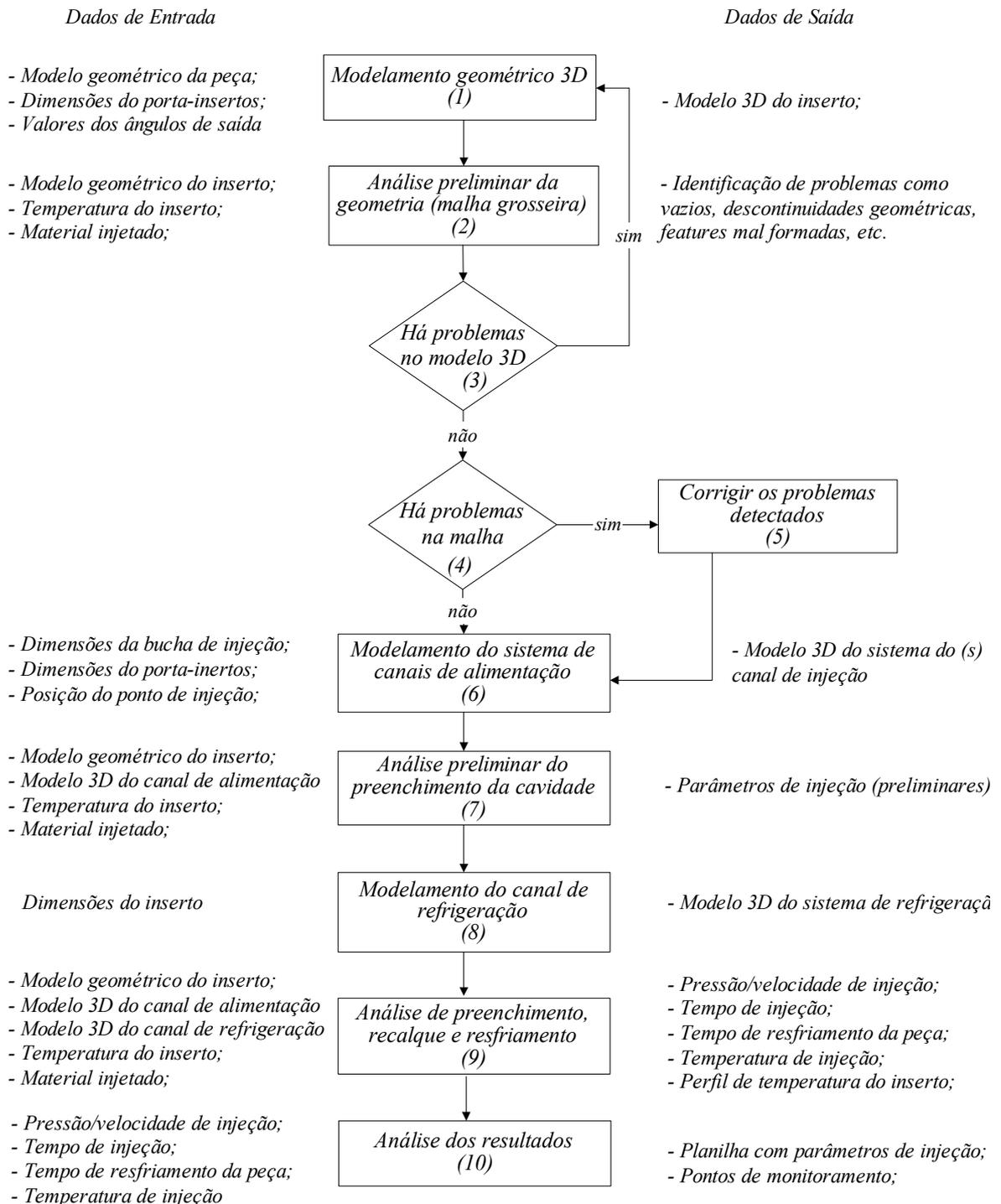


Figura 30 – Simulação do processo de injeção em insertos SL utilizando ferramentas CAE¹⁹

A Figura 31, abaixo, apresenta esquematicamente algumas telas de resultados encontrados na simulação da peça Dado. As informações como temperatura e pressão de injeção foram necessárias para o emprego nas simulações subseqüentes no Ansys, e também

foram empregadas como parâmetro inicial para o processo de moldagem na máquina injetora. Os pontos mais quentes próximos à superfície do núcleo foram monitorados.

As informações de formação de ar aprisionado e de linhas de solda são determinantes de necessidade de alteração no projeto da cavidade, com a variação de alguns parâmetros de projeto. Por exemplo, a variação da espessura do moldado em algum ponto pode servir para que se evite a ocorrência destes problemas no produto moldado.

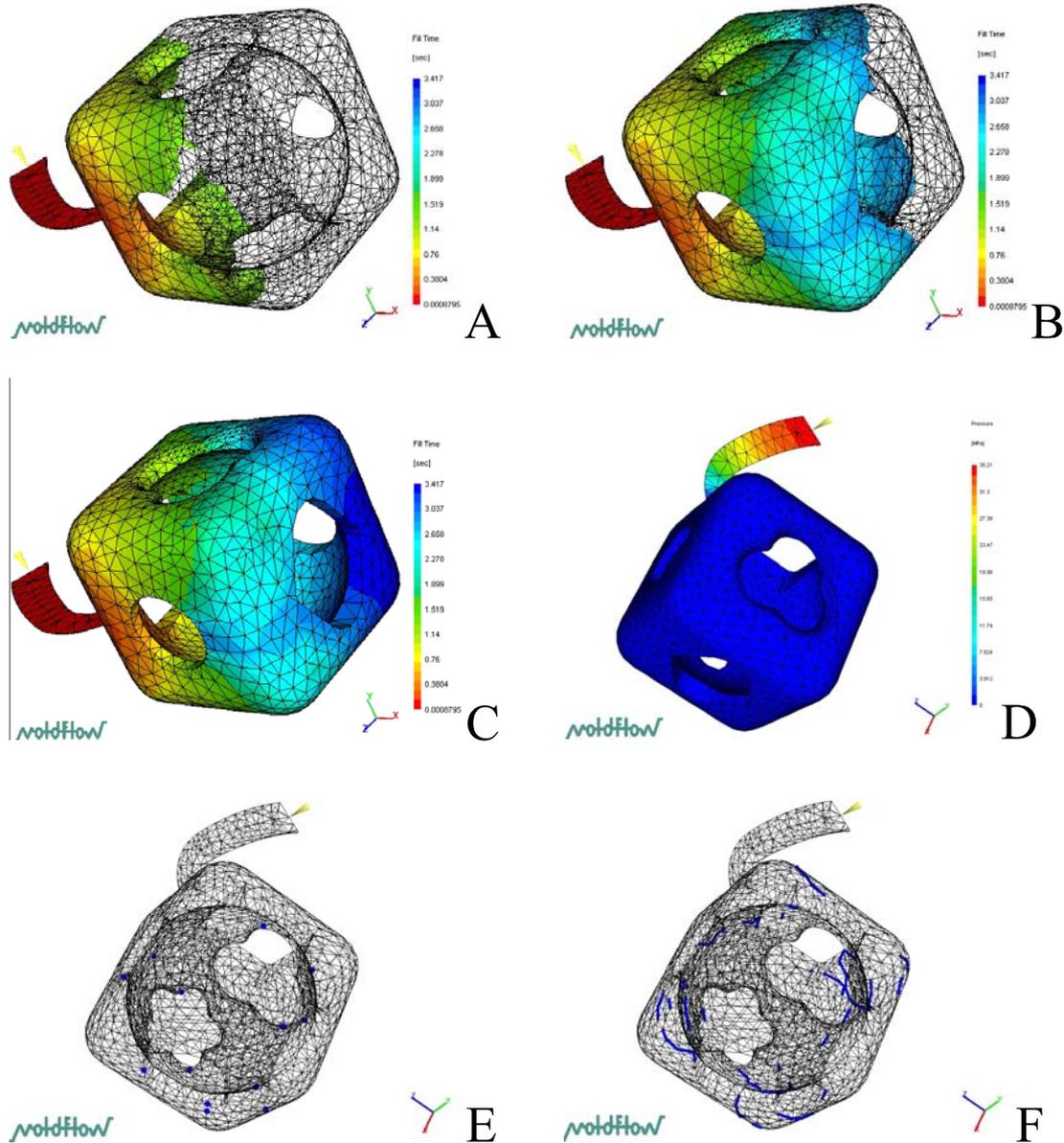


Figura 31 - Análise de preenchimento, tempo de injeção, pressão máxima, ar aprisionado e linhas de solda, utilizando o CAE Moldflow

(A-fill time de 1 s; B-fill time de 2 s; C-fill time de 3.417 s; D-Pressão de 35.21 MPa; E-Ar aprisionado; F- Linhas de solda a frio)

4.1.3 Análise térmica no Ansys

Em uma análise térmica o Ansys calcula a distribuição de temperaturas e dos demais fenômenos de um sistema ou componente. Os fenômenos físicos típicos de interesse para a realização de análises são: a distribuição das temperaturas, a quantidade de calor ganha ou perdida; os gradientes térmicos e os fluxos térmicos.

A base da análise térmica no Ansys é a equação de equilíbrio de calor obtida do princípio da conservação da energia. A solução obtida através deste programa pelo método de elementos finitos calcula as temperaturas nodais, e utiliza estas para obter os valores para os outros fenômenos envolvidos na análise.

Utilizando este programa, pode-se optar por dois tipos de análise térmica, que são:

- a análise de regime permanente, que determina a distribuição de temperaturas e dos outros fenômenos envolvidos sob condições de carregamento estáticas no tempo. Uma condição de carregamento estática é aquela em que os efeitos da variação de armazenamento de calor em um período de tempo podem ser ignorados.

- a análise térmica transiente, que determina a distribuição de temperaturas e de outros fenômenos envolvidos em situações em que as condições variam em um período de tempo.

Aplicações de engenharia, como a análise de preenchimento ou de refrigeração em um molde de injeção envolvem uma análise térmica transiente.

A grande diferença entre as análises térmicas em regime permanente e as análises térmicas transientes é que nestas as temperaturas de carregamento variam com o tempo.

O procedimento para processar uma análise térmica no Ansys, e na maioria dos pacotes computacionais desenvolvidos para resolver problemas através do método dos elementos finitos, consiste em três etapas básicas: construir o modelo; aplicar carregamentos e condições de contorno e obter a solução (processamento) e por fim estudar os resultados das análises.

A primeira etapa, de construção do modelo, pode ser subdividida novamente na forma de cinco tarefas, que são: definir o tipo de elemento mais adequado à análise e à capacidade de processamento disponível; definir as constantes reais dos elementos, se necessário; definir as propriedades dos materiais requeridas para o processamento das análises; definir a geometria do modelo e por fim gerar a malha no modelo.

Quando da aplicação do carregamento e condições de contorno é preciso definir o tipo de análise que será realizada. No caso deste trabalho de tese a análise é transiente. As condições de contorno iniciais são normalmente definidas adotando um mesmo valor de temperatura inicial para todos os nós. Em seguida, deve-se selecionar os nós que, no momento

inicial da análise, não estarão à temperatura ambiente, e, para testes, determinar o valor inicial das temperaturas.

Em seguida é preciso especificar as opções de intervalos de carregamentos (*load steps*). É possível gerenciar um problema transiente por definição de múltiplos intervalos de carregamento (para condições de contorno em rampa ou em degraus) ou utilizando um valor de carregamento em degraus e condições de contorno tabuladas (para condições definidas de variação com o tempo).

Quando todas as condições de contorno e de carregamento já estão estabelecidas é possível salvar estas definições em um arquivo, facilmente alterável, para novas análises sob condições diferentes.

Esta segunda etapa finaliza quando acionamos o programa para que processe as informações de modelo, propriedades, condições de contorno e carregamento. Novamente esta etapa é realizada sem a interação do usuário, porém é necessário o monitoramento do processo para verificar se está ou não convergindo para uma solução.

Este monitoramento do processo é importante pois permite que se aborte simulações para as quais a taxa de convergência é baixa ou nula. É realizado através de gráficos de acompanhamento, além de listas dos resultados calculados em cada iteração.

A verificação dos resultados obtidos na simulação, após o processamento numérico, pode ser feita na forma gráfica, apresentando na tela um mapa em cores, no qual os valores mais baixos das variáveis do fenômeno em estudo são representados pelas cores mais frias (azul) e os valores mais altos são representados pelas cores quentes (vermelho); sempre acompanhados de uma escala que apresenta os valores máximos e mínimos e os representativos para cada faixa de cor obtidos naquela simulação.

Outra forma que pode ser utilizada para verificar os resultados da simulação é a apresentação dos valores numéricos das variáveis em cada ponto do modelo, na forma de tabelas ou matrizes, onde pode-se buscar valores característicos ou limitantes de algum fenômeno.

Por fim, ainda pode-se ter os resultados das análises transientes apresentados na forma de animações de fenômenos do instante de tempo inicial, nas quais será representado o carregamento inicial, até o tempo final determinado para a simulação. Com isto, além de observarmos os valores de uma variável, pode-se conhecer o seu comportamento transiente. Pode-se, portanto, verificar o comportamento do fenômeno no espaço e no tempo.

Essa funcionalidade é bastante útil em fenômenos complexos, pois permite rapidamente, para geometrias complexas, determinar pontos que deverão ser controlados ou monitorados na representação do fenômeno de interesse.

A partir da seleção dos pontos de interesse é possível estabelecer outras correlações entre pontos do modelo, ou comparar em forma gráfica o comportamento dos valores de pontos específicos.

Quando fazemos uso de recursos como as macros, pode-se utilizar funcionalidades do programa que nos permitirão alterar o carregamento e proceder novas análises a partir de uma análise automática dos resultados apresentados. Ou seja, pode-se comparar os resultados obtidos em uma simulação para comparação com um parâmetro determinado e, por exemplo, se este valor não for atingido, modificar o carregamento e proceder nova análise automaticamente. Isto permite que se varra um espectro muito maior de possibilidades de um fenômeno, sem a necessidade de o operador do sistema ficar de plantão, aguardando o término de uma análise para interpretação dos resultados, modificação do carregamento e início de uma nova análise.

Nas análises de fenômenos térmicos, como a mudança de fase, é preciso realizar uma análise térmica transiente não linear, que difere do que foi até agora apresentado apenas por necessitar que se leve em conta o calor latente de fusão, através da definição da entalpia como uma função da temperatura, ou seja:

$$H = \int \rho.c(T).dT \quad (43)$$

Outro cuidado que é necessário em análises não-lineares é que o degrau de tempo de integração (*time step*) deve ser significativamente pequeno e deve ser configurado de forma a ser controlado pelo programa, para permitir que a simulação, quando da mudança de fase, seja bastante precisa e utilize um intervalo de tempo menor do que é necessário na situação em que não há mudança de fase.

4.1.4 Simulação numérica da técnica do núcleo perdido

Neste trabalho de tese foram empregadas duas peças cujas características geométricas não permitem a sua fabricação pela técnica convencional de moldagem por injeção, já que não é possível a remoção mecânica do núcleo do interior das mesmas após o preenchimento da cavidade.

A geometria destas peças, assim como as dimensões, não foram escolhidas ao acaso, mas projetadas para permitir obter o maior número de informações possível a respeito da aplicabilidade da técnica do núcleo perdido em cavidades construídas por estereolitografia.

A peça de forma esférica nos permite adotar a simulação axisimétrica bidimensional, o que reduz em muito o tempo de processamento e a capacidade de armazenamento de informações necessárias. Com isto foi possível varrer um largo espectro de possibilidades de

combinações de materiais de núcleo com temperaturas de injeção, muitas vezes de forma automática. Para esta mesma peça foi construído um modelo tridimensional e foi verificado que, para as mesmas condições de simulação, ambos os modelos apresentavam o mesmo resultado, confirmando assim a validade da simplificação utilizando a axissimetria do modelo.

A peça de forma cúbica, o Dado, nos permitiu, em função de sua relação V_n/V_p bastante baixa, ter combinações de materiais do núcleo e temperaturas de injeção que permitissem tanto a injeção sem a fusão do núcleo, quanto encontrar parâmetros que provocariam a fusão do mesmo. Desta forma se tornou possível verificar que a fusão do núcleo é previsível por este método. Se o fenômeno apresenta limite superior e limite inferior, a afirmação da previsão é mais segura do que seria se apenas tivéssemos um dos limites comprovados.

Os modelos geométricos das peças Esfera e Dado são apresentados na Figura 48 e na Figura 49, respectivamente.

O software CAD utilizado para o modelamento dos elementos necessários para este trabalho de tese foi o SolidWorks 2001. A configuração básica das máquinas utilizadas, tanto para o sistema CAD, quanto para as simulações nos sistemas CAE Moldflow e Ansys 5.7 é: computador modelo Dell Precision 410, dual Pentium II 400 MHz, 384 Mbytes ECC de Memória RAM com Placa de Vídeo Evans&Shuterland AccelGalaxy 2100 31Mbytes.

A análise térmica de núcleo perdido empregando sistemas CAE iniciou com a simplificação do modelo CAD para minimizar o tempo de processamento e a complexidade da malha de elementos finitos necessária, sem, no entanto, perder precisão dos resultados. O modelo completo foi empregado para gerar o modelo em formato .STL para fabricação dos insertos na máquina de estereolitografia, em processo anteriormente descrito.

No caso da esfera, em que o modelo apresenta axissimetria, foi possível fazer o emprego de um modelo 2D, que tem como vantagem, em função do menor tempo de processamento, a possibilidade de um maior refino da malha nas regiões de interesse, como demonstrado na Figura 34.

Após terem sido definidos os modelos a serem empregados nas análises e construídos estes modelos no sistema CAD escolhido, foi necessário realizar um estudo para verificar qual o tipo de elemento que melhor se adequava às análises pretendidas. Com vistas a uma relação de compromisso entre a precisão desejada para a simulação e o tempo de processamento, além de considerações relevantes ao fenômeno de fase envolvido, foi possível selecionar os elementos a serem empregados nas análises.

No dado e esfera 3D foi utilizado o elemento do tipo SOLID70. Este elemento foi utilizado porque a cada iteração os valores de calor específico e entalpia são recalculados,

permitindo mudanças abruptas, como fusão ou solidificação, mesmo com a utilização de malhas grosseiras. É sabido que o ideal seria utilizar SOLID90, mas seriam muitos nós nas malhas e as máquinas disponíveis não seriam capazes de processar com rapidez tamanho número de informações.

O aspecto rapidez deve ser observado com cautela, já que o tempo médio para processar uma análise da peça Dado chegava a 24 horas, e para a peça Esfera, quando utilizando o modelo tridimensional, chegava a 6 horas. As análises bidimensionais da esfera convergiam para uma solução em cerca de uma hora.

Na esfera 2D o elemento utilizado foi PLANE55 pelo mesmo motivo citado acima e porque este elemento permite o uso de modelos axissimétricos, reduzindo em muito o tamanho do modelo e permitindo assim um maior refino da malha na região próxima à interface entre a peça injetada e o núcleo.

Cada tipo de elemento empregado no Ansys requer que sejam determinadas as propriedades que levará em conta para a determinação dos fenômenos em estudo. Feito o levantamento das necessidades para as análises, verificamos que muitas das propriedades necessárias, principalmente para os polímeros, não estavam disponíveis, já que apresentam grande variação em função da composição química da amostra em questão. A determinação das propriedades, bem como as simplificações adotadas estão descritas no Capítulo 5, a seguir. Todas as propriedades envolvidas foram transcritas para o Ansys no Sistema Internacional de medidas – SI.

Para a peça Esfera, como já mencionado, foi empregado um modelo axissimétrico, sobre o qual foi gerada a malha de elementos finitos apresentada na Figura 32. Nesta malha estão em vermelho o núcleo, em azul a peça, em cinza escuro a resina SL e em cinza claro o metal de preenchimento.

Foram constatados alguns problemas na malha e por isso ela foi refinada em algumas regiões, isto fez com que tivéssemos melhores resultados e também uma mais rápida convergência.

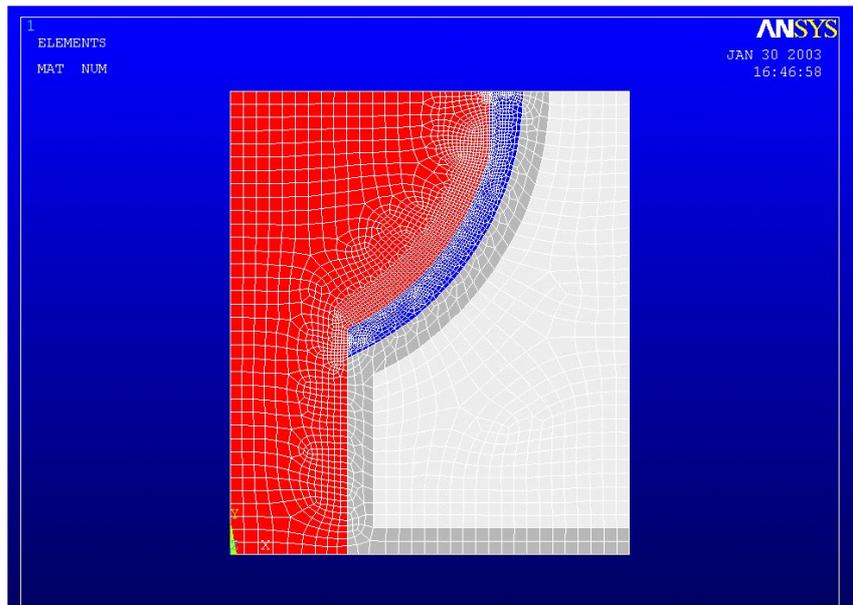


Figura 32 - Malha de elementos finitos da Esfera 2D

Através da animação de simulações, como a apresentada na Figura 33, pode-se observar as áreas que têm maior incidência de calor, e, para estas áreas, refinar a malha. Este refino da malha buscou principalmente resolver problemas no início do processamento quando o diferencial de temperaturas da peça para o núcleo e resina é muito grande. Com este grande diferencial, o fenômeno de fusão não poderia ser bem representado. Um detalhe deste refinamento próximo à superfície do núcleo pode ser observado na Figura 34.

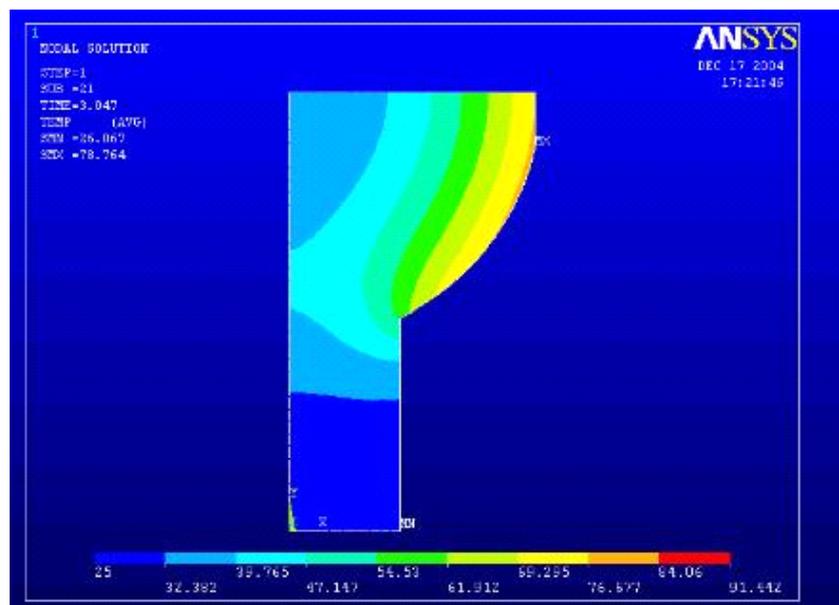


Figura 33 - Modelo do Ansys da Esfera 2D

Após ter-se gerado a malha e realizadas as críticas à mesma, o modelo foi salvo para posterior utilização. No modelo são armazenadas, além da geometria e da malha, as propriedades dos diversos materiais, em forma de uma matriz. A geração da malha, assim como a capacidade de discernimento entre uma malha que dá bons resultados e uma malha grosseira (ou por demais refinada) é das etapas do processo de simulação a que mais demanda tempo e empenho. É preciso realizar simulações com diferentes tipos de malha, e comparar os resultados. Se, a partir de um momento, o refinamento não implica em resultados melhores, a malha definida está adequada. Pondera-se então o tempo necessário para processamento e a capacidade de armazenamento das informações, que crescem exponencialmente com a malha.

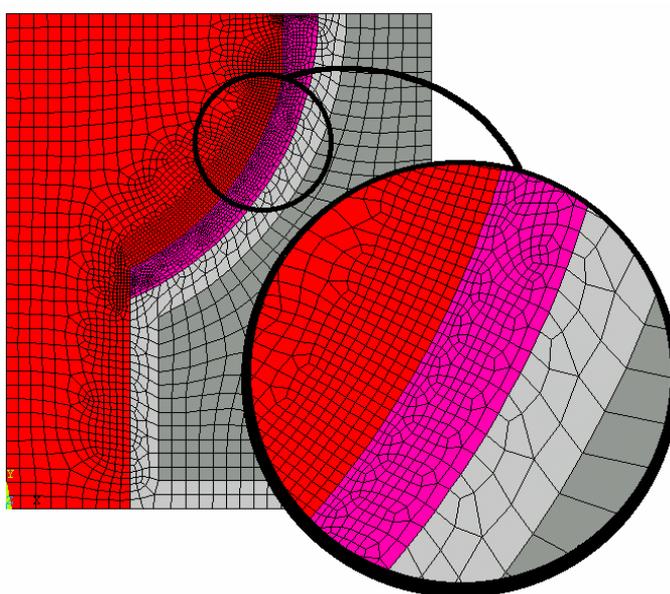


Figura 34 - Detalhe do refinamento da malha na área de interesse

Mesmo tendo sido a peça Esfera desenvolvida para o emprego de simulação numérica bidimensional, como já foi mencionado, durante este estudo foi também utilizado modelo 3D, para confirmar a precisão (igualdade dos resultados) entre as duas formas de abordagem (modelamento).

O modelo que já estava pronto no SolidWorks foi simplificado, como pode ser observado pela Figura 35, e posteriormente exportado para o Ansys no formato Parasolid V12. No Ansys, cada volume foi colado apropriadamente, manualmente, por comandos de edição pontual. A malha foi gerada usando o parâmetro *Smart Size* igual a 4, como pode ser observado na Figura 36. Os materiais (propriedades) foram atribuídos a cada volume e o modelo estava assim pronto para as simulações.



Figura 35 - Comparação dos modelos real e simplificado para esfera 3D

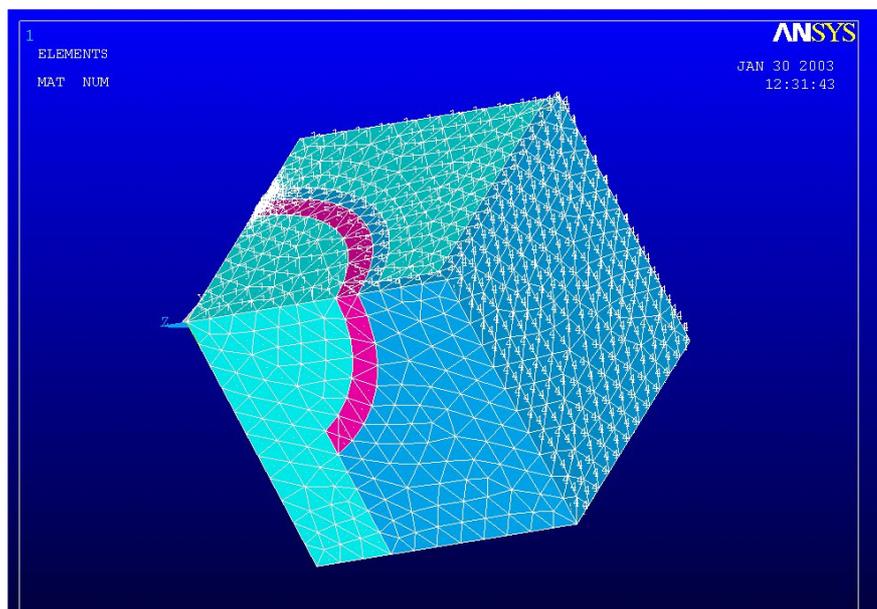


Figura 36 - Malha de elementos finitos da esfera 3D

Neste modelo 3D, que tinha por objetivo a comparação dos resultados com o modelo 2D, foi feito também um refino da malha nas regiões de interface entre peça e núcleo e peça e resina, regiões estas de interesse para a avaliação do fenômeno de fusão do núcleo durante o processo de moldagem por injeção.

Mesmo com a malha bastante bem refinada, em função da significativa diferença entre os valores de temperatura do núcleo e da peça (carregamento abrupto), verificou-se que era necessário atribuir aos nós comuns à peça e ao núcleo uma temperatura intermediária, já definida no capítulo precedente, a temperatura de contato. Com isto foi possível resolver problemas de convergência e instabilidade do modelo.

A equação empregada para calcular essas temperaturas é a equação 42 do Capítulo 3, reproduzida novamente abaixo, que resultou, para as temperaturas de injeção desejadas para cada material os valores apresentados na Tabela 23, em que pode-se observar que os valores de temperatura de contato entre a peça e o núcleo são significativamente mais baixos do que as temperaturas de contato entre a peça e a resina da cavidade.

$$T_{cont} = \frac{\sqrt{k_n \cdot \rho_n \cdot c_n} \cdot T_{ambn} + \sqrt{k_p \cdot \rho_p \cdot c_p} \cdot T_{inj}}{\sqrt{k_n \cdot \rho_n \cdot c_n} + \sqrt{k_p \cdot \rho_p \cdot c_p}} \quad (42)$$

O ideal é que as temperaturas de contato sejam determinadas para cada diferente valor de temperatura de injeção, bem como sejam utilizadas as propriedades dos materiais envolvidos, àquela temperatura, principalmente para os polímeros, cujo calor específico é fortemente dependente da temperatura.

<i>Núcleo</i>	<i>PEAD</i>		<i>ABS</i>		<i>PA</i>		<i>PP</i>	
	<i>Temp. Contato</i>	<i>Temp. Injeção</i>						
	[°C]							
Liga 1	45,172	185	40,595	200	60,760	295	43,898	185
Liga 2	45,103	185	40,540	200	60,639	295	43,833	185
Liga 3	46,383	185	41,573	200	62,889	295	45,043	185
Resina	111,932	185	103,145	200	175,478	295	108,972	185
Cera	91,309	180	60,541	200	128,060	295	90,782	185

Tabela 23 - Temperaturas de contato empregadas nas simulações numéricas

A análise das esferas não apresentou complicações e, após definida a malha ideal, convergiu com rapidez à solução. A simplicidade dos modelos permitiu o uso de malhas bastante refinadas tanto em 2D quanto em 3D. Isso evitou problemas nas regiões de contato da peça com a cavidade e com o núcleo, apesar do grande gradiente térmico existente nessa região. Comparamos os resultados para a Esfera 2D e 3D verificando o comportamento e os valores calculados para nós em posições equivalentes nos dois modelos, e, como não havia diferença significativa, procedemos as análises considerando apenas os resultados 2D.

Nas análises os resultados foram, a princípio, interpretados através de uma animação da distribuição da temperatura em função do tempo, tanto nas análises 2D quanto 3D. Observava-se, assim, a máxima temperatura atingida pelo núcleo no período simulado. Caso a maior temperatura atingida ultrapassasse a temperatura de fusão da liga da qual o núcleo era fabricado, buscava-se nas listagens de temperatura quais nós não cumpriam este requisito, e

verificava-se se era problema de malha ou realmente uma possibilidade de fenômeno de fusão do núcleo. A Figura 37, abaixo, apresenta um quadro de uma destas animações, onde pode-se observar que o valor máximo de temperatura atingida no núcleo para a simulação (60 segundos) foi de aproximadamente 65°C, insuficiente para fundir a liga com ponto de fusão de 72°C ou as demais.

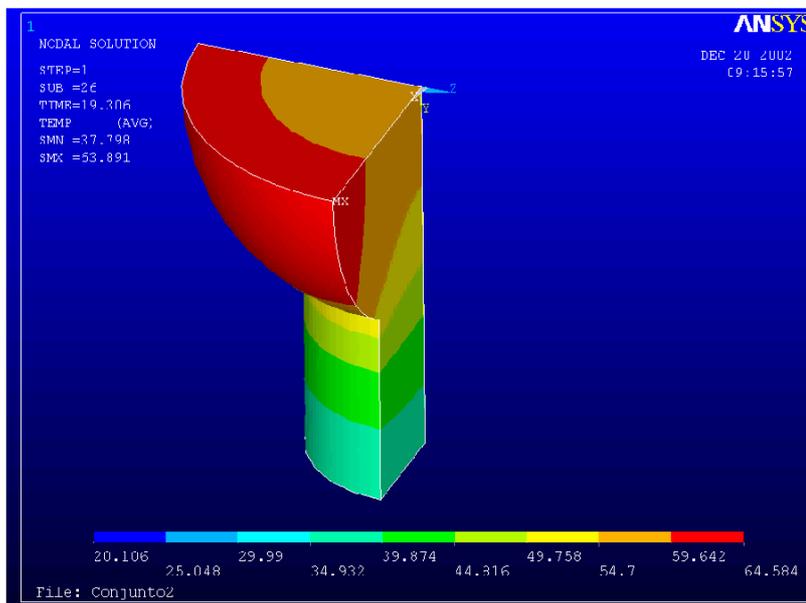


Figura 37 - Modelo do Ansys da esfera 3D

Para a modelagem e análise do Dado 3D os insertos e o núcleo foram modelados no SolidWorks, como pode ser observado na Figura 38. Para facilitar a exportação do arquivo para o Ansys e a criação da malha, algumas simplificações foram feitas: o canal de injeção e os orifícios dos extratores foram removidos; os ângulos de saída foram removidos; as nervuras (reforços estruturais) foram removidas; os arredondamentos foram substituídos por chanfros fazendo com que os sólidos se tornassem facetados, como pode ser observado na Figura 39.

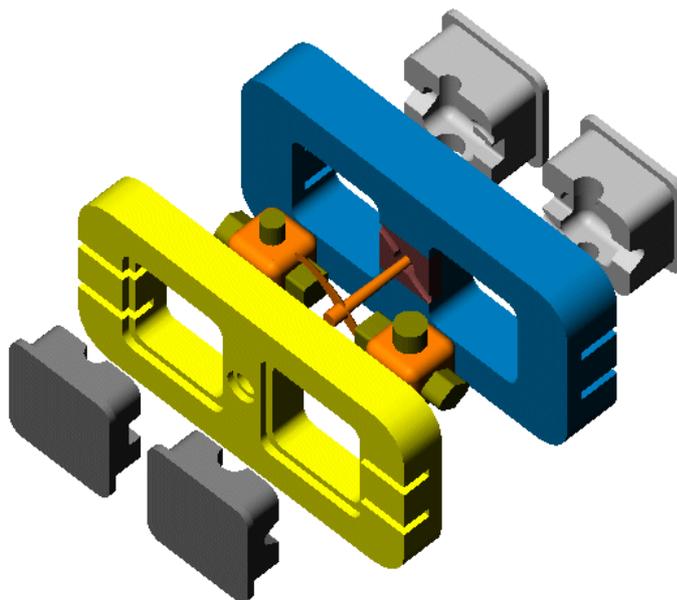


Figura 38 - Modelo CAD para dado 3D

O arquivo de montagem foi exportado para o Ansys no formato Parasolid V12.0. No Ansys, cada volume foi devidamente corrigido (“colado”). Para tal foi necessário um reajuste das tolerâncias nas operações Booleanas. A tolerância foi reduzida gradativamente até que os volumes se unissem adequadamente. O elemento escolhido foi o SOLID70, como já comentado.

Vale a pena salientar que este elemento é próprio para volumes com superfícies irregulares criadas em programas CAD; a ausência de nós intermediários faz com que ele suporte gradientes térmicos altos; com isto pode-se empregar um menor número de nós, auxiliando na obtenção também de um menor tempo de processamento.

Os resultados obtidos comparativamente ao elemento SOLID90 (com malha mais grosseira, em função da capacidade de processamento), bem como o grau de precisão das informações de entrada no programa nos levaram a confirmar a precisão e aplicabilidade do SOLID70 como elemento ideal para este tipo de análise em sólidos tridimensionais.

A malha foi gerada em todo o modelo de uma só vez para que ficasse mais homogênea (recomendação encontrada no *Help*). Foram necessárias várias tentativas até que se conseguisse uma malha de boa qualidade. Como o modelo não possuía simetria e continha muitos detalhes, a malha precisava ser fina. Contudo, o número de nós não poderia ultrapassar a capacidade (Memória RAM) dos computadores disponíveis.

Tem-se, na Figura 40 e na Figura 41, a representação da malha considerada ideal para todos os elementos, núcleo, peça, cavidade e preenchimento. Vale lembrar que os pontos comuns entre os elementos devem ter conectividade para que o fenômeno possa ser adequadamente descrito e a transferência de calor seja bem representada.

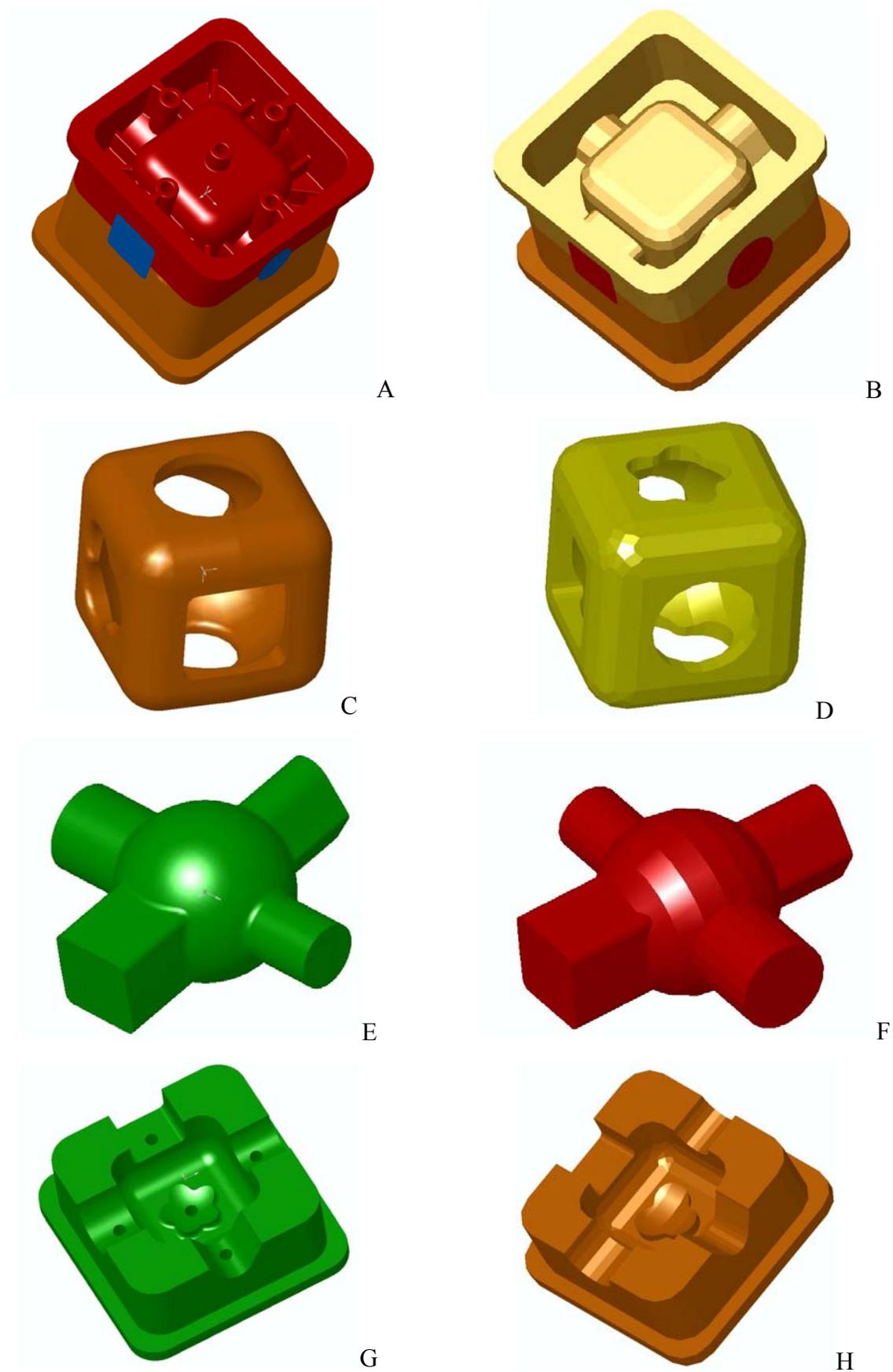


Figura 39 - Comparação dos modelos real e simplificado para dado 3D
 (A- modelo das cavidades; C- modelo do Dado; E-modelo do núcleo; G- detalhe da cavidade;
 B;D;F e H mesma seqüência porém com simplificações)



Figura 40 - Malha de elementos finitos dado 3D

Como condições iniciais de processamento, todos os nós eram colocados à temperatura ambiente, considerada neste estudo de 25°C. Os nós pertencentes ao dado eram colocados à temperatura de injeção do plástico em questão (carregamento). Os nós que pertenciam ao núcleo e a peça ao mesmo tempo eram colocados na temperatura de contato já calculada previamente para aquela condição de injeção. É importante lembrar que este recurso da temperatura de contato foi utilizado devido à grande dificuldade em gerar uma malha suficientemente fina, sem exceder a capacidade dos computadores disponíveis, além do fato de a mesma ser amplamente utilizada como referência para os cálculos de tempo de resfriamento de moldado em referências, como em Menges & Mohren²³.



Figura 41 - Malha de elementos finitos conjunto do dado 3D

Os parâmetros das simulações para esta peça foram definidos através de diversos testes para buscar as melhores relações entre malha e resultados de convergência. O limite de iterações por degrau de tempo foi definido no valor de 400. O degrau de tempo automático foi definido como tendo valor mínimo de 0,00001 s e máximo de 2 s. Para todas as simulações foi adotado tempo de 60 segundos.

Os resultados eram avaliados através de uma animação das temperaturas do núcleo, em que a temperatura máxima do núcleo era monitorada. Um exemplo de uma das telas de animação é a Figura 42. Também eram verificados os valores nodais de temperatura nas listagens geradas pelo programa. Assim era possível determinar se aquele aumento localizado de temperatura ocorria antes do total endurecimento do polímero, ou era uma consequência posterior.

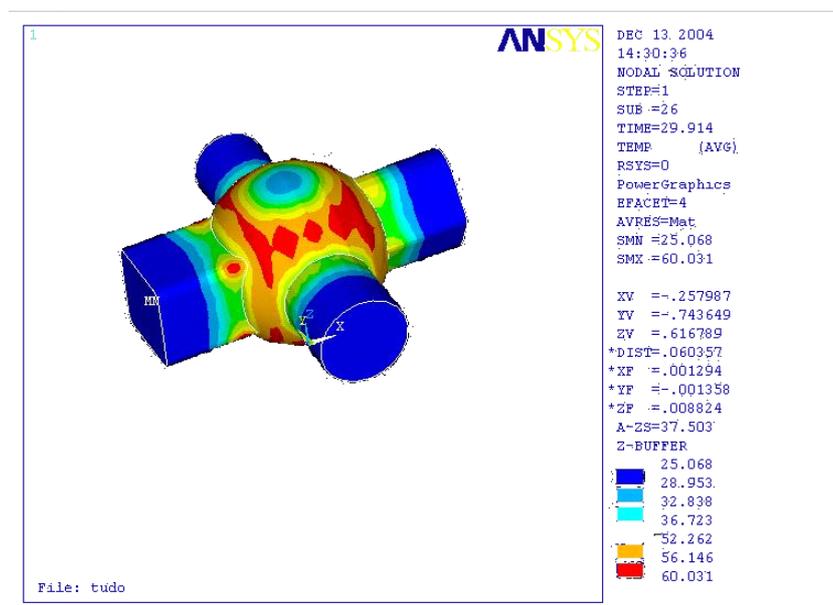


Figura 42 - Animação dos resultados no Ansys - núcleo do dado 3D

Uma organização dos resultados das análises se tornou necessária em função do tamanho dos arquivos gerados em cada análise. Os resultados de todas as análises foram organizados na forma de arquivos compactados.

Para cada um dos modelos foi criada uma pasta (esfera 2D, esfera 3D e dado 3D). Os arquivos compactados, contém os arquivos que foram utilizados para a simulação de cada situação, seus respectivos resultados e as animações correspondentes.

Com a finalidade de facilitar a localização de cada arquivo, os arquivos compactados foram nomeados segundo um padrão. Um exemplo desta nomenclatura padrão é o arquivo PA 295C L2.ZIP. As primeiras letras representam o tipo de polímero moldado por injeção, os

valores numéricos seguidos da letra C representam a temperatura de injeção T_{inj} em graus Celsius, por fim tem-se a letra L seguida de um número, representando as ligas de baixo ponto de fusão em ordem crescente, como empregada nas tabelas deste texto. No caso dos núcleos em cera, foi empregado a palavra cera no nome do arquivo.

Os resultados das simulações eram controlados automaticamente através de macros, utilizando-se uma lista de temperaturas dos nós pertencentes aos núcleos para cada *STEP* de tempo. As temperaturas máximas existentes em cada *STEP* eram monitoradas. Caso alguma dessas temperaturas atingisse a temperatura de fusão adotada, era considerado que o núcleo fundiu.

Foram utilizadas diversas macros para agilizar no processo das simulações. As macros consistiam fundamentalmente de rotinas para repetir o trabalho braçal de utilização do software. Apesar de ser necessária uma diferente macro para cada modelo - dado 3D, esfera 2D e esfera 3D – todas trabalhavam de maneira semelhante.

As informações de entrada através destas foram: um intervalo de temperaturas de injeção a ser estudado; uma temperatura inicial dos moldes e um tempo de molde fechado (tempo de simulação) de 60 segundos. Depois da entrada dos parâmetros a seguinte seqüência era executada pelo programa:

1. Iguala T_{inj} à primeira temperatura do intervalo de temperaturas entrado pelo usuário, por exemplo a faixa de temperatura de processamento para um polímero;
2. Iguala T_2 à segunda temperatura do intervalo entrado pelo usuário;
3. Limpa os resultados, dados e condições das análises anteriores;
4. Aplica a temperatura inicial do molde em todo o modelo;
5. Aplica T_{inj} à peça de plástico;
6. Calcula a temperatura de contato a ser utilizada;
7. Aplica a temperatura de contato nas superfícies em que há contato peça-molde e peça-núcleo;
8. Configura os parâmetros da simulação como tempo de molde fechado, tamanho dos *STEPS*, etc.;
9. Realiza a simulação;
10. Cria listas com as temperaturas dos nós do núcleo em cada *STEP*;
11. Cria vídeo mostrando as temperaturas no núcleo ao longo do tempo;
12. Compacta os resultados da simulação, o vídeo e as listas para dentro de um arquivo com nome apropriado.;
13. Verifica se T_{inj} é maior que T_2 . Se T_{inj} for menor que T_2 então $T_{inj} = T_{inj} + 5$ e o programa volta para o passo 3 . Se T_{inj} for maior que T_2 , o programa termina.

O grande empecilho para o emprego indiscriminado destas macros nos modelos 3D, tanto da Esfera quanto do Dado é o tempo de processamento necessário e a incerteza envolvida da continuidade do processo (falhas de convergência).

Tome-se como exemplo a moldagem por injeção do PP para a peça esfera 3D. Se desejarmos analisar toda a faixa de temperaturas de injeção, que vai de 180 a 280°C, portanto de 100°C, e se considerarmos esta faixa dividida em intervalos de 5°C, teremos 20 intervalos. Nas condições de simulação com os modelos e máquinas disponíveis, a simulação de um material polimérico, em um núcleo de um determinado material, poderia chegar a levar 120 horas (5 dias). Como neste trabalho foram consideradas pra estudo três ligas e a cera, teríamos 480 horas de processamento (20 dias), caso nenhuma análise provocasse fusão do núcleo e fosse terminada.

Considerando o mesmo caso para a peça Dado 3D, teríamos, ainda, teoricamente, para o PP, 20 dias para analisar cada interação do material com um núcleo, e 120 dias (4 meses) para este material. Em se tratando de pesquisa, mesmo se não para ferramental “rápido”, é inadequado considerar este tipo de procedimento.

Para os casos bidimensionais, as macros apresentavam uma excelente relação entre o custo e o benefício, já que de um dia para o outro pode-se analisar o fenômeno envolvendo cada combinação, e em quatro dias se tinha em mãos todos os resultados.

Para minimizar este tempo de processamento, utilizamos as macros para aplicar o carregamento e, ao invés de estudar toda a faixa de moldagem por injeção para um determinado polímero, nos limitamos ao estudo das temperaturas próximas à temperatura de injeção determinada nas análises CAE no Moldflow. O procedimento então passava para o apresentado na **Figura 43**.

Esta nova abordagem do processo, necessária para os modelos de maior complexidade (maior número de nós) faz com que se tenha um menor tempo de processamento, porém não fornece amplas informações a respeito do comportamento do fenômeno em um espectro maior.

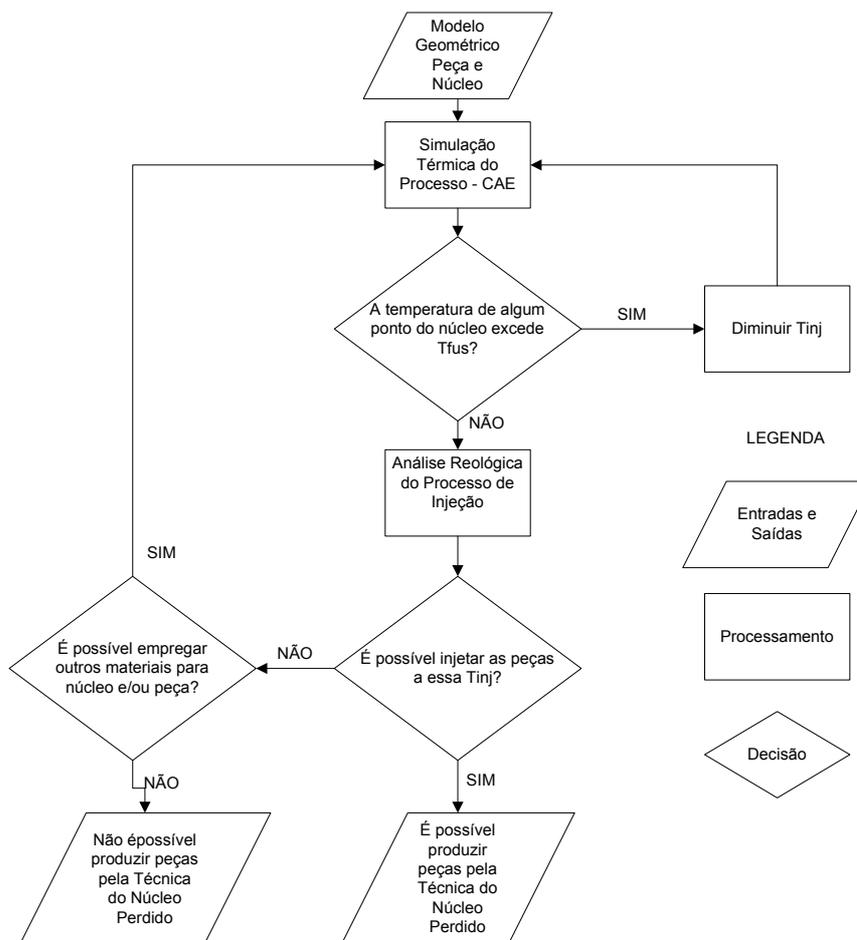


Figura 43 - Etapas da análise térmica empregando sistema CAE

4.2 Resultados das análises numéricas

Os resultados obtidos através das simulações são apresentados para o Dado 3D e para a Esfera 2D, já em forma comparativa, nas Tabela 24 e Tabela 25, respectivamente.

Na parte central destas tabelas, observa-se a situação do núcleo, aplicados os critérios já apresentados para definição da fusão ou não do núcleo, para as temperaturas de injeção que foram empregadas nos experimentos de moldagem por injeção.

Na parte central da Tabela 24, tem-se, para a peça dado, com referência à Liga 1, quando da injeção de PEAD e de ABS uma diferença em relação ao modelo matemático apresentado no Capítulo 3. Outra diferença é observada para a Liga 3, quando da injeção do PA. Para estes três casos, o modelo matemático indica que há possibilidade de fusão e a simulação numérica indica que não haverá fusão. Pode-se constatar que tal diferença é previsível e o comportamento é constante e provocado pela hipótese empregada no modelo matemático, de ser o sistema adiabático, sendo o modelo matemático mais conservador em termos de condições de injeção, como já era previsto.

<i>Modelo Matemático</i>	<i>PEAD</i> <i>T_{injMáx}[°C]</i>	<i>ABS</i> <i>T_{injMáx}[°C]</i>	<i>PA</i> <i>T_{injMáx}[°C]</i>
Cera	133	172	140
Liga 1	142	177	147
Liga 2	226	290	236
Liga 3	264	336	275
<i>PAR DE MATERIAIS</i> <i>SIMULADO</i>	<i>PEAD</i> <i>T_{inj}=185°C</i>	<i>ABS</i> <i>T_{inj}=200°C</i>	<i>PA</i> <i>T_{inj}=295°C</i>
Cera	Funde	Funde	Funde
Liga 1	Não Funde	Não Funde	Funde
Liga 2	Não Funde	Não Funde	Funde
Liga 3	Não Funde	Não Funde	Não Funde
<i>Par de materiais injetado</i>	<i>PEAD</i> <i>T_{inj}=185°C</i>	<i>ABS</i> <i>T_{inj}=200°C</i>	<i>PA</i> <i>T_{inj}=295°C</i>
Cera	Fundiu	Fundiu	Fundiu
Liga 1	Não Fundiu	Não Fundiu	Fundiu
Liga 2	Não Fundiu	Não Fundiu	Fundiu
Liga 3	Não Fundiu	Não Fundiu	Não Fundiu

Tabela 24- Comparação dos resultados do ANSYS para o Dado 3D

Na Tabela 25 tem-se também duas combinações que apresentam diferença de comportamento nos modelos matemático e de simulação numérica, na injeção do PEAD e do ABS no núcleo de cera.

Um fator é determinante para a explicação desta divergência, o Número de Biot (Bi). No modelo matemático foi empregada a hipótese simplificativa de que a temperatura em todo o núcleo é constante e não há um gradiente de temperaturas no mesmo, fato que não pode ser considerado para um material com as propriedades apresentadas pela cera para microfusão. Neste caso, o fenômeno só pode ser adequadamente previsto através do modelo numérico.

<i>Modelo Matemático</i>	<i>PEAD</i> <i>T_{injMáx} [°C]</i>	<i>ABS</i> <i>T_{injMáx} [°C]</i>	<i>PA</i> <i>T_{injMáx} [°C]</i>
Cera	194	263	204
Liga 1	197	261	207
Liga 2	325	438	342
Liga 3	375	504	395
<i>PAR DE MATERIAIS SIMULADO</i>	<i>PEAD</i> <i>T_{inj} =185° C</i>	<i>ABS</i> <i>T_{inj} =200° C</i>	<i>PA</i> <i>T_{inj} =295° C</i>
Cera	Funde	Funde	Funde
Liga 1	Não Funde	Não Funde	Funde
Liga 2	Não Funde	Não Funde	Não Funde
Liga 3	Não Funde	Não Funde	Não Funde
<i>Par de materiais injetado</i>	<i>PEAD</i> <i>T_{inj} =185° C</i>	<i>ABS</i> <i>T_{inj} =200° C</i>	<i>PA</i> <i>T_{inj} =295° C</i>
Cera			
Liga 1	Não Fundiu		
Liga 2			
Liga 3			

Tabela 25 - Comparação dos resultados do ANSYS para a esfera

4.3 Sistemática para avaliação da técnica do núcleo perdido

A partir da comparação do modelo matemático apresentado no Capítulo 3 com as simulações numéricas e os resultados experimentais (Capítulo 5) é possível propor uma sistemática para a avaliação do emprego da técnica do núcleo perdido em insertos construídos pelo processo da estereolitografia.

Esta sistemática é fundamentada no modelamento geométrico da peça para a determinação das relações de volumes V_n/V_p . Comparação das relações de volume com o modelo matemático (com propriedades dos bem definidos pares materiais) para a determinação da possibilidade de fusão do núcleo para uma determinada condição de injeção. Nos casos duvidosos (pequena margem de segurança) ou casos em que o modelo geométrico apresente detalhes cujas relações de volume do núcleo e da peça sejam críticas, será necessária a aplicação de ferramenta CAE para simulação do comportamento na área de interesse.

Descrição da sistemática de avaliação:

Os dois critérios a serem considerados para a determinação da aplicabilidade da técnica do núcleo perdido para a injeção de peças complexas em moldes de estereolitografia são: evitar a fusão localizada do núcleo na região próxima ao canal de injeção durante o período do preenchimento da cavidade e evitar a fusão generalizada do núcleo compreendido entre o início da injeção e o total endurecimento da superfície de contato do polímero com o

núcleo, de maneira a manter a forma e o acabamento superficial no moldado (mesmo que a partir deste ponto o núcleo venha a se fundir).

O primeiro critério deve ser controlado através das considerações de projeto da peça, do núcleo e do canal de injeção.

O segundo critério é função da temperatura de injeção e da relação de volumes V_n/V_p (no todo e nas regiões isoladas), para um par de materiais selecionados.

A partir do projeto inicial do produto que se deseja moldar é preciso modelar geometricamente em um sistema CAD a peça e o núcleo (parte vazia da peça).

Com o modelo CAD em mãos, é preciso construir o modelo das cavidades, tanto do núcleo quanto da peça injetada. Deve-se levar em consideração as características de ângulo de saída e linhas de partição.

O modelo das cavidades deve ser contrastado com as características geométricas indicadas para o emprego da técnica do núcleo perdido, apresentadas no Capítulo 3.

Se for necessário alterar a geometria para promover apoios adequados do núcleo na cavidade ou alteração do canal de injeção, para evitar impacto direto (*direct impingement*) do fluxo de injeção com as paredes do núcleo, deve-se atentar ao modelamento geométrico do produto e fazer as alterações.

A simulação do processo de injeção em um pacote CAE convencional prioritário, como o Moldflow nos permitirá determinar os parâmetros de temperatura, pressão e tempo para o ciclo, além de verificar o posicionamento e tipo dos canais de injeção.

Já nesta etapa pode-se verificar os pontos da peça (e conseqüentemente no núcleo) que apresentam as maiores temperaturas, pontos estes que deverão ser posteriormente monitorados, já que serão os de maior probabilidade de fusão.

Nestas análises reológicas é preciso considerar que: a cavidade é constituída em resina SL, que possui uma baixa condutividade térmica; as cavidades SL tendem a apresentar, quando em regime permanente, uma temperatura mais alta que os insertos metálicos, em iguais condições de processamento; tem-se de buscar parâmetros de injeção adequados a preservar a vida dos insertos, como menores valores de pressão, temperatura e velocidades de preenchimento; também devemos levar em conta que, nestes pacotes convencionais, as temperaturas e características do material da cavidade e do núcleo são normalmente consideradas iguais, fato que não ocorre no emprego da técnica do núcleo perdido em insertos de resina SL, pois a temperatura do núcleo é a ambiente.

Tendo em mãos o resultado da análise reológica, pode-se empregar o modelo matemático desenvolvido no Capítulo 3, para estimar se haverá ou não fusão do núcleo. Neste momento pode-se optar por utilizar um modelo simplificado do calor trocado pelo polímero

com o núcleo, aproximado por um valor médio de calor específico, ou pode-se optar por um valor mais preciso fornecido por uma análise DSC ou, ainda, em uma análise reológica obtida por um software comercial.

Se, a partir das análises dos resultados do modelo matemático, se verificar que não haverá fusão do núcleo considerando o valor absoluto da relação V_n/V_p , ainda será necessário verificar se há na peça seções onde a relação V_n/V_p ou $Leqn/Leqp$ é menor do que a verificada para a peça como um todo. Se houver, é preciso realizar uma nova análise, levando em conta este novo valor. Se persistir a fusão, antes de descartar o processo, é preciso se realizar uma simulação numérica dando especial atenção àquela seção, caso contrário pode-se partir para a moldagem por injeção.

Caso o modelo matemático indique fusão é possível verificar, ainda, se uma mudança na geometria da peça pode evitar tal fusão. Se for possível, altera-se a geometria.

Caso se tenha fusão da peça indicada pelo modelo matemático (no todo ou em alguma seção específica) é necessário, antes de descartar a viabilidade do emprego da técnica do núcleo perdido, fazer uma simulação térmica transiente do processo, para verificar a possibilidade de fusão. Esta sistemática pode ser observada na Figura 44.

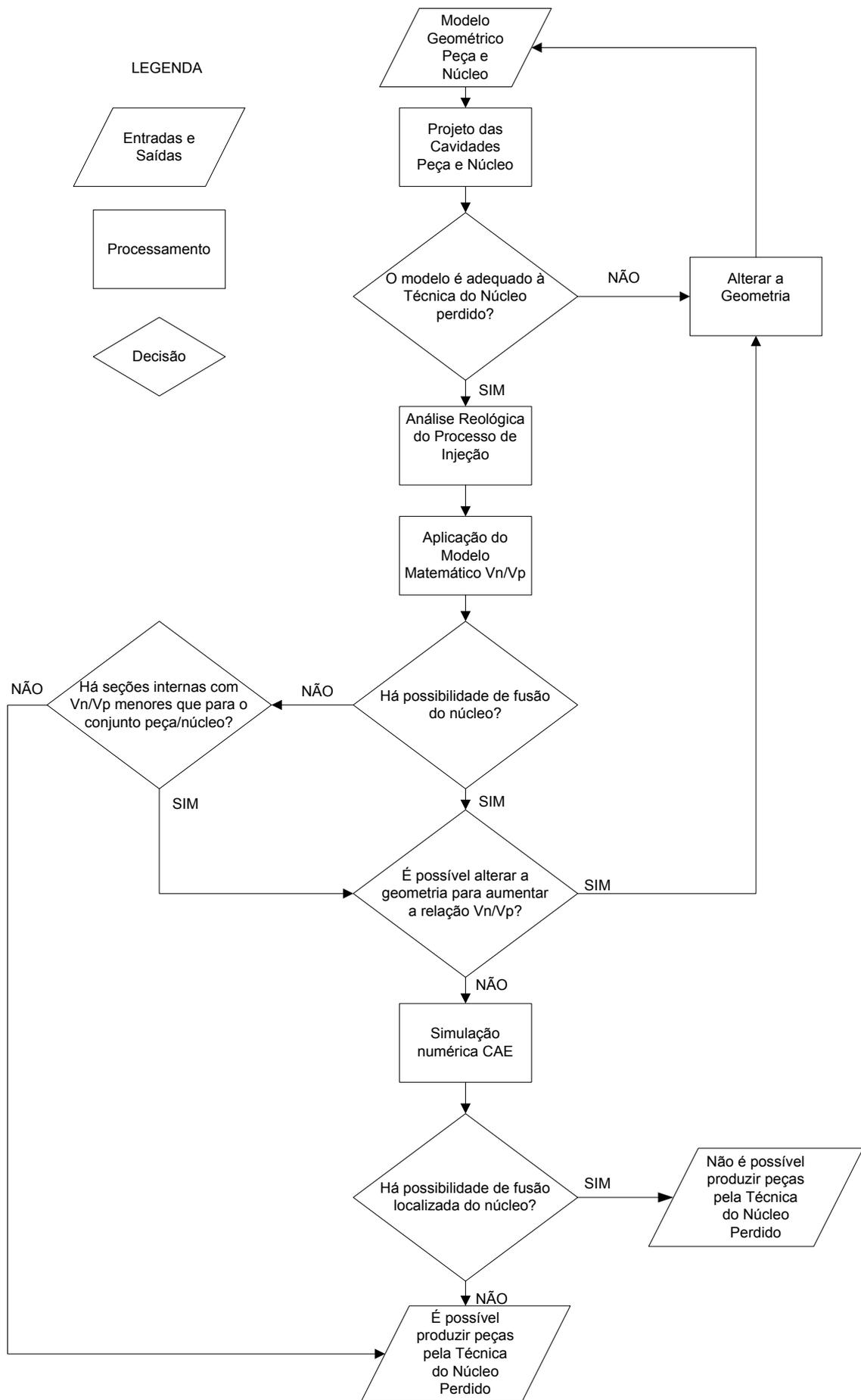


Figura 44 - Sistemática de avaliação da viabilidade de emprego da técnica do núcleo perdido

CAPÍTULO 5

COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste Capítulo são descritos os experimentos que se fizeram necessários neste trabalho, e que permitiram o levantamento de propriedades físicas precisas dos materiais empregados; e a determinação da precisão dimensional obtida na moldagem em cavidade metálica e cavidade SL. São também apresentados, ao final do Capítulo, os resultados obtidos na fundição por gravidade de cera para microfusão em cavidade SL e a posterior utilização destes fundidos como núcleos no processo de injeção por núcleo perdido.

5.1 Propriedades dos materiais

Phillips⁶⁹, em sua obra, afirma que o uso de um material envolve um processo de seleção. É através do conhecimento ou experiência que é possível obter-se o máximo de qualquer propriedade, mas em nenhum tipo de uso é viável selecionar-se um material com base em uma única propriedade. É considerando o balanço comparativo de um fator contra outro que os engenheiros de materiais sentem os desafios e suas satisfações.

No processo de escolha, segundo Van Vlack⁷⁰, o engenheiro deve levar em conta propriedades tais como resistência mecânica, condutividade elétrica e/ou térmica, densidade e outras. Além disso deve considerar o comportamento do material durante o processamento e o uso, onde plasticidade, usinabilidade, estabilidade elétrica, durabilidade química, comportamento irradiante são importantes, assim como, custo e disponibilidade.

Shackelford⁷¹ afirma que para entender as propriedades ou características observáveis de materiais de engenharia, é necessário entender a sua estrutura em um nível atômico e/ou microscópico.

Todas estas obras e muitas outras discutem como deve ser selecionado um material para uma dada aplicação, dadas as propriedades ou como aquela propriedade é consequência de algum evento a nível atômico característico daquele material.

Precisamos no entanto recordar que, para uma parte significativa dos materiais empregados em engenharia, as propriedades não estão amplamente disponíveis. Esta disponibilidade diz respeito a valores precisos e exatos das propriedades de cada lote de material produzido em algum processo.

Quando compramos uma barra de aço, por exemplo, normalmente não recebemos junto com ela um dossiê completo de todas as propriedades. Quando adquirimos um lote de polímeros para injeção não recebemos um relatório de todas as análises químicas, físicas e

reológicas que podem ser feitas para caracterizar adequadamente este material. Estes fatores estão relacionados ao custo e à aplicação a que se destinam os materiais. E mesmo que recebêssemos, por segurança, seria conveniente conferir estes valores, em alguns casos extremos.

Esta indisponibilidade generalizada de propriedades precisas faz com que, em um grande número de situações, seja utilizado um valor genérico para aquela classe de material, como se fosse constante, tanto em relação à composição química, quanto em relação à variação com a temperatura, por exemplo.

É evidente que, para a grande maioria das aplicações, conhecer estas propriedades não é necessário e sua determinação implicaria somente em elevados custos de produção.

Em pesquisas, estas propriedades bem definidas são normalmente necessárias e nem sempre estão disponíveis, e ainda mais, nem sempre os meios para a determinação das mesmas está economicamente acessível.

Em face do exposto, chegamos a um impasse. Por um lado a precisão da pesquisa pode ser comprometida pelo fato de não dispormos das propriedades daquela amostra empregada, por outro lado, os custos envolvidos para a determinação destas propriedades pode ser tal que não justifique os melhores resultados obtidos.

Pelo que foi apresentado no fim do Capítulo 3, quando tratamos da seleção das ligas metálicas de baixo ponto de fusão para o emprego na técnica do núcleo perdido, nos deparamos com a falta de informações a respeito das propriedades de algumas ligas e também, nos deparamos com o fato de não estarem disponíveis no mercado nacional algumas das ligas para as quais dispúnhamos das propriedades.

Sendo assim, as três ligas selecionadas o foram, por termos os valores de suas propriedades e por conseguirmos adquiri-las no mercado nacional. Infelizmente estas propriedades são fornecidas apenas como valores característicos para as ligas, e não como uma função da temperatura, por exemplo. Apesar de não ser o ideal, consideramos que esta aproximação para as ligas era suficientemente boa.

Nos polímeros, propriedades como densidade e condutividade térmica não variam significativamente em função da composição, pelo que pôde ser averiguado pelas comparações de valores fornecidos por diversos fabricantes nacionais, para os polímeros empregados neste estudo, em especial o PEAD, o ABS e o PA .

Os valores de calor específico, entretanto, variam significativamente inclusive em diferentes lotes de mesmo *grade* dos polímeros de um fabricante. Os valores de densidade e condutibilidade térmica foram considerados constantes e seus valores foram obtidos da literatura disponível, assim como de catálogos de fabricantes, como o da Prolen⁵⁶.

Para os polímeros empregados, em função da grande possibilidade de variação em função da composição, e por não dispormos de um relatório técnico descrevendo as propriedades para aqueles lotes empregados, foi necessário fazer o levantamento da relação do valor do calor específico com a temperatura. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Polímeros do Departamento de Química da UFSC, através de DSC.

Na Tabela 26, apresentada a seguir, estão colocados os valores referentes às propriedades disponíveis para as ligas metálicas de baixo ponto de fusão selecionadas. Estas propriedades foram comparadas com os valores disponíveis em catálogos de vários fabricantes do exterior, como a Belmont Metals Inc., a Indium Corporation of América, A MCP Systems e a Canfield Technologies, bem como nos fornecedores nacionais como a GLT Comercial e a SoftMetais que forneceu as ligas e apresentam consistência de valores entre as comparações.

<i>Material</i>	<i>Liga 1</i>	<i>Liga 2</i>	<i>Liga 3</i>
Identificação no Ansys	1	2	3
Densidade [kg/m³]	9580	8780	10440
Condutividade térmica [W/m*K]	18	17	16,74
Calor específico [J/kg*K]	146	170	126

Tabela 26 - Propriedades disponíveis para as ligas metálicas

5.1.1 Determinação de propriedades através de calorímetro de varredura diferencial

Para a determinação do calor específico optou-se pelo emprego da calorimetria de varredura diferencial (*DSC - Differential Scanning Calorimetry*).

Os modernos sistemas de DSC são projetados para determinar as entalpias do processo pela medição do diferencial de fluxo de calor necessário para manter uma amostra do material e uma referência inerte a uma mesma temperatura. Esta temperatura é programada para varrer a faixa de temperatura de interesse, crescendo linearmente a uma taxa determinada.

A técnica DSC para a determinação de calores específicos é capaz da detecção de descontinuidades na função calor específico, como a temperatura de transição vítrea.

Quando uma amostra de material é submetida a um aumento de temperatura linear, a taxa de calor fluindo para o interior da amostra é proporcional ao seu calor específico instantâneo. Através da consideração desta taxa de fluxo de calor como uma função da temperatura, e comparando esta com um material padrão sob as mesmas condições, nós pode-se obter o valor do calor específico, c_p , como uma função da temperatura. O procedimento de realização deste tipo de análise é bem descrito na literatura e pode-se esperar erros da ordem de 0,3%⁷².

O procedimento pode ser rapidamente explicado da seguinte maneira: pequenos cadinhos de alumínio vazios são posicionados nos fornos de amostra e de referência. Uma linha base isotérmica é gravada na temperatura mais baixa do ensaio e então a temperatura é programada para crescer dentro de uma determinada faixa. Uma linha base isotérmica é então gravada na temperatura mais alta. As duas linhas base isotérmicas são usadas para interpolar uma linha base na seção de varredura. Este procedimento é repetido com uma massa conhecida no cadinho da amostra e uma linha em função do tempo é determinada. Como há um deslocamento da linha em função da absorção da amostra, pode-se escrever:

$$\frac{dH}{dt} = m \cdot c_p \cdot \frac{dT_p}{dt} \quad (43)$$

Na equação (43) m é a massa da amostra em gramas, c_p é o calor específico em calorías e dT_p/dt é a taxa de aumento de temperatura programada.

Esta equação poderia ser utilizada diretamente para obter os valores de c_p , mas qualquer erro na leitura de dH/dt e na programação da taxa de aumento de temperatura dT_p/dt poderia reduzir a precisão das leituras. Para minimizar estes erros, o procedimento é repetido com uma massa conhecida de safira, cujo calor específico é bem conhecido, e uma nova linha é gravada. Através da diferença relativa entre as ordenadas da amostra e da safira e da linha base, é possível determinar com precisão os valores de c_p em função da temperatura, em uma faixa determinada de valores.

Neste trabalho de tese se tornaram necessárias as informações do valor do calor específico dos polímeros empregados em função da temperatura.

Amostras dos polímeros disponíveis para os ensaios foram enviadas para o Laboratório de Polímeros, para que as análises fossem realizadas.

Os resultados das análises foram retornados na forma de gráficos com os valores representativos de c_p para diversas temperaturas, bem como na forma de dados numéricos brutos das linhas obtidas, para processamento das informações.

Além dos polímeros, foi solicitada a análise DSC das ligas de baixo ponto de fusão e da cera para microfusão. Para a resina de estereolitografia, o Laboratório Cimject já dispunha dos resultados de análises previamente realizadas para a mesma.

Quando da realização das análises, tomamos o cuidado de realizar, pelo mesmo procedimento, a análise de calorimetria para materiais de referência e propriedades conhecidas. Assim foi possível comparar os resultados do equipamento e do protocolo seguido.

Para todos os materiais foi necessário realizar o resfriamento do sistema para que fosse possível determinar com precisão os valores de c_p na faixa desejada (a partir da temperatura ambiente).

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de calor específico em função da temperatura para os materiais ensaiados. É importante verificar que o ABS é um material amorfo, não possuindo picos de fusão, enquanto os demais materiais apresentam picos de fusão cristalinos.

Para os polímeros empregados, e também para os de referência, o resultado das análises DSC pode ser observado na forma gráfica nas Figura 45 e Figura 46. Para a utilização no Ansys, os dados vindos das análises DSC, foram transformados em tabelas para a entrada de propriedades na forma de degraus (*steps*), como se observa na Tabela 27 e na Tabela 28.

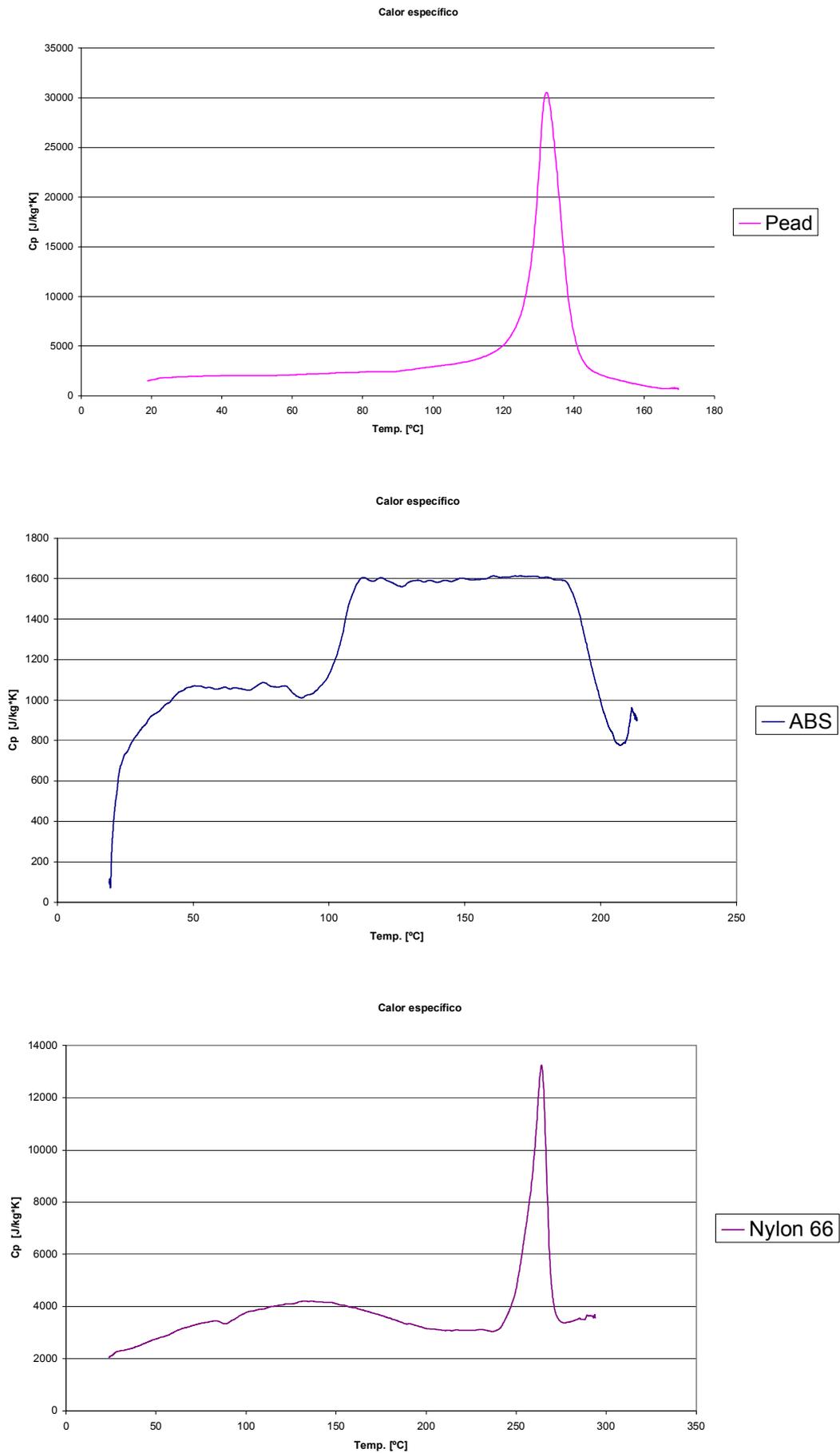


Figura 45 - Resultado das análises DSC para polímeros injetados nos estudos

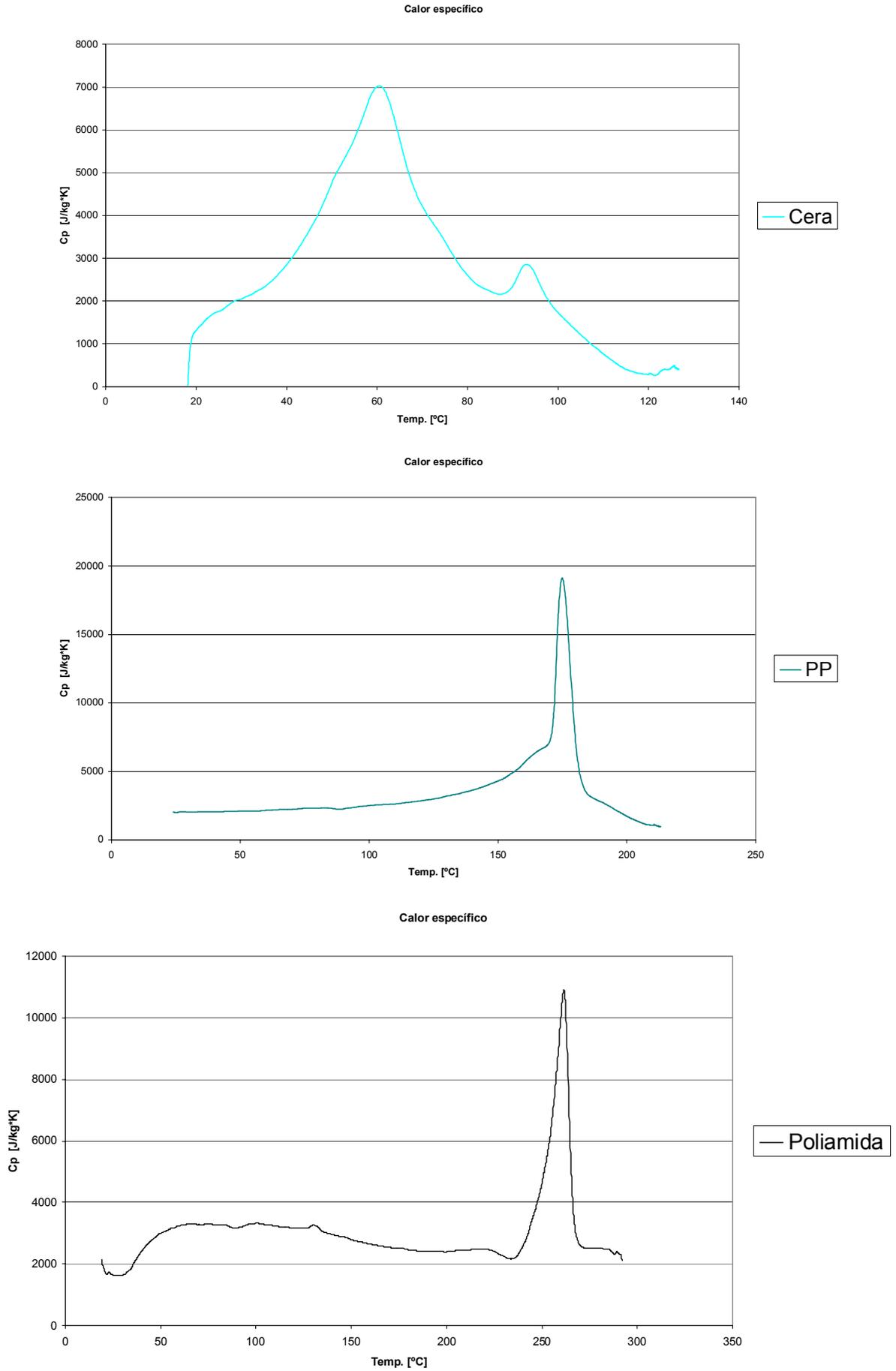


Figura 46- Resultados das análises DSC para cera e polímeros de referência

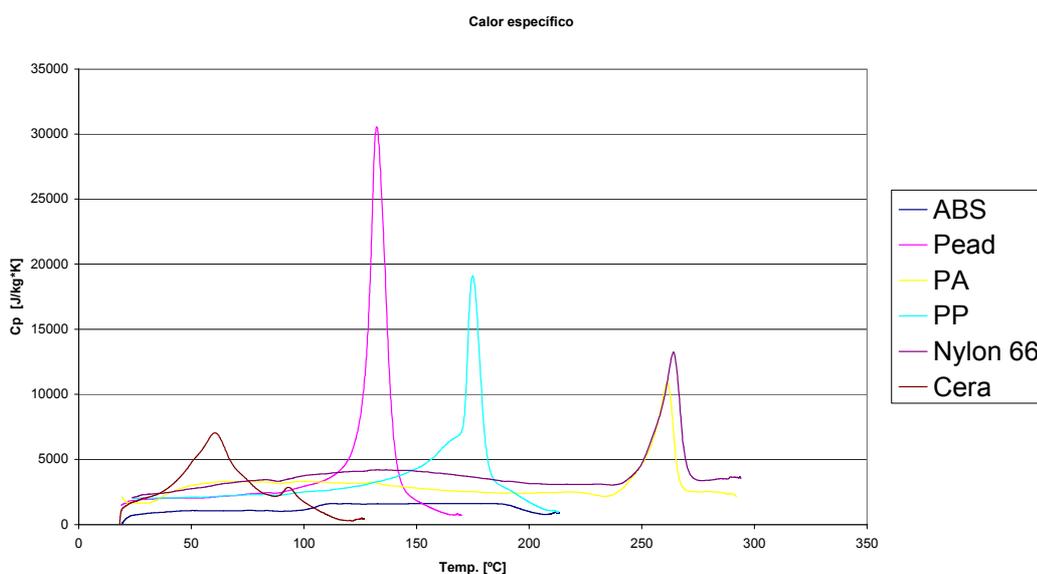


Figura 47- Comparação do resultado das análises DSC

Para as ligas metálicas, os valores de calor específico resultantes das análises de DSC não foram consideradas válidas para este estudo, pois apresentavam, em diversos pontos, valores negativos de calor específico.

Foram buscadas informações a este respeito e foram empregados outros métodos buscando corrigir este problema, porém sem embasamento teórico para explicar o fenômeno. Optamos, por isso, por descartar estes resultados e utilizar o valor de calor específico constante que já dispúnhamos, para não introduzir mais erros em nossos modelos.

<i>Material</i>	<i>PEAD</i>		<i>ABS</i>		<i>PA</i>		<i>PP</i>	
Identificação no Ansys	5	T [°C]	20	T [°C]	21	T [°C]	22	T [°C]
Densidade [kg/m³]	956	25	1050		1120		905	
Condutividade térmica [W/m*K]	0,3	25	0,15		0,26		0,25	
Calor específico [J/kg*K]	1827	23,62	136,8	19,67	2015	19,54	1996	24,59
	2400	80,26	666	23,08	1712	22,4	2299	84,84
	2580	90,41	930,5	35,73	1686	31,72	2806	118,6
	3552	111,1	1024	43,56	2086	36,62	3817	143,5
	4230	116,4	1069	50,12	2651	43,29	5205	157,9
	5134	120,1	1047	95,21	3197	58,06	6519	165,8
	10110	126,3	1091	98,3	3283	70,77	7118	169,9
	28930	131,3	1217	102,7	2271	229,3	8649	171,4
	30160	131,8	1585	110,8	2186	235,2	18710	174,3
	30270	132,7	1603	113,5	3095	243,2	19010	175,2
	4914	141,1	1592	186,6	5627	253,1	18480	175,7
	3150	143,4	1562	188,5	7958	257,3	4841	181,7
	1792	150,4	1504	190,4	9984	259,8	3461	184,2
	806,7	163,6	846	203,9	10800	261	2836	189,1
	719,3	169,7	783,6	206,4	10900	261,4	2363	194
	719,2	300	782,4	207,9	10600	262,5	1085	208,2
			817,7	209,8	3336	267	952	212,9
			951,7	211,6	2553	270,9		
			911,9	213,3	2505	275,7		
					2459	285,6		
					2122	292		

Tabela 27 - Parâmetros de entrada de propriedades dos polímeros

<i>Material</i>	<i>Resina de CERA Estereolitografia</i>			
Identificação no Ansys	4	T [°C]	24	T [°C]
Densidade [kg/m³]	1130	25	1450	
Condutividade térmica [W/m*K]	0,18	25	1,09	
Calor específico [J/kg*K]	1820	50	1489	20,82
	2150	100	1984	28,17
	2450	200	2439	36,33
			3065	41,52
			5656	54,41
			6932	59,3
			6990	61,2
			6828	62,11
			6037	64,31
			4042	70,98
			3236	76,88
			2557	80,43
			2187	85,9

Tabela 28 - Parâmetros de entrada de propriedades da resina SL e da cera para microfusão

5.2 Estudos de caso

A validação dos modelos matemático e numérico apresentados neste trabalho de tese foi realizada empregando a sistemática apresentada ao final do Capítulo 4, e só é possível através da comparação com resultados de experimentos práticos.

Com o objetivo de obter resultados consistentes para as comparações e a conseqüente validação foram utilizadas duas peças com geometrias e dimensões distintas, para as quais foram construídos os insertos para a fabricação dos núcleos e para a injeção das peças plásticas.

Os materiais selecionados para serem empregados como núcleos foram criteriosamente selecionados e são representativos do universo disponível no mercado nacional. Os polímeros empregados, além de representarem os que em volume são mais transformados no Brasil, varrem uma faixa de temperaturas de processamento bastante grande e representativa.

5.2.1 Materiais e métodos

Tanto o modelo matemático quanto o modelo numérico serão considerados válidos se, para uma determinada combinação de materiais e de temperaturas, for possível prever os casos em que ocorrerá fusão dos núcleos.

Prever esta validação implica em adotar situações em que se tenha tanto o sucesso (não fusão) quanto o insucesso (fusão) da aplicação da técnica do núcleo perdido na injeção de peças ocas (esfera e dado), empregando insertos construídos pelo processo de estereolitografia.

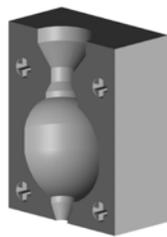
Ainda mais, é preciso (além de prever os sucessos e insucessos das combinações ensaiadas pelos modelos apresentados), verificar se a técnica não provoca maiores distorções dimensionais que o uso de insertos metálicos usinados em máquinas CNC (fabricação convencional).

Inicialmente foram definidas as geometrias das peças a serem empregadas neste estudo. Por serem bastante utilizadas em peças plásticas, optamos por escolher formas básicas, uma esfera e um cubo, como ponto inicial. A partir desta decisão algumas características geométricas construtivas (*features*) foram adicionadas às peças, para aumentar sua complexidade e permitir a facilidade de tomada de medições (por exemplo).

A partir do modelamento das peças, foram verificadas as características para a fabricação pela técnica do núcleo perdido, como necessidade de pontos de apoio para o núcleo e a relação de volumes da peça e do núcleo (já com seus apoios).

O projeto destas peças, assim como de seus núcleos, levou em conta um fator determinante no projeto, que era a possibilidade de empregar máquina injetora horizontal, já que uma deste tipo estava disponível para os ensaios. As decisões foram mais voltadas ao fato de que o núcleo deveria permanecer, de alguma forma, fixo à cavidade fêmea (placa fixa), sem deslocamentos durante o fechamento do molde.

Este problema de fixação do núcleo à cavidade foi solucionado pelo do uso de uma montagem por interferência entre o núcleo e a cavidade de injeção. Esta solução permitiu a fácil e rápida fixação do núcleo na cavidade, no tempo de molde aberto. Para aqueles núcleos que se encontravam com dimensão tal que não apresentavam interferência suficiente com a cavidade, a solução encontrada foi utilizar um pedaço de fita adesiva (fita isolante preta) para promover a interferência necessária para que o núcleo não caísse da cavidade.



A



B



C



D



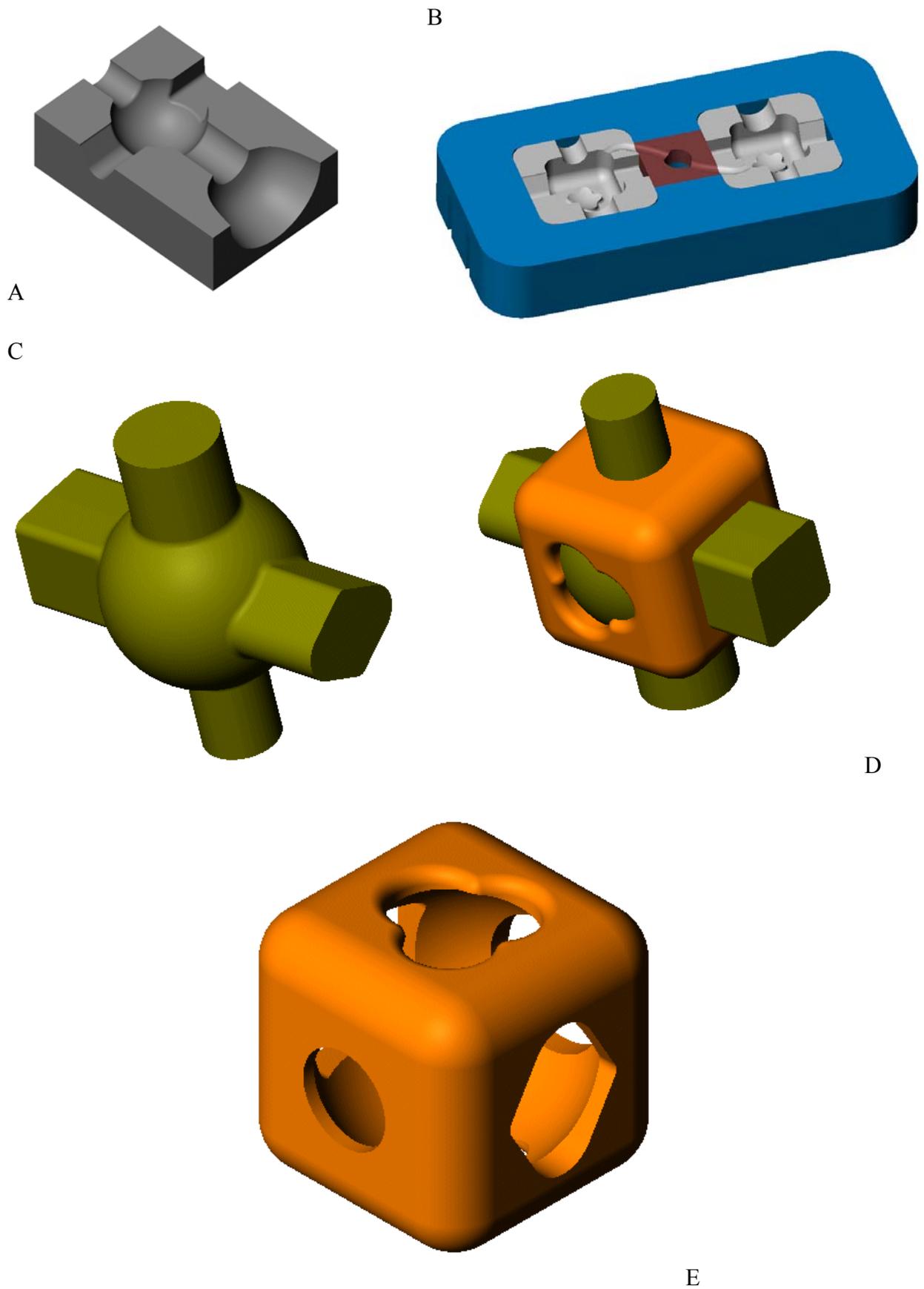
E

Figura 48 - Modelamento geométrico CAD da esfera

(A- cavidade para fundição do núcleo, B- cavidade para injeção da peça Esfera;
C- núcleo; D- esfera injetada sobre o núcleo; E- esfera)

Findo o processo de modelamento das peças a serem empregadas, no mesmo software foram modelados os insertos necessários para a fabricação dos núcleos – coquilhas, bem como os necessários para a moldagem por injeção – moldes.

Nesta etapa foi necessário o emprego de cálculos de coeficientes de contração e aplicação de ângulos de saída no processo de fundição, bem como estimativa da capacidade técnica (*capability*) do processo de fabricação das cavidades por estereolitografia. Foram consideradas as variações em função do preenchimento da parte traseira dos insertos, bem como o material removido no processo de acabamento da cavidade. Sendo assim, foi possível a obtenção da interferência necessária para que os núcleos permanecessem na posição desejada até o fechamento do molde. Os modelos geométricos decorrentes deste processo de modelamento estão apresentados nas Figura 48 e Figura 49.



A

B

C

D

E

Figura 49 - Modelamento geométrico CAD do dado
(A- cavidade para fundir o núcleo; B- cavidades para injetar o Dado; C- núcleo; D- dado injetado sobre o núcleo; E- peça dado)

Como, para a seleção e projeto das peças a serem empregadas, já se partiu da seleção de características adequadas à técnica do núcleo perdido, assim como já se previu a necessidade da interferência dos núcleos na cavidade de injeção para a sua fixação em máquinas injetoras verticais, após o modelamento geométrico das peças e o modelamento das cavidades (com seus ângulos de saída, massalotes, etc.), partiu-se para a análise reológica do processo de injeção empregando o software Moldflow.

Os modelos importados do CAD foram simulados numericamente, como comentado no Capítulo 4, e as características de processamento ali obtidas foram armazenadas para a aplicação nos modelos numéricos de simulação no Ansys e também para emprego nas moldagens de injeção utilizando os insertos construídos, tanto pelo processo de estereolitografia quanto pelo processo de usinagem por CNC.

Aplicado o modelo matemático para as diversas combinações possíveis de polímero e núcleo, na faixa de temperatura de processamento de cada material, em especial aquela determinada pela utilização do sistema CAE Moldflow, verificou-se que, para a peça Esfera, seriam poucas as possibilidades de termos a condição de fusão do núcleo durante o processo de injeção, enquanto que para a peça Dado, seriam mais significativas as manifestações de fusão do núcleo.

O modelo de simulação numérica no Ansys foi aplicado para todas as combinações de interesse e os resultados foram apresentados no Capítulo 4 (já comparados com os experimentos descritos neste capítulo).

5.2.2 Fabricação dos insertos

Findas as simulações e feitas as críticas da comparação entre o modelo matemático e o modelo numérico, partiu-se para a fabricação de insertos através de Estereolitografia. Este processo, empregando a máquina SLA-250 da *3D-Systems* é bastante automático e já foi amplamente descrito neste e em outros trabalhos.

Na Figura 50, apresentada a seguir, pode-se ter uma visão da máquina, bem como de uma camada da peça sendo varrida pelo laser para a cura da mesma. Nesta mesma ilustração pode-se perceber que tanto os insertos para a fabricação do núcleo quanto os insertos para a moldagem das peças são construídos simultaneamente. A grande preocupação, quando da distribuição e posicionamento das peças na bandeja de fabricação, é quanto à orientação das superfícies para a minimização do efeito escada, que prejudica o acabamento superficial das peças, e evitar a formação de volumes retidos, que podem provocar problemas no processo de adição das camadas consecutivas.

Após saírem da máquina, serem limpas, curadas em forno UV e em temperatura, as cavidades ou insertos recebem preenchimento da sua parte traseira em liga de baixo ponto de fusão ou em resina epóxi, com ou sem o emprego de tubos de cobre para facilitar a troca de calor.

Neste estudo de caso apenas empregamos o sistema de refrigeração com tubos de cobre engastados no material de preenchimento para a peça Dado. Para a peça esfera, apesar de os insertos terem sido construídos com os tubos de cobre, durante o processo de injeção, não foi circulada água de refrigeração.

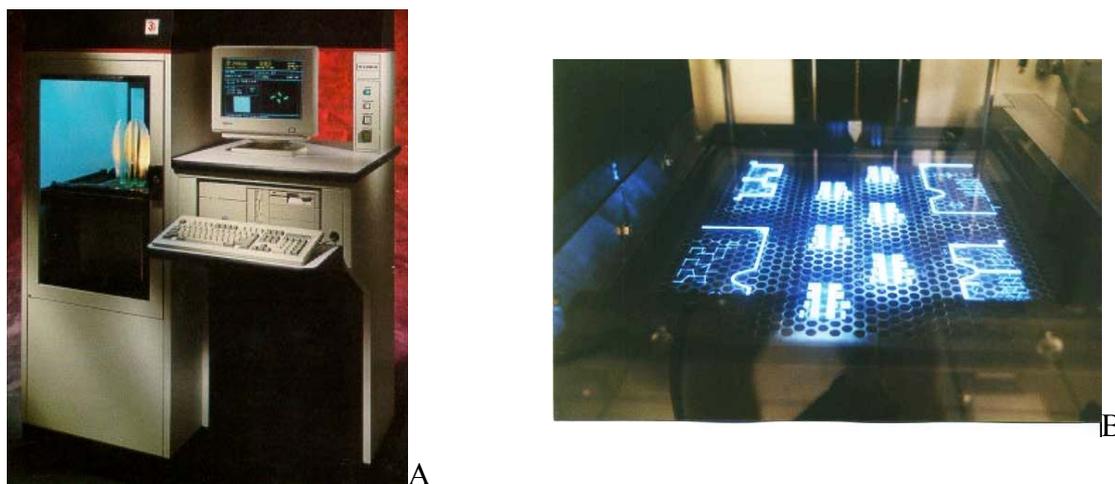


Figura 50- Fabricação dos insertos na máquina SLA-250
(A- máquina de estereolitografia, B- camada sendo varrida pelo laser)

Na Figura 51 e na Figura 52 pode-se observar as cavidades construídas para a peça esfera e para a peça dado, respectivamente. Nestas figuras tem-se tanto a coquilha para a fundição dos núcleos metálicos quanto as cavidades para moldagem por injeção. Em seguida vemos os núcleos metálicos em detalhe, e posicionados na cavidade, sendo retidos por interferência. Por fim, vemos as peças injetadas, ainda com o núcleo em seu interior.

Para a peça dado, optou-se por não realizar acabamento superficial nas cavidades, de forma que durante o processo de fabricação dos núcleos ou da moldagem por injeção fosse possível verificar até que ponto o efeito escada, no estado bruto, se torna visível no acabamento superficial das peças fabricadas.

Verificou-se, através da comparação do acabamento superficial dos núcleos e das peças injetadas, que o fator acabamento superficial é menos influente no acabamento superficial dos núcleos produzidos por fundição por gravidade.

Para os dois estudos de caso foi utilizado o mesmo porta-moldes e foi empregada apenas uma das cavidades para minimizar custos. A princípio considerou-se a hipótese de

empregar duas cavidades, uma de aço e uma produzida por ferramentaria rápida, para moldar simultaneamente duas peças, e compará-las. Porém, em função da grande diferença de parâmetros de injeção, este procedimento foi descartado e não tentado.



Figura 51 – Comprovação experimental para esfera em estereolitografia

(A- cavidade para fundir o núcleo; B- cavidades para injetar a Esfera; C- núcleo; D- núcleo posicionado na cavidade,; E- peça Esfera injetada sobre o núcleo)

Nas duas peças foram empregados extratores para as peças moldadas. O emprego de extratores implica em alguns cuidados especiais quando do modelamento e preenchimento dos inserts, já que estes não são furados após a fabricação, mas construídos com os inserts na máquina de estereolitografia. Por serem de material com dureza superior à da resina, é necessário extremo cuidado para não provocar danos à cavidade, quando do ajuste por meios abrasivos mecanizados.

Na peça esfera o extrator foi colocado junto à peça plástica, como normalmente ocorre na prática de moldagem de peças convencionais. Isto implica em uma marca na forma de ponto ou linha, na parte externa do produto. Pelo emprego da técnica do núcleo perdido, na peça Dado, os extratores foram posicionados nos apoios do núcleo, e tem a mesma eficiência, porém sem marcar a superfície da peça moldada. Este é, indiretamente, um atrativo para esta técnica.

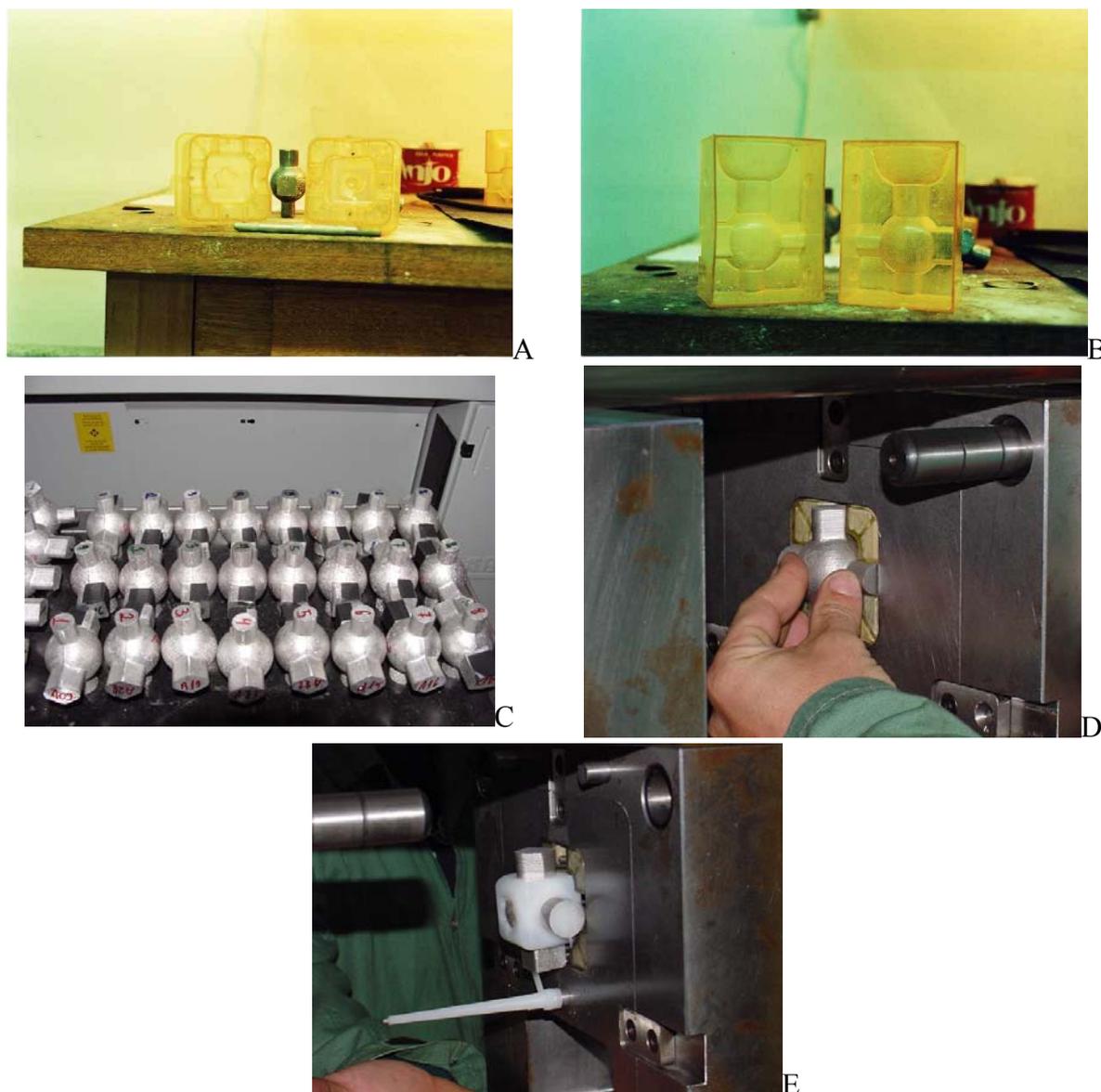


Figura 52 – Comprovação experimental para dado, cavidades em estereolitografia (A- cavidades para injetar o Dado; B- cavidade para fundir o núcleo; C- núcleos fundidos; D- núcleo posicionado na cavidade,; E- peça Dado injetada sobre o núcleo)

O ajuste das cavidades produzidas por estereolitografia no porta moldes também demanda bastante trabalho e atenção. O nivelamento da superfície de fechamento com a

superfície do porta moldes deve ser perfeito, caso contrário ocorrerão deslocamentos quando do processo de injeção, produzindo rebarbas nas peças ou, no outro extremo, poderá haver interferência em demasia entre os insertos, provocando rachaduras ou quebra na superfície de contato entre os insertos.

Como já comentado, a partir do modelamento das cavidades no programa CAD e a análise inicial pelo software de CAE moldflow, foi realizada a fabricação de insertos através de Usinagem CNC, apenas para a peça Dado. Estes insertos foram fabricados como estudo de caso da dissertação de Silva²⁹, utilizando a técnica de programação de estratégias por regiões, onde o procedimento e os detalhes de usinagem são adequadamente descritos.

Estas cavidades fabricadas em aço também não receberam acabamento superficial, como seria comum em moldes fabricados por esta técnica, com o intuito de verificar a influência do acabamento superficial, tanto da peça quanto das peças injetadas, bem como de comparar qualitativamente o acabamento superficial nas diferentes regiões (influência da inclinação e forma da superfície) da peça em aço e da peça em resina. O mesmo comportamento foi observado, em termos de acabamento superficial. Outra comparação qualitativa interessante é a de que, em algumas regiões, o efeito degrau é mais pronunciado nos insertos de resina, em outras, no aço. Isto se deve às estratégias de usinagem e ao posicionamento relativo das camadas de resina. Grosseiramente pode-se dizer que a cavidade produzida em resina apresenta melhor acabamento superficial.

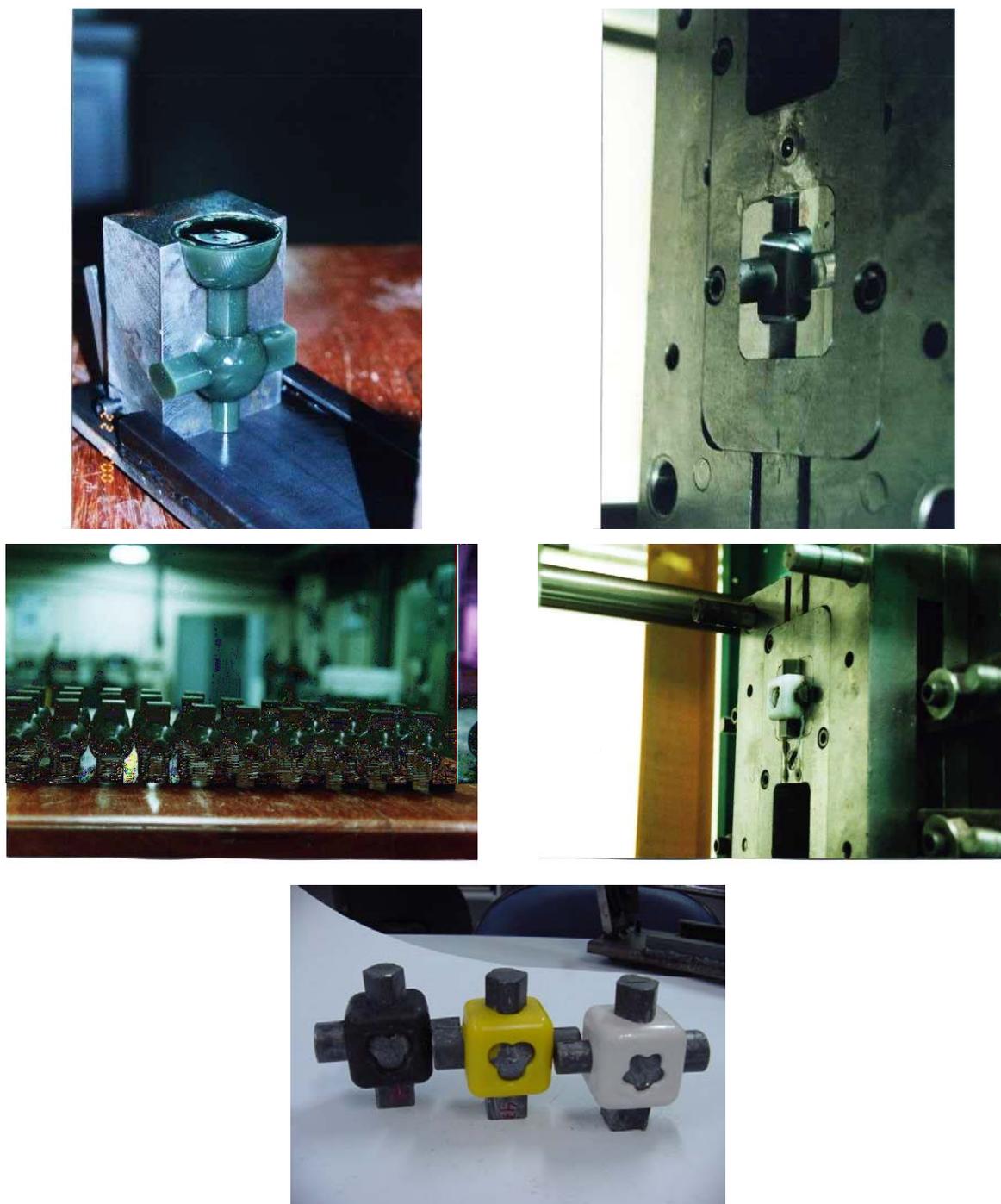


Figura 53 – Comprovação experimental para dado, cavidades em aço
 (A- cavidade para fundir o núcleo; B- cavidades para injetar o Dado; C- núcleos fundidos; D-
 peça Dado injetada sobre o núcleo; E- peça Dado injetada em diferentes materiais)

5.2.3 Fundição de núcleos metálicos para técnica do núcleo perdido

A fabricação experimental de peças fundidas, empregando tanto a coquilha em resina quanto a coquilha em aço requer alguns cuidados fundamentais quanto à segurança e à

eficiência do processo, principalmente quando estamos trabalhando com metais como o chumbo e ligas que contém o cádmio.

A segurança se reporta não somente à contaminação por fumos dos materiais fundidos, mas também em cuidados para evitar queimaduras e, por termos utilizado um sistema de aquecimento cujo combustível era gás liquefeito de petróleo, os devidos cuidados de proteção contra incêndio e explosões.

Um processo de fabricação mesmo experimental, pode ser dotado de medidas de controle de processo, como o registro e controle das condições ambientais e a precisão no acompanhamento e controle do processo para evitar discrepâncias nos valores dos materiais vertidos. A montagem do equipamento empregado pode ser vista na Figura 54, abaixo. No detalhe tem-se o banho, cuja temperatura era controlada através de um termômetro. Para a Liga 1 e para a a cera de microfusão, o banho empregado foi água, para as demais ligas foi empregado óleo de soja. A fundição dos núcleos em chumbo foi feita sem o emprego do banho, já que o ponto de fusão do mesmo é relativamente alto e, neste caso, os cuidados quanto aos fumos e a queimaduras devem ser redobrados.

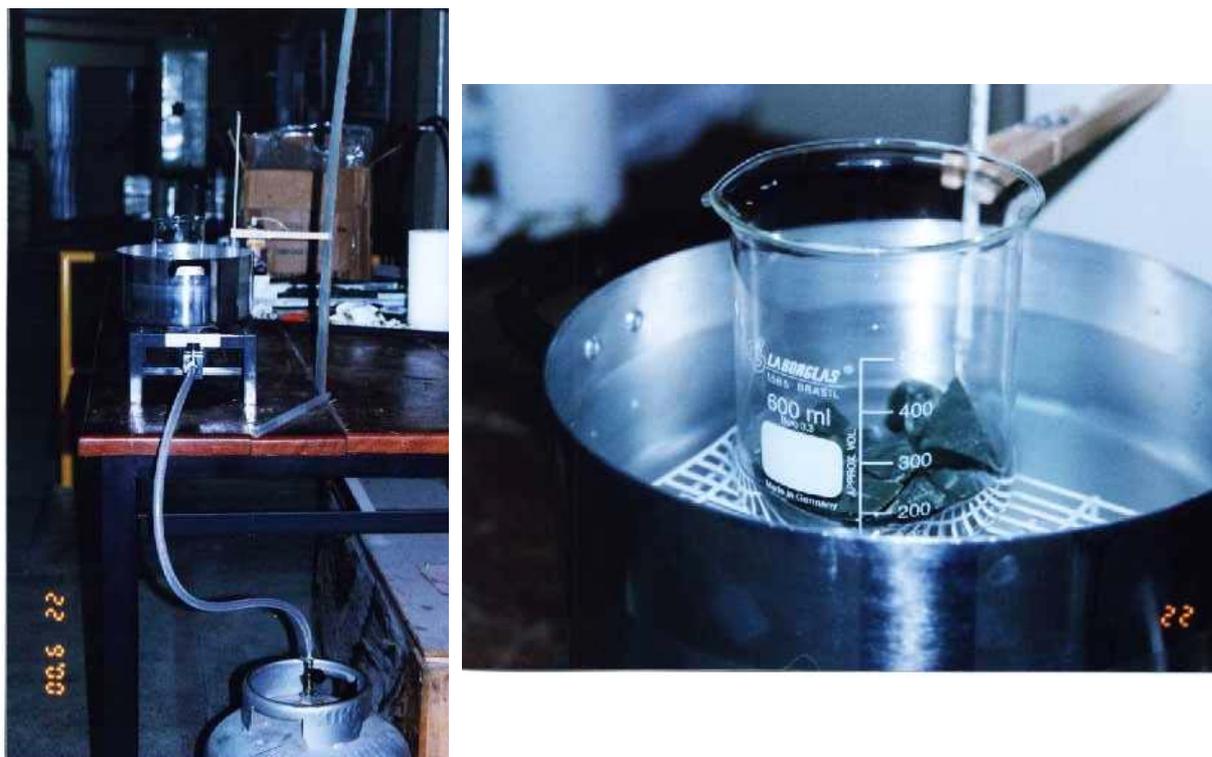


Figura 54 - Fabricação experimental dos núcleos

(dispositivo para aquecimento dos materiais empregados, em detalhe, à direita, fundição de cera para microfusão)

A coquilha metálica foi empregada para a produção do lote de peças em chumbo. Para facilitar o processo, foi fabricado um sistema de fixação e abertura da coquilha. Com isso se aumentou a produtividade e se evitaram problemas decorrentes do aquecimento das superfícies da mesma. O resfriamento, neste caso, era ao ar.

Para a coquilha construída em resina, não foi necessário o dispositivo de fixação e de abertura, já que as ligas empregadas tinham ponto de fusão baixo e também por se tratar de material mau condutor de calor. Para as peças produzidas nesta coquilha, em função da sua baixa condutividade térmica, e para agilizar o processo após a fusão, a coquilha com o metal eram imersos em banho de água a temperatura ambiente, para resfriamento rápido, até que pudesse ser aberta a coquilha e repetido o processo.

No processo de fundição por gravidade, tanto em coquilha em aço quanto em resina, é imprescindível o emprego de desmoldante líquido a base de silicone, o mesmo empregado para limpeza doméstica e de automóveis. Outro fator interessante é que, apesar de parecer estranho, a desmoldagem é feita a quente, antes da total solidificação do massalote. Neste estudo o tempo de resfriamento para as peças era de 5 minutos em água, antes da abertura da coquilha e desmoldagem da peça.

As dimensões das peças produzidas foram controladas e os valores estatísticos destas medidas foram reproduzidos nas Tabelas 34 a 37. As dimensões apresentadas podem ser acompanhadas pela Figura 57.

5.2.4 Fundição de modelos para fundição por cera perdida

No Capítulo 2 deste trabalho foi apresentada a técnica *QuickCast*, baseada em estereolitografia, e que foi bastante bem descrita no trabalho de Grellmann⁴⁰. Partindo do princípio de funcionamento da mesma, pode-se apresentar uma alternativa para a fabricação de um lote de peças pela fundição pela cera perdida, que é a fabricação de modelos em cera a partir de uma coquilha de resina, utilizando fundição por gravidade.

Outra aplicação para a fundição de modelos em cera para microfusão é o seu emprego diretamente na técnica do núcleo perdido, apesar de suas propriedades, principalmente a condutibilidade térmica, apresentarem valores que não correspondem aos requisitos necessários para o seu emprego ($B \gg I$).

Aproveitando a disponibilidade dos insertos e dos dispositivos necessários para a fusão e moldagem da cera de microfusão, neste trabalho de tese foram fabricados diversos núcleos em cera, sendo avaliadas suas dimensões, assim como sua aplicabilidade na moldagem por injeção.

A cera rapidamente se resfria na região próxima às paredes da coquilha e é facilmente desmoldada neste estágio, estando ainda líquida no interior da peça. Esta desmoldagem prematura é também empregada nas fundições que produzem peças através do método da cera perdida. Para a cera, empregamos duas técnicas distintas para verificar a influência do controle de temperatura na precisão dimensional: controle de temperatura realizado (ou não) no banho de aquecimento e controle de desmoldagem que se dava pela espessura da camada solidificada no massalote. Por ser apenas um teste, empregamos apenas a peça Dado nestes estudos com a cera de microfusão. A coquilha em aço e a coquilha em resina foram empregadas no estudo e as informações dos valores estatísticos referentes ao controle dimensional está apresentado na Tabela 34 e na Tabela 37.

5.2.5 Resultados das moldagens por Injeção

Na Figura 55 está representada a máquina injetora Arburg 320-S, empregada para as moldagens por injeção neste trabalho. Na Tabela 29, apresentada abaixo pode-se observar os parâmetros principais que foram utilizados na moldagem por injeção da peça Dado. Observa-se nesta tabela que, além da diferença de temperatura de injeção, o valor das pressões de injeção também varia significativamente.



Figura 55 - Máquina injetora empregada nos estudos - Arburg 320-S

<i>Material</i>	<i>Faixas de Temperatura [°C]</i>	<i>Pressão de Injeção [bar]</i>	<i>Velocidade de Injeção [mm/s]</i>	<i>Pressão de Recalque [bar]</i>	<i>Velocidade de Pressão de Recalque [mm/s]</i>	<i>Vazão [cm³/s]</i>	<i>Volume [cm³]</i>
PEAD	165-170-175-180-185	325	103,9	280	12,7	100	1,96
ABS	180-185-190-195-200	385	129,9	340	12,7	125	1,96
PA	280-285-290-290-295	277	103,9	340	12,7	100	1,96

Tabela 29 - Condições de injeção reguladas na injetora para o dado 3D

Na Tabela 30 observa-se, também, a grande diferença de parâmetros regulados para a pressão de recalque e o tempo de resfriamento.

A regulagem da máquina teve como valor inicial os parâmetros determinados nas análises de preenchimento e fluxo realizadas no Moldflow, mas passaram por ajustes na inicialização do processo para permitir o total preenchimento evitando rebarbas. Em resumo, pode-se dizer que a regulagem da máquina busca obter peças boas e atua-se principalmente nas velocidades, pressões e tempos, tendo como parâmetros os problemas ou defeitos apresentados nos produtos injetados.

<i>Material</i>	<i>Tempo 2^a Pressão (Recalque)</i>	<i>Tempo de Resfriamento</i>
PEAD	2 s	35 s
ABS	6 s	40 s
PA	6 s	7 s

Tabela 30 - Condições de recalque e resfriamento reguladas para o dado 3D

Optou-se por produzir um lote de 100 peças Esfera para verificar a capacidade de produção seriada pela técnica do núcleo perdido. Como este estudo buscava verificar a condição de produção dos núcleos, processo de injeção e processo de remoção de forma sequencial e rápida fez-se possível apenas a combinação assinalada na Tabela 33, abaixo.

Esta combinação foi selecionada por ser o PEAD de fácil moldabilidade e por esta não ter apresentado predição de fusão pelo modelo matemático e simulação numérica. Este estudo foi qualitativo e serviu para um melhor entendimento dos métodos empregados para a fabricação dos núcleos e injeção das peças plásticas.

<i>Par de materiais injetado</i>	<i>PEAD $T_{inj}=185^{\circ}C$</i>	<i>ABS $T_{inj}=200^{\circ}C$</i>	<i>PA $T_{inj}=295^{\circ}C$</i>
Cera			
Liga 1	Não Fundiu		
Liga 2			
Liga 3			

Tabela 31 - Situação qualitativa do núcleo nas moldagens por injeção da peça esfera

O processo de injeção das peças, a partir da entrada em regime e da regulagem adequada dos parâmetros, se deu de forma bastante satisfatória. Com uma certa prática é possível o posicionamento do núcleo na cavidade com bastante agilidade. Sendo assim, a repetibilidade se estabeleceu e o tempo de ciclo (entre injeções) atingiu um valor de um minuto, aproximadamente, o que é bastante aceitável para uma peça de tais dimensões, e significativamente mais realista do que permanecer por 5 minutos com o molde aberto para resfriamento de sua superfície, como pregado por diversos autores.

Não foi empregada refrigeração do inserto e não foi utilizada outra forma de refrigeração da cavidade, além da aplicação, a cada cinco peças, de desmoldante de silicone.

Ao final da injeção das 100 peças a cavidade não apresentou sinais de fadiga ou de falha, apesar das condições de resfriamento restritas.

Isto vem comprovar a efetividade do emprego dos núcleos metálicos para remover rapidamente calor da peça, não permitindo que a cavidade se aqueça muito e se fragilize.

Após a injeção, as peças eram imediatamente colocadas em banho de glicerina aquecida a $80^{\circ}C$ para remoção do núcleo. A partir de uma certa quantidade de peças injetadas, e núcleos removidos, optou-se por excluir a glicerina do processo e realizar a fusão dos núcleos diretamente na liga fundida, já que o controle da temperatura era automático e se mantinha o banho a cerca de $72^{\circ}C$, pois esta é a temperatura de mudança de fase da mesma. Isto facilitou bastante o processo de remoção.

A opção para os ensaios com a peça Dado, já que esta apresentava a possibilidade de ter-se fusão de algumas das combinações, foi a de injetar as combinações apresentadas na Tabela 33, abaixo. As células destacadas representam as combinações para as quais o modelo matemático não apresentou o mesmo resultado encontrado na simulação numérica e na experimentação prática.

De cada liga foram produzidos cerca de 30 núcleos considerados bons, em termos de acabamento superficial. O controle dimensional dos mesmos, bem como as relações estatísticas representativas dos lotes são apresentados na Tabela 36.

Estes núcleos foram separados novamente em grupos de 8, alocados para cada combinação de liga e polímero, como mostrado na Tabela 32. Os núcleos excedentes eram recolocados nas combinações para as quais tinham maior probabilidade de vida. No caso da Liga 1, para a qual dispúnhamos de apenas 28 núcleos com bom acabamento superficial, foram adicionados 2 núcleos com acabamento satisfatório.

O objetivo de empregar estes núcleos extras, além de confirmar a condição de não fusão dos mesmos, era o de permitir uma maior folga para regulação dos parâmetros da máquina, já que teríamos ao menos 24 peças injetadas em cada material, e também teríamos 24 peças injetadas sobre as diferentes ligas, o que forma uma amostra suficiente para análise.

<i>Par de materiais injetado</i>	<i>PEAD</i>	<i>ABS</i>	<i>PA</i>
Liga 1	8 + 6	8	8
Liga 2	8	8 + 6	8
Liga 3	8	8	8 + 6

Tabela 32 - Distribuição dos núcleos na moldagem por injeção

O resultado qualitativo das injeções pode ser observado na Tabela 33. As células destacadas representam as combinações para as quais o modelo matemático não apresentou o mesmo resultado encontrado nas simulações numéricas e na experimentação prática. Este fato já foi comentado no Capítulo 4.

A determinação de fusão ou não das peças foi realizada em duas etapas. A primeira e, nos casos mais evidentes, logo após a abertura do molde, pela observação do gotejamento da liga fundida pelos orifícios da peça. E a segunda, após a fusão e remoção dos núcleos, pela observação da parte interna das peças, que, em princípio seria esférica. Qualquer fusão do núcleo, especialmente localizada antes do total endurecimento do polímero, implica em deformação da forma interna da peça.

<i>Par de materiais injetado</i>	<i>PEAD</i> <i>Tinj=185°C</i>	<i>ABS</i> <i>Tinj=200°C</i>	<i>PA</i> <i>Tinj=295°C</i>
Cera	Fundiu	Fundiu	Fundiu
Liga 1	Não Fundiu	Não Fundiu	Fundiu
Liga 2	Não Fundiu	Não Fundiu	Fundiu
Liga 3	Não Fundiu	Não Fundiu	Não Fundiu

Tabela 33 – Situação qualitativa do núcleo nas moldagens por injeção da peça dado

No processo de injeção da peça dado foi empregado sistema de refrigeração por canais de cobre engastados no material metálico de baixo ponto de fusão empregado para o preenchimento da parte traseira dos insertos.

Ao usar a cavidade metálica para a injeção dos mesmos polímeros não empregamos refrigeração nem sistema de extração, o que dificultou um pouco o processo de fabricação das peças. Ainda assim, porém, as peças obtidas foram consideradas boas. Neste caso não houve fusão do núcleo, já que o material empregado para a confecção do mesmo foi o chumbo, cujo ponto de fusão elevado não permite a remoção das peças plásticas.

O estudo com as cavidades metálicas teve por objetivo a comparação dimensional com o produto obtido nas cavidades fabricadas em resina pelo processo de estereolitografia, apesar de as condições de moldagem não serem exatamente as mesmas.

5.2.6 Remoção dos núcleos metálicos por fusão

O processo de remoção dos núcleos do dado foi realizado após o controle dimensional das peças injetadas, ou seja, os núcleos e as peças encontravam-se a temperatura ambiente e foram aquecidos até a temperatura de fusão do núcleo.

No processo de remoção dos núcleos, que foi realizado de forma controlada, foram testadas algumas substâncias diferentes para emprego como meio de transmissão de calor. Algumas, como o fluido de radiador, com aditivos de cor, mancham as peças; o óleo, além da possibilidade de ataque químico, impregna as peças, o que dificulta a sua limpeza; a água só pode ser empregada para a liga com ponto de fusão de 72°C, etc..

A substância que mais se adaptou ao processo, empregando um banho de óleo vegetal para aquecimento na forma de banho-maria, foi a glicerina. Além de não atacar a liga e o polímero, é uma substância atóxica e inodora. Também na remoção dos núcleos da peça dado, a partir de um certo volume de liga fundida, optamos pela remoção dos núcleos em banho, diretamente com a liga empregada, por facilitar, e muito, o processo de controle da temperatura. Um banho automático viria facilitar este processo de forma bastante produtiva. A Figura 56, apresenta o processo de remoção em algumas etapas distintas, início da fusão, fusão dos apoios, fusão parcial e fusão total, quando as peças plásticas vem automaticamente à superfície, em função de sua menor densidade. Por fim, nesta figura, são apresentadas peças com e sem o núcleo, para comparação. A montagem do experimento para a remoção dos núcleos foi a mesma empregada para a fundição dos mesmos.

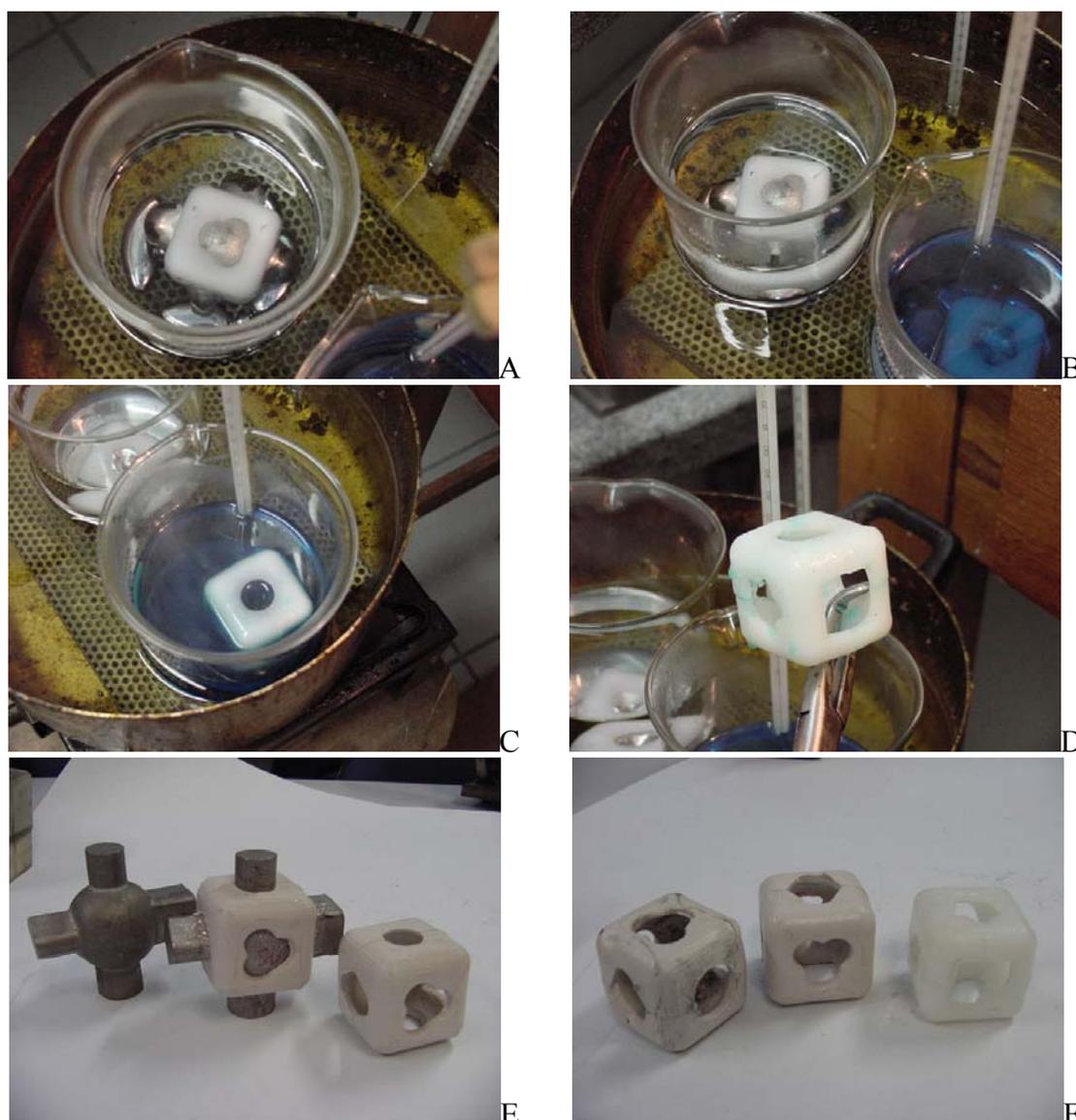


Figura 56 - Remoção dos núcleos em banho de glicerina e fluido de radiador (escuro)
 (A- início da remoção do núcleo em banho aquecido; B- fusão parcial do núcleo; C- fusão total do núcleo; D- remoção da peça do banho aquecido; E- núcleo, peça injetada sobre o núcleo e peça Dado; F- peça dado produzida em diferentes materiais)

5.2.7 Controle dimensional do processo

Nas tabelas abaixo são apresentadas as medidas de tendência central das dimensões realizadas, tanto nos núcleos quanto nas peças injetadas. Os pontos onde foram tomadas as medidas são mostrados para o núcleo e para a peça na Figura 57 e na Figura 58, respectivamente.

É importante ressaltar que as medidas iniciais das coquilhas e das cavidades de injeção não são exatamente iguais e, por isso, a análise das diferenças se torna mais representativa. Realizando-se uma comparação direta entre as amostras, estaríamos impondo um erro sistemático a uma das medidas. Na Tabela 40 são apresentadas as combinações entre

cavidades metálicas e em resina que foram comparados (pelas diferenças) em análise de variância – ANOVA. Apenas se mostraram semelhantes significativamente (poderiam pertencer à mesma amostra) as Liga 1 e 2, fundidas em cavidade de estereolitografia, e a cera de microfusão, controlada e não controlada, fundida em cavidade de aço.

Esperava-se que estas diferenças não fossem significativas, ao menos para os polímeros injetados. Verifica-se assim, porém, que realmente a influência da condutibilidade térmica da cavidade influi diretamente na precisão dimensional das peças obtidas.

As medições foram feitas sob as mesmas condições, empregando paquímetro da marca Mytutoyo, com incerteza de medição de 0,05 mm e faixa de medição de 0 a 180 mm.

<i>Coquilha Metálica</i>	<i>Chumbo [1]</i>					
	A	B	C	D	E	F
N	77	77	77	77	77	77
Média	38,64	19,74	23,39	19,30	14,88	19,87
Mediana	38,65	19,75	23,35	19,30	14,90	19,85
Moda	38,6	19,7	23,35	19,3	14,9	19,8
Desvio Padrão	0,077	0,077	0,085	0,124	0,085	0,090
Valor Máximo	39,00	20,15	23,80	19,70	15,40	20,30
Valor Mínimo	38,55	19,65	23,30	19,10	14,80	19,75

Tabela 34 - Controle dimensional dos núcleos fundidos em chumbo na cavidade metálica

<i>Coquilha Metálica</i>	<i>Cera [2]</i>						<i>Cera Controlada [3]</i>					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
N	64	64	64	64	64	64	32	32	32	32	32	32
Média	38,20	19,59	23,16	18,90	14,71	19,61	38,21	19,58	23,18	18,72	14,69	19,62
Mediana	38,20	19,60	23,13	18,90	14,70	19,65	38,20	19,55	23,20	18,78	14,70	19,63
Moda	38,2	19,6	23,1	19	14,7	19,65	38,2	19,55	23,2	18,8	14,7	19,7
Desvio Padrão	0,115	0,096	0,106	0,171	0,108	0,102	0,097	0,065	0,072	0,178	0,082	0,129
Valor Máximo	38,50	20,00	23,50	19,20	15,10	19,85	38,35	19,75	23,30	19,05	14,80	19,85
Valor Mínimo	37,90	19,40	22,95	18,20	14,50	19,20	38,00	19,50	23,05	18,15	14,40	19,30

Tabela 35 - Controle dimensional dos núcleos em cera fundidos na cavidade metálica

<i>Coquilha Estereolitografia</i>	<i>Liga 1 [4]</i>						<i>Liga 2 [5]</i>						<i>Liga 3 [6]</i>					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
N	28	28	28	28	28	28	31	31	31	31	31	31	30	30	30	30	30	30
Média	39,49	20,38	24,08	19,89	15,61	20,47	39,46	20,45	24,05	20,08	15,66	20,45	39,27	20,25	23,93	19,89	15,48	20,31
Mediana	39,50	20,38	24,10	19,88	15,60	20,45	39,50	20,45	24,05	20,05	15,65	20,45	39,30	20,28	23,90	19,90	15,50	20,30
Moda	39,4	20,25	24	20	15,5	20,4	39,5	20,3	24	20	15,5	20,4	39,3	20,3	23,9	19,9	15,55	20,3
Desvio Padrão	0,140	0,147	0,187	0,196	0,174	0,099	0,104	0,171	0,062	0,114	0,152	0,093	0,077	0,120	0,103	0,151	0,090	0,090
Valor Máximo	39,80	20,75	24,40	20,55	16,10	20,70	39,70	20,80	24,15	20,40	16,00	20,70	39,40	20,50	24,25	20,20	15,65	20,50
Valor Mínimo	39,10	20,15	23,35	19,60	15,40	20,25	39,20	20,00	23,90	19,90	15,45	20,30	39,15	20,05	23,80	19,65	15,30	20,10

Tabela 36 - Controle dimensional dos núcleos fundidos em liga na cavidade de estereolitografia

<i>Coquilha</i>	<i>Cera Controlada [7]</i>					
<i>Estereolitografia</i>	A	B	C	D	E	F
N	42	42	42	42	42	42
Média	38,56	19,77	23,47	19,64	15,10	20,01
Mediana	38,60	19,80	23,45	19,60	15,10	20,00
Moda	38,7	19,8	23,5	19,6	15,05	20
Desvio Padrão	0,226	0,083	0,121	0,191	0,095	0,123
Valor Máximo	38,80	20,00	23,85	20,35	15,30	20,30
Valor Mínimo	37,55	19,60	23,30	19,30	14,95	19,75

Tabela 37 - Controle dimensional dos núcleos fundidos em cera na cavidade de estereolitografia

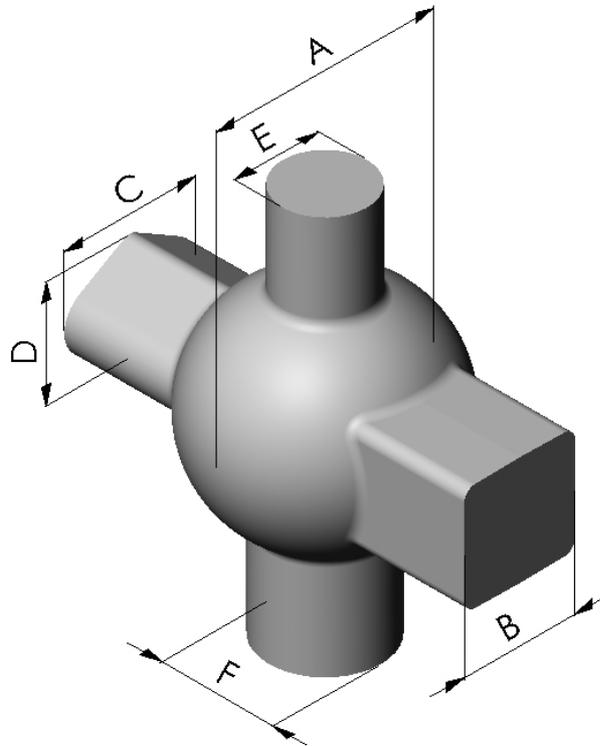


Figura 57- Medidas realizadas no núcleo do dado

<i>Cavidade Metálica</i>	<i>PEAD [8]</i>			<i>ABS [9]</i>			<i>PA [10]</i>		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
N	25	25	25	25	25	25	24	24	24
Média	39,64	39,63	39,24	39,89	39,89	39,74	39,67	39,73	39,64
Mediana	39,65	39,60	39,25	39,90	39,90	39,75	39,70	39,70	39,65
Moda	39,65	39,6	39,2	39,9	39,9	39,75	39,7	39,7	39,6
Desvio Padrão	0,035	0,041	0,062	0,030	0,023	0,128	0,043	0,074	0,084
Valor Máximo	39,70	39,70	39,35	39,90	39,90	39,90	39,70	39,85	39,80
Valor Mínimo	39,60	39,55	39,15	39,80	39,85	39,20	39,55	39,55	39,45

Tabela 38 - Controle dimensional das peças injetadas na cavidade metálica

<i>Cavidade Estereolitografia</i>	<i>PEAD [11]</i>			<i>ABS [12]</i>			<i>PA [13]</i>		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
N	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Média	40,388	40,258	40,198	40,452	40,405	40,352	40,208	40,133	40,227
Mediana	40,4	40,275	40,125	40,5	40,25	40,325	40,2	40,125	40,125
Moda	40,4	40,05	40,1	40,5	40,2	40,25	40	40	40
Desvio Padrão	0,182	0,318	0,242	0,152	0,317	0,173	0,245	0,372	0,310
Valor Máximo	40,8	40,75	40,75	40,75	41,15	40,75	40,6	41	41
Valor Mínimo	40	39,5	39,8	40,15	40,05	40,1	39,7	39,5	39,7

Tabela 39 - Controle dimensional das peças injetadas na cavidade de estereolitografia

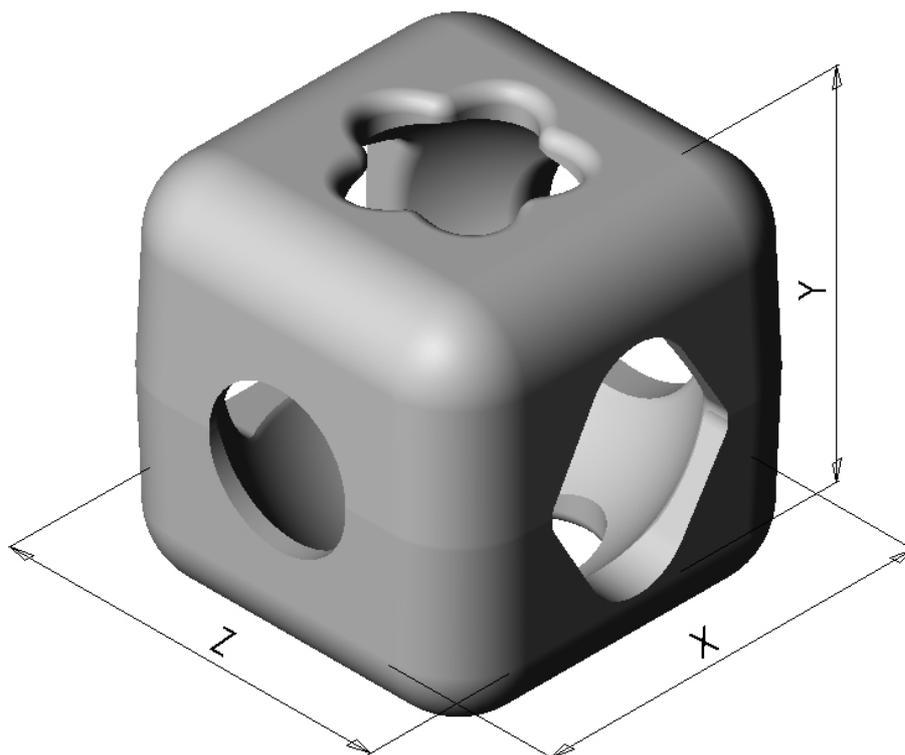


Figura 58- Medidas realizadas na peça dado

Por fim, foram tentadas a injeção de núcleos fabricados em cera de microfusão para a moldagem por injeção, porém os modelos matemático e numérico já indicavam que haveria fusão para a peça dado. Na peça esfera, a fusão também se verificou, em face da distribuição do calor de maneira não uniforme, como previsto também pelo modelo de simulação numérica.

<i>Coquilha Metálica</i>		<i>Chumbo [1]</i>	
Coquilha Estereolitografia	Liga 1 [4]	Liga 2 [5]	Liga 3 [6]
<i>Coquilha Metálica</i>		<i>Cera [2]</i>	<i>Cera Controlada [3]</i>
Coquilha Estereolitografia	Cera Controlada [7]		
<i>Molde Metálico</i>	<i>PEAD [8]</i>	<i>ABS [9]</i>	<i>PA [10]</i>
Molde Estereolitografia	PEAD [11]	ABS [12]	PA [13]

Tabela 40 - Pares comparados estatisticamente

5.3 Discussão

Ao buscar materiais para serem empregados para a fabricação de um produto ou para teste na forma de estudo de caso, em um trabalho de pesquisa, é necessário atentar para os fenômenos envolvidos no processo. É a partir do conhecimento profundo dos processos envolvidos e de seu modelamento matemático que será possível determinar que propriedades são relevantes.

Se o valor de algumas propriedades específicas, como a condutibilidade térmica, já são difíceis de obter para diversos materiais, obter o valor destas propriedades como função da temperatura é ainda mais trabalhoso e, muitas vezes, difícil, implicando em necessidade de ensaios de caracterização dos materiais.

A determinação das propriedades, seja em uma dada temperatura ou em uma faixa de temperaturas, implica normalmente em um custo para a realização destes ensaios, sem levar em consideração o tempo demandado, que muitas vezes pode ser bastante significativo. É preciso ponderar se este investimento em capital e tempo vai implicar em um retorno significativo na precisão das informações e sua aplicação prática. No nosso caso pode-se afirmar que, para o grau de precisão desejado, a consideração de que as propriedades das ligas não variam com a temperatura foi satisfatória, já que o comportamento do modelo numérico foi similar ao encontrado nos experimentos práticos.

Nos fenômenos estudados, caracterizar a variação do calor específico dos polímeros injetados como função da temperatura se tornou fator relevante para que o modelo empregado

na simulação numérica apresentasse resultados satisfatórios. Sem isto, este não apresentaria uma representação fiel do fenômeno em estudo.

O emprego do DSC, para polímeros, é uma prática bastante conhecida e difundida e permite, em muitos casos, a determinação do tipo de polímero empregado em função da curva característica. O objetivo deste estudo não é discorrer profundamente a respeito dos princípios de seu funcionamento, mas demonstrar que este pode ser empregado fácil e rapidamente para a obtenção dos valores do calor específico em função da temperatura.

Foi interessante a análise dos resultados dos ensaios DSC principalmente na comparação do ABS com os demais polímeros, já que este apresenta um comportamento amorfo e não cristalino como os demais.

As análises DSC para as ligas de baixo ponto de fusão não produziram resultados aproveitáveis neste estudo, já que para diversos valores de temperatura os ensaios apresentaram resultados negativos de calor específico. Em parte, pelo estudo da técnica, pode-se supor que a grande diferença a menor do calor específico das ligas com relação ao alumínio empregado no procedimento, pode ter provocado este comportamento, gerando os valores negativos. Para simulações que busquem uma representação mais refinada do fenômeno, a determinação da função calor específico para as ligas talvez se torne necessária.

A opção por empregar duas peças distintas no estudo de caso permitiu a avaliação de diversos fatores, qualitativos e quantitativos, além da possibilidade de implementações sucessivas nos protocolos empregados para aplicação da técnica. A diferença significativa dos valores de V_n/V_p , bem como as diferentes janelas de injeção, permitiram obter condições limites de fusão e não fusão dos núcleos, além das possibilidades de avaliação dimensional do processo de fundição dos núcleos e injeção das peças plásticas.

Estes estudos de caso permitiram os ajustes necessários no modelo numérico, bem como a avaliação do modelo matemático apresentado, demonstrando a sua aplicabilidade.

O emprego das cavidades metálicas, e o acompanhamento do seu processo de fabricação, nos permite afirmar que a usinagem CNC para a fabricação dos insertos não é significativamente mais demorada do que o processo através de estereolitografia, porém necessita que diversos dispositivos e ferramentas estejam disponíveis.

A etapa de fabricação que envolve o acabamento superficial das superfícies para minimizar o efeito escada, normalmente é realizado por abrasão, manualmente, pelo operador. Esta etapa pode aumentar a imprecisão dimensional e de forma da cavidade, de maneira irregular. Abolir o acabamento superficial, em muitos casos, além de economizar tempo na produção do inserto, não implica em marcas superficiais tão significativas. Dependendo da situação, é mais interessante não realizar o acabamento superficial.

As cavidades de estereolitografia para a fundição das ligas metálicas de baixo ponto de fusão apresentaram um comportamento bastante bom. Apesar dos choques térmicos de resfriamento a que foram submetidas, não apresentaram sinais de desgaste ou de fadiga térmica, apesar de as temperaturas de vazamento chegarem até a 130°C (para a Liga 3).

A fabricação dos núcleos em cera nos permite uma nova aplicação na fundição pelo processo de cera perdida para a fabricação de modelos de fundição. Ao invés de empregarmos diretamente a metodologia do *QuickCast*, com os modelos em resina, pode-se fabricar, fácil e rapidamente, coquilhas que permitem a produção de vários modelos em cera, barateando o processo.

O processo de moldagem por injeção, tanto em cavidades em aço quanto em cavidades de resina, tem suas peculiaridades. Uma boa regulagem da máquina, a partir de parâmetros obtidos nas simulações CAE, permite um menor número de iterações até o sucesso do processo, obtendo peças boas. À medida que a cavidade SL vai se degradando, é preciso atuar sobre o processo, alterando seus parâmetros em busca da obtenção de uma sobrevida nos insertos. No nosso estudo de caso para a peça esfera, as 100 injeções foram feitas sequencialmente. No caso da peça dado, cada polímero foi injetado em um dia diferente, para permitir as análises dos resultados e as preparações necessárias, como o pré-aquecimento dos materiais.

A condição ideal para que fossem significativas as comparações entre as cavidades metálica e de resina, no parâmetro dimensional, seria a fabricação simultânea das peças (fusão de núcleos e moldagem por injeção). Porém esta condição não foi empregada neste estudo, prejudicando as comparações idealizadas.

O processo de remoção dos núcleos em banho controlado com glicerina ou metal na mudança de fase, inicialmente suposto como fator complexo no processo, se revelou como a etapa mais simples. As peças, à medida que o núcleo se funde, vêm à tona e são facilmente limpas.

Uma análise estatística de variância foi realizada sobre as informações recolhidas, buscando verificar a significância da diferença entre o emprego das cavidades em aço e em resina. O fator interessante e, decorrente principalmente do caráter experimental da fabricação é que apenas as Ligas 1 e 2 fundidas na cavidade de resina, e a cera controlada, fundida na cavidade metálica, apresentaram semelhança. Com base nestas análises pode-se afirmar que o comportamento dimensional dos componentes obtidos é inegavelmente dependente do material do qual as cavidades são construídas. Não pode-se, portanto, supor que uma peça processada em uma cavidade de resina vá apresentar comportamento dimensional semelhante ao de uma peça processada em uma cavidade de um material com propriedades tão diferentes

quanto o aço. Entretanto, se comparada a variação em torno da média dos processos, pode-se afirmar que a sua capacidade de produção atinge os valores esperados.

Por fim, pode-se dizer que o emprego da cera de microfusão como núcleo para a moldagem por injeção de peças plásticas não é viável.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

O Capítulo 6, aqui apresentado, resume as contribuições da pesquisa e aponta possíveis trabalhos futuros derivados deste.

Em função da maior consciência ecológica e em virtude de condições econômicas, a migração para a utilização de materiais recicláveis na fabricação de bens de consumo é definitiva.

A fabricação de produtos em pequenos lotes ou peças únicas é uma necessidade atual. As limitações, tecnológicas e econômicas, antes impostas, estão sendo removidas com o desenvolvimento de novas tecnologias.

A moldagem por injeção, através da ferramentaria convencional tem crescido muito para acompanhar a demanda por novos produtos injetados em termoplásticos. Este processo, apesar de antigo, ainda apresenta características de empirismo no desenvolvimento de moldes. O processamento dos polímeros, bem como os polímeros propriamente ditos, também estão em constante desenvolvimento, o que faz com que se tenha um conhecimento superficial de todo o processo ou um conhecimento profundo sobre um campo específico.

A prototipagem rápida é uma ferramenta moderna, com diversas aplicações para a redução do ciclo de projeto dos produtos. Cada fabricante de equipamento desenvolveu uma técnica para obter os objetos a partir da fabricação por adição de material (usualmente em camadas). Classificar estes métodos, agrupando-os em categorias não é tarefa fácil.

A ferramentaria rápida surgiu como forma de se baratear a multiplicação de protótipos fabricados em máquinas de fabricação por camada, além de atender à demanda do campo de moldagem por injeção, na fabricação de pequenos lotes de peças. Esta possui algumas limitações que se justificam em função da facilidade de obter os componentes. É uma questão de relação de compromisso entre qualidade do produto obtido e o custo (tempo) demandado.

A ferramentaria rápida baseada em estereolitografia pode ser abordada através de algumas técnicas já solidificadas no mercado e entre os pesquisadores. Quando se trabalha com a moldagem por injeção pode-se esbarrar em dois fatores cruciais no desenvolvimento do projeto: a fragilidade das cavidades produzidas e a baixa condutividade térmica da resina. Estes dois fatores fazem com que seja necessário trabalhar com parâmetros de injeção “reduzidos” e com que o tempo de ciclo seja bastante longo, para preservar a cavidade e ser possível obter o maior número de peças. Todos os relatos encontrados são da moldagem de

peças simples, ou utilização de mecanismos complexos de desmontagem do molde para desmoldagem da peça injetada, o que não é prático.

Pode-se empregar a seguinte definição para a técnica do núcleo perdido: a utilização de um núcleo maciço, com precisão dimensional, constituído de um metal de baixo ponto de fusão, recoberto por polímero injetado e depois retirado por fusão, para a produção de uma peça plástica única, com paredes finas e forma interior complexa.

O contraponto à moldagem pela técnica no núcleo perdido é a fabricação de componentes feitos em diversas partes e posteriormente encaixados ou soldados para constituir uma peça única. A peça produzida pela técnica do núcleo perdido será, salvo raríssimas exceções, mais leve e, portanto, mais barata (em termos de peso de resina empregada para a mesma função).

A técnica do núcleo perdido está caindo em desuso na moldagem por injeção por ser tratada como uma solução singular para um problema específico: fabricação de coletores de admissão para motores de combustão interna. Pouco se encontra na literatura a respeito desta técnica.

A profunda compreensão dos processos físicos de troca de calor e endurecimento que ocorrem na moldagem por injeção, é necessária para nos afastar da resposta intuitiva de que ao depositarmos uma quantidade de um material com temperatura superior ao ponto de fusão do material de base, este último irá fundir.

Para a grande maioria das soluções em engenharia, o uso do bom senso é mais do que suficiente. Não são necessários cálculos complexos para verificar uma condição extrema de solicitação. Com um modelo matemático simples é possível ter uma boa aproximação dos fenômenos que vão ocorrer na interação de duas quantidades de dois materiais diferentes, para uma determinada forma.

Do espectro total de materiais puros e ligas metálicas disponíveis no nosso restrito universo, é necessário selecionar, através de critérios, um número reduzido de opções, e, para estas, realizar um aprofundado estudo de propriedades físicas e características de processamento, sem o que não teremos como fazer afirmações precisas.

Os sistemas de engenharia auxiliada por computadores, ou sistemas CAE, através da simulação numérica, nos permitem prever a resultante de processos para inúmeros carregamentos, sem a destruição ou deformação de materiais, em um tempo relativamente menor, a um custo razoável. Estes sistemas têm limitações em função das simplificações de suas equações, cálculos realizados e principalmente em função de as propriedades dos materiais não serem constantes nem tão pouco plenamente conhecidas.

As análises de transferência de calor envolvendo mudança de fase podem prever se e quanto material se fundiu em determinada condição. Porém, se é nosso objetivo trabalhar em uma faixa de parâmetros para a qual a fusão não é uma opção, o modelamento pode ser bastante simplificado.

Em função do tempo de processamento, que mesmo utilizando computadores velozes, ainda é significativo e medido em horas, é necessário simplificar ao máximo os modelos, para que se reduza este tempo de processamento, sem perder a qualidade das análises. As simplificações na forma dos modelos, como, por exemplo, a remoção de arredondamentos, são a primeira opção.

Para toda análise numérica é conveniente realizar um ensaio físico para validação. Sempre que buscamos trabalhar dentro de uma faixa de parâmetros, é necessário verificar o comportamento abaixo e acima desta faixa, para comprovar se os resultados são coerentes com os fenômenos físicos conhecidos.

Qualquer variação nas propriedades dos materiais empregados na simulação ou na experimentação prática pode comprometer a análise como um todo. Sendo assim, é conveniente, para os materiais em estudo, realizar a total caracterização, através dos ensaios disponíveis, para que se trabalhe com a propriedade levantada para aquela amostra, e não apenas com valores tabelados ou fornecidos por fabricantes, os quais normalmente apresentam uma grande faixa de valores.

Na indústria convencional é usual o emprego de acabamento superficial realizado quase sempre por operadores qualificados, com técnicas bastante primitivas. Para que os resultados destes estudos possam ser reproduzíveis, foi decidido não incluir a variável acabamento no processamento das cavidades, resultando na utilização das mesmas com o acabamento obtido na usinagem ou diretamente na máquina de prototipagem rápida. São visíveis os efeitos das estratégias de usinagem nos planos inclinados e o efeito escada nas superfícies dos insertos. A precisão dimensional das peças obtidas por fundição ou por injeção nestes insertos é influenciada por esta decisão.

Em face do exposto conclui-se que a aplicação da técnica do núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de ferramentaria rápida (*Rapid Tooling*), a partir da estereolitografia é possível e permite obter, de forma rápida e segura, cavidades para a fundição de materiais com baixo ponto de fusão e a injeção de diversos polímeros, com condições de injeções mais próximas das usuais, para moldagem por injeção de peças ocas de paredes finas, cuja saída do núcleo demandaria movimentação de partes da cavidade ou não seria possível em moldes convencionais.

O modelo matemático e a sistemática de avaliação da viabilidade do emprego da técnica desenvolvida neste trabalho, permitem verificar se, para um dado produto, ao empregar um par de materiais bem determinados, haverá ou não fusão do núcleo durante a moldagem por injeção.

Em futuros trabalhos de pesquisa é necessário aprofundar o método de simulação e previsão de falha por fusão dos núcleos através de sistemas CAE ou através de outros métodos computacionais que possam prever com exatidão a ocorrência de uma falha durante o processo de injeção sobre o núcleo metálico.

Desenvolver outras maneiras de troca de calor entre o material injetado e o material de preenchimento, e por consequência, a retirada deste calor pelo sistema de refrigeração da peça, é a melhor maneira para aumentar a vida útil dos moldes fabricados em ferramentaria rápida baseada em estereolitografia.

É necessário realizar estudos aprofundados a respeito das fontes que provocam o diferente comportamento dimensional das peças produzidas em cavidades de aço e cavidades produzidas por estereolitografia.

Estudar aplicações da técnica do núcleo perdido, mesmo em ferramental convencional, para aplicação em outros produtos, permitindo assim a produção seriada de componentes com formas muitas vezes descartadas em função da dificuldade de construção dos moldes.

Estudar o efeito de variações nas condições de resfriamento nos moldes produzidos por estereolitografia nas propriedades mecânicas das peças, visando determinar a influência do gradiente de temperaturas nas propriedades obtidas.

REFERÊNCIAS

- ¹ GRANDE, Joseph A. Trend-setting applications highlight SPE auto awards. **Modern Plastics International**, New York, v. 29, n.1, p. 80, jan. 1999.
- ² MAPLESTON, Peter. Applications abound in PBT, but capacity steadies price. **Modern Plastics International**, New York, v. 29, n. 1, p. 59, jan. 1999.
- ³ SINO, Maria Aparecida de. Plástico leve e versátil conquista novas aplicações. **Plástico Moderno**. São Paulo, p. 8-17, dez. 1997.
- ⁴ SLOAN, Jeff. Competition brings out top engineering for winners. **Injection molding magazine**. Denver, june 1998. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>> Acesso em: 20 june 1999..
- ⁵ KOBE, Gerry. Material witness: the plastic-bodied paradigm car may prove that designing for the material makes its own economic and engineering case. **Automotive International**. USA, p.85, june 1999.
- ⁶ MANISCALCO, Michelle. Market focus: automotive. **Injection molding magazine**. Denver, apr. 1998. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 20 june 1999.
- ⁷ GRANDE, Joseph A. Recycle program earns top SPE auto award. **Modern Plastics International**, New York, v. 27, n. 12, p. 26, dez. 1997.
- ⁸ GRANDE, Joseph A., OEMs get more mileage from new fuel systems. **Modern Plastics International**. p. 70-73, abril de 1997.
- ⁹ MAPLESTON, Peter. Plasticscope: Automotive Supply – Auto parts suppliers advised to target Asia South America,. **Modern Plastics International**, New York, v. 27, n. 11, p. 35, nov. 1997.
- ¹⁰ Norte-americana procura parceiros para lançar carros de plástico no Brasil. **Plástico Industrial**. p. 6-7, julho de 1999.
- ¹¹ SLOAN, Jeff. Molding a profit with low-volume jobs. **Injection Molding Magazine**. Denver, apr. 1997. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 20 june 1999.
- ¹² SLOAN, Jeff. Market focus: sports and recreation. **Injection molding magazine**, Denver, Oct. 1998. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 26 june 1999.
- ¹³ BALTUS, Tom A. **Simple description of the lost-core moulding process**. Canada: DuPont, [199__?].
- ¹⁴ THE lowdown on Lost Cores: advice on where lost-core molding makes sense. **Injection Molding Magazine**. Denver, feb. 1996. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 20 june 1999.
- ¹⁵ INJECTION molding design awards: diverse parts show varied routes to high-tech processing. **Modern Plastics international**. New York, p. 62-63, apr. 1997.
- ¹⁶ PALMER, A. E.; COLTON, J. S. Failure mechanisms in stereolithography injection molding tooling. **Polymer Engineering and Science**. USA v. 40, n. 6, p. 1395-1404, june 2000.

-
- ¹⁷ CEDORGE, Thomas; COLTON, Jonathan S.. Draft angle and surface roughness effects on stereolithography molds. **Polymer Engineering and Science**. USA, v.40, n.7, p.1581-1588, July 2000.
- ¹⁸ PRODUCT Data Somos® 7100 Epoxy Photopolymer - Humidity-Tolerant, High Heat-Deflection-Temperature Epoxy. DSM Somos®. USA. Disponível em: <<http://www.dsmsomos.com>>. Acesso em: 20 jun. 1999.
- ¹⁹ RIBEIRO JÚNIOR, Armando Sá. **Proposta de utilização de Ferramentas CAE no planejamento do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes de estereolitografia**. 2003. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.
- ²⁰ LAFRATTA, Fernando Humel. **Uso de fluido refrigerante, temporariamente confinado, em ferramental rápido para injeção de termoplásticos**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.
- ²¹ PÖTSCH, G.; MICHAELI, W. **Injection molding**: an introduction. New York: Hanser/Gardner, 1995.
- ²² BELOFSKY, H. **Plastics**: product design and process engineering. New York: Hanser/Gardner, 1995.
- ²³ MENGES, Georg; MOHREN, Paul. **How to make injection molds**. 2nd. ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 1993.
- ²⁴ HOPKINSON, Neil, DICKENS, Philip. Predicting stereolithography injection mould tool behaviour using models to predict ejection force and tool strength. **International journal of Production Research**. Basigstoke, v. 38, n. 16, p., 2000.
- ²⁵ BEAL, Valter Estevão. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.
- ²⁶ VOLPATO, Neri; Prototipagem rápida/ferramental rápido no processo de desenvolvimento do produto. **Máquinas e Metais**. [s.l.], p. 86-89, June 1999.
- ²⁷ FERREIRA, Aureo Campos; LAFRATTA, Fernando Humel. Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas. **Plástico Industrial**. São Paulo, p. 24-30, sept. 1998.
- ²⁸ AUTOMOTIVE case studies.USA. Disponível em: <http://www.3dsystems.com/appsolutions/atwork_automotive.asp?nav=automotive&sol=dow n>. Acesso em: 20 June 1999.
- ²⁹ SILVA FILHO, Mariano Saraiva da. **Utilização do fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistemas CAD/CAM**. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.
- ³⁰ PHAM, D. T. Techniques for firm tooling using rapid prototyping. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**. London, 1998. p. 269.
- ³¹ COLTON, Jonathan S.; LEBAUT, Yann. Thermal effects on stereolithography injection mold inserts. **Polymer Engineering and Science**. USA, v. 40, n. 6, p.1360-1368, June 2000.
- ³² THE rapid development of rapid development technologies. **Professional Engineering**, Bury St. Edmunds, v. 12, p. 24, 21 July 1999..

-
- ³³ Toolmaking through rapid prototyping; Robert B. Aronson; **Manufacturing Engineering**, Dearborn; Nov. 1998; Vol. 121, Iss. 5; pg. 52, 4 pgs.
- ³⁴ DICKENS, P.; HAGUE, R.; WOHLERS, T. Methods of rapid tooling worldwide. **Moldmaking Technology Magazine**. [s.l.] oct. 2000.
- ³⁵ GOMIDE, Ricardo Borges. **Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia**. 2000. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.
- ³⁶ COLTON, Jonathan.S.; et. al. Design Rules for Stereolithography Injection Molding Inserts **Journal of Manufacturing Systems**. [s.l.], p. 193-201, 2000.
- ³⁷ COLTON, Jonathan S.; BLAIR, Bryan. Experimental study of post-cure stereolithography polymers for injection molds. **Rapid Prototyping Journal**. [s.l.], v. 5, n. 2, p. 72-81, 1999.
- ³⁸ SERWAY, Raymond A. **Física 2: para cientistas e engenheiros com física moderna**. 3ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1992.
- ³⁹ 3D SYSTEMS: Educational Center USA: Direct Aim Course Guide, 1997. Apostila..
- ⁴⁰ GRELLMANN, Dauri Alberto. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e microfusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido**. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.
- ⁴¹ ABSHIRE, Mark. **Investment Casting using QuickCast Build Style Patterns – Application Guide**. 3D Systems USA, 2002. Disponível em:
<http://www.3dsystems.com/products/whitepaper/whitepaper_list.asp>. Acesso em: 10 jun. 2003.
- ⁴² COMPLEX hollow design: consider metal core molding. Disponível em:
<<http://www.coretechgroup.com/ct.html>>. Acesso em: 30 jun 1999.
- ⁴³ Disponível na rede:
http://www.siemensauto.com/mediacenter/photos/engine/images_jpg/ep_112.jpg
- ⁴⁴ FUSIBLE core injection molding. Disponível em:
<http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/process/molding>. Acesso em: 30 jun 1999.
- 1999
- ⁴⁵ GERGES, Samir, N.Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis, SC: S.N.Y. Gerges, 1992.
- ⁴⁶ SPINWHEELS factory tour of the advanced technology. Disponível em:
<<http://spinwheels.com/factour.html>>. Acesso em: 30 jun. 1999.
- ⁴⁷ MCT process flowchart. Disponível em: <<http://www.coretechgroup.com/flowchart.html>>. Acesso em: 30 jun. 1999.
- ⁴⁸ SEARS, Francis; ZEMANSKY, Mark W; YOUNG, Hugh D. **Física 2: mecânica dos fluidos, calor, movimento ondulatório**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1984..
- ⁴⁹ INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. de. **Introduction to heat transfer**. 2nd ed. . New York.: John Wilwy & Sons, 1990.
- ⁵⁰ REES, Herbert. **Mold engineering**. Munich: Hanser Gardner, 1995..

-
- ⁵¹ ADVANCED TECHNOLOGY. **Manual de uso: máquinas série.** [s.l.]: Irmãos Semeraro, 1996.
- ⁵² AMARAL, Osmar. **Polímeros: projeto de produto e moldes.** São Paulo: Faculdade de Engenharia Industrial – FEI, 1995. Apostila de Curso.
- ⁵³ JANCZYK, M.J., **Thermal design and analysis of stereolithography rapid tooling for injection molding.** 1996. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Plásticos)-University of Massachusetts, Lowell, MA, 1996.
- ⁵⁴ AHRENS, Carlos H.; RIBEIRO JÚNIOR, Armando Sá; BEAL, Valter E. An Alternative Cooling Technique for Stereolithography Moulds: In: -COMPRESSION TECHNOLOGIES CONFERENCE, 2001, Machester, UK. **Anais...**, Machester, UK: [s.n.], 2001.
- ⁵⁵ LI,Y.;GARGIULO,E.P.; KEEFE, M., Studies in direct tooling using stereolithography. **Journal of Manufacturing Science and Engineering.** USA, v. 122. p. 316-322, may 2000.
- ⁵⁶ PLIBRASIL RESINAS. **Prolen: Informações técnicas sobre produtos.** Rio de Janeiro: PliBrasil Resinas, 2000. Catálogo.
- ⁵⁷ CORE TECH ASSOCIATES. **Metal Core Technology & LMD 2000 Equipment.** USA: Leaflet, 1993.
- ⁵⁸ WASSINK, R. J. K..**Soldering in electronics.** [s.l.]: [s.n.], 1989
- ⁵⁹ SOFT METAIS. **Manual de produtos.** Bebedouro, SP. Disponível em: <<http://www.softmetais.com.br>>. Acesso em: 28 jun 1999.
- ⁶⁰ INSTITUTO ANTÔNIO HOUAISS. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa.** 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Objetiva, 2001.
- ⁶¹ BAZZO, Walter Antônio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. **Introdução à engenharia.** 6ed. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 2000. (Série didática).
- ⁶² SILVEIRA, Rafael Araújo da. **Simulação numérica da formação de gelo na borda de ataque de perfis aerodinâmicos.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.
- ⁶³ MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos, coordenadas generalizadas.** Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1995.
- ⁶⁴ SANTOS, Geraldo José Belmonte dos; RIBEIRO JÚNIOR, Armando Sá. **Curso de introdução ao método dos elementos finitos: Aplicação à engenharia estrutural.** Salvador, BA: UFBA, 1998. Apostila de Curso.
- ⁶⁵ DESAI, Chandrakant S.; ABEL, John F. **Introduction to the finite element method: a numerical method for engineering analysis.** Toronto: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- ⁶⁶ SHIH, Tien-Mo. **Numerical heat transfer.** USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1984.
- ⁶⁷ MENDONÇA, Paulo de Tarso R.de **O método de elementos finitos para transferência de calor.** Florianópolis, SC: UFSC, 2000. Apostila de Curso.
- ⁶⁸ BERNHARDT, Ernest C. (ed.) et al. **CAE – Computer Aided Engineering for injection molding.** New York: Hanser Publishers, 1983.
- ⁶⁹ PHILLIPS, Ralf W. **Skinner Materiais Dentários.** 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, 1993

⁷⁰ VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1970. 427 p.

⁷¹ SHACKELFORD, James F. **Introduction to materials science for engineers**. 5th. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

⁷² NAUGHTON, J.L.; MORTIMER, C.T.; **Differential Scanning Calorimetry**. [s.l.]: PERKINELMER, [19__?]. Catálogo do Fabricante.

3D SYSTEMS: Educational Center USA: Direct Aim Course Guide, 1997. Apostila.

ABSHIRE, Mark. **Investment Casting using QuickCast Build Style Patterns – Application Guide**. 3D Systems USA, 2002. Disponível em: <http://www.3dsystems.com/products/whitepaper/whitepaper_list.asp>. Acesso em: 10 jun. 2003.

ADVANCED TECHNOLOGY. **Manual de uso**: máquinas série. [s.l.]: Irmãos Semeraro, 1996.

AHRENS, Carlos H.; RIBEIRO JÚNIOR, Armando Sá; BEAL, Valter E. An Alternative Cooling Technique for Stereolithography Moulds: In: -COMPRESSION TECHNOLOGIES CONFERENCE, 2001, Machester, UK. **Anais...**, Machester, UK: [s.n.], 2001.

AMARAL, Osmar. **Polímeros**: projeto de produto e moldes. São Paulo: Faculdade de Engenharia Industrial – FEI, 1995. Apostila de Curso.

AUTOMOTIVE case studies.USA. Disponível em: <http://www.3dsystems.com/appsolutions/atwork_automotive.asp?nav=automotive&sol=down>. Acesso em: 20 june 1999.

BALTUS, Tom A. **Simple description of the lost-core moulding process**. Canada: DuPont, [199__?].

BAZZO, Walter Antônio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. **Introdução à engenharia**. 6ed. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 2000. (Série didática).

BEAL, Valter Estevão. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

BELOFSKY, H. **Plastics**: product design and process engineering. New York: Hanser/Gardner, 1995.

BERNHARDT, Ernest C. (ed.) et al. **CAE – Computer Aided Engineering for injection molding**. New York: Hanser Publishers, 1983.

CEDORGE, Thomas; COLTON, Jonathan S.. Draft angle and surface roughness effects on stereolithography molds. **Polymer Engineering and Science**. USA, v.40, n.7, p.1581-1588, july 2000.

COLTON, Jonathan S.; BLAIR, Bryan. Experimental study of post-cure stereolithography polymers for injection molds. **Rapid Prototyping Journal**. [s.l.], v. 5, n. 2, p. 72-81, 1999.

COLTON, Jonathan.S.; et. al. Design Rules for Stereolithography Injection Molding Inserts **Journal of Manufacturing Systems**. [s.l.], p. 193-201, 2000.

COLTON, Jonathan S.; LEBAUT, Yann. Thermal effects on stereolithography injection mold inserts. **Polymer Engineering and Science**. USA, v. 40, n. 6, p.1360-1368, june 2000.

COMPLEX hollow design: consider metal core molding. Disponível em:
<<http://www.coretechgroup.com/ct.html>>. Acesso em: 30 jun 1999.

CORE TECH ASSOCIATES. **Metal Core Technology & LMD 2000 Equipment**. USA: Leaflet, 1993.

DESAI, Chandrakant S.; ABEL, John F. **Introduction to the finite element method: a numerical method for engineering analysis**. Toronto: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.

DICKENS, P.; HAGUE, R.; WOHLERS, T. Methods of rapid tooling worldwide. **Moldmaking Technology Magazine**. [s.l.] oct. 2000.

FERREIRA, Aureo Campos; LAFRATTA, Fernando Humel. Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas. **Plástico Industrial**. São Paulo, p. 24-30, sept. 1998.

FUSIBLE core injection molding. Disponível em:
<http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/process/molding>. Acesso em: 30 jun 1999.

GERGES, Samir, N.Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis, SC: S.N.Y. Gerges, 1992.

GOMIDE, Ricardo Borges. **Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia**. 2000. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

GRANDE, Joseph A. OEMs get more mileage from new fuel systems. **Modern Plastics International**, New York, v. 27, n. 4, p. 70-73, abr. 1997.

_____. Recycle program earns top SPE auto award. **Modern Plastics International**, New York, v. 27, n. 12, p. 26, dez. 1997.

_____. Trend-setting applications highlight SPE auto awards. **Modern Plastics International**, New York, v. 29, n.1, p. 80, jan. 1999.

GRELLMANN, Dauri Alberto. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e microfusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido**. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

HOPKINSON, Neil, DICKENS, Philip. Predicting stereolithography injection mould tool behaviour using models to predict ejection force and tool strength. **International journal of Production Research**. Basigstoke, v. 38, n. 16, p., 2000.

INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. de. **Introduction to heat transfer**. 2nd ed. . New York.: John Wilwy & Sons, 1990.

INJECTION molding design awards: diverse parts show varied routes to high-tech processing. **Modern Plastics international**. New York, p. 62-63, apr. 1997.

INSTITUTO ANTÔNIO HOUAISS. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Objetiva, 2001.

JANCZYK, M.J., **Thermal design and analysis of stereolithography rapid tooling for injection molding**. 1996. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Plásticos)-University of Massachusetts, Lowell, MA, 1996.

KOBE, Gerry. Material witness: the plastic-bodied paradigm car may prove that designing for the material makes its own economic and engineering case. **Automotive International**. USA, p.85, june 1999.

LAFRATTA, Fernando Humel. **Uso de fluido refrigerante, temporariamente confinado, em ferramental rápido para injeção de termoplásticos**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

LI,Y.;GARGIULO,E.P.; KEEFE, M., Studies in direct tooling using stereolithography. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. USA, v. 122. p. 316-322, may 2000.

THE lowdown on Lost Cores: advice on where lost-core molding makes sense. **Injection Molding Magazine**. Denver, feb. 1996. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 20 june 1999.

MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos, coordenadas generalizadas**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1995.

MANISCALCO, Michelle. Market focus: automotive. **Injection molding magazine**. Denver, apr. 1998. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 20 june 1999.

MAPLESTON, Peter. Applications abound in PBT, but capacity steadies price. **Modern Plastics International**, New York, v. 29, n. 1, p. 59, jan. 1999.

_____. Plastiscope: Automotive Supply – Auto parts suppliers advised to target Asia South America,. **Modern Plastics International**, New York, v. 27, n. 11, p. 35, nov. 1997.

MCT process flowchart. Disponível em: <<http://www.coretechgroup.com/flowchart.html>>. Acesso em: 30 jun. 1999.

MENDONÇA, Paulo de Tarso R.de **O método de elementos finitos para transferência de calor**. Florianópolis, SC: UFSC, 2000. Apostila de Curso.

MENGES, Georg; MOHREN, Paul. **How to make injection molds**. 2nd. ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 1993.

NAUGHTON, J.L.; MORTIMER, C.T.; **Differential Scanning Calorimetry**. [s.l.]: PERKINELMER, [19__?]. Catálogo do Fabricante.

NORTE americana procura parceiros para lançar carros de plástico no Brasil. **Plástico Industrial**, São Paulo, p. 6-7, jul. 1999.

PALMER, A. E.; COLTON, J. S. Failure mechanisms in stereolithography injection molding tooling. **Polymer Engineering and Science**. USA v. 40, n. 6, p. 1395-1404, june 2000.

PHAM, D. T. Techniques for firm tooling using rapid prototyping. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**. London, 1998. p. 269.

PHILLIPS, Ralf W. **Skinner Materiais Dentários**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, 1993.

PLIBRASIL RESINAS. **Prolen**: Informações técnicas sobre produtos. Rio de Janeiro: Plibrasil Resinas, 2000. Catálogo.

PÖTSCH, G.; MICHAELI, W. **Injection molding**: an introduction. New York: Hanser/Gardner, 1995.

PRODUCT Data Somos® 7100 Epoxy Photopolymer - Humidity-Tolerant, High Heat-Deflection-Temperature Epoxy. DSM Somos®. USA. Disponível em: <<http://www.dsmsomos.com>>. Acesso em: 20 jun. 1999.

THE rapid development of rapid development technologies. **Professional Engineering**, Bury St. Edmunds, v. 12, p. 24, 21 July 1999.

REES, Herbert. **Mold engineering**. Munich: Hanser Gardner, 1995.

RIBEIRO JÚNIOR, Armando Sá. **Proposta de utilização de Ferramentas CAE no planejamento do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes de estereolitografia**. 2003. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

SANTOS, Geraldo José Belmonte dos; RIBEIRO JÚNIOR, Armando Sá. **Curso de introdução ao método dos elementos finitos: Aplicação à engenharia estrutural**. Salvador, BA: UFBA, 1998. Apostila de Curso.

SEARS, Francis; ZEMANSKY, Mark W; YOUNG, Hugh D. **Física 2: mecânica dos fluidos, calor, movimento ondulatório**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1984.

SERWAY, Raymond A. **Física 2: para cientistas e engenheiros com física moderna**. 3ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1992.

SHACKELFORD, James F. **Introduction to materials science for engineers**. 5th. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

SHIH, Tien-Mo. **Numerical heat transfer**. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1984.

SILVA FILHO, Mariano Saraiva da. **Utilização do fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistemas CAD/CAM**. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

SILVEIRA, Rafael Araújo da. **Simulação numérica da formação de gelo na borda de ataque de perfis aerodinâmicos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

SINO, Maria Aparecida de. Plástico leve e versátil conquista novas aplicações. **Plástico Moderno**. São Paulo, p. 8-17, dez. 1997.

SLOAN, Jeff. Competition brings out top engineering for winners. **Injection molding magazine**. Denver, june 1998. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>> Acesso em: 20 june 1999.

_____. Market focus: sports and recreation. **Injection molding magazine**, Denver, Oct. 1998. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 26 june 1999.

_____. Molding a profit with low-volume jobs. **Injection Molding Magazine**. Denver, apr. 1997. Disponível em: <<http://www.immnet.com/cgi-bin>>. Acesso em: 20 june 1999.

SOFT METAIS. **Manual de produtos**. Bebedouro, SP. Disponível em: <<http://www.softmetais.com.br>>. Acesso em: 28 jun 1999.

SPINWHEELS factory tour of the advanced technology. Disponível em: <<http://spinwheels.com/factour.html>>. Acesso em: 30 jun. 1999.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1970. 427 p.

VOLPATO, Neri; Prototipagem rápida/ferramental rápido no processo de desenvolvimento do produto. **Máquinas e Metais**. [s.l.], p. 86-89, june 1999.

WASSINK, R. J. K..**Soldering in electronics**. [s.l.]: [s.n.], 1989.