

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO USO DE INSERTOS OBTIDOS POR
ESTEREOLITOGRAFIA NA MOLDAGEM DE PÓS METÁLICOS POR
INJEÇÃO**

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

VALTER ESTEVÃO BEAL

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2002

**AVALIAÇÃO DO USO DE INSERTOS OBTIDOS POR ESTEREOLITOGRAFIA NA
MOLDAGEM DE PÓS METÁLICOS POR INJEÇÃO**

VALTER ESTEVÃO BEAL

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

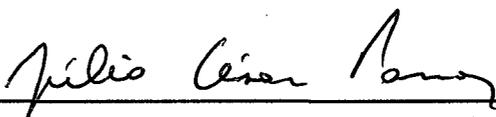
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
FABRICAÇÃO, APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Professor Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.
Orientador



Professor Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr.-Ing.
Co-orientador

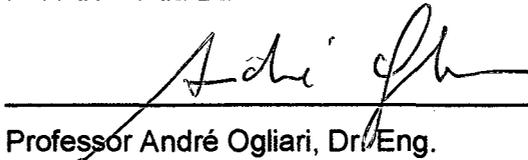


Professor Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Professor Aloísio Nelmo Klein, Dr. -Ing.
Presidente da Banca



Professor André Ogliari, Dr. Eng.



Professor Márcio Celso Fredel, Dr. -Ing.

Agradecimentos:

Ao professor Luiz Gomes pela ajuda técnica em muitos momentos e Waldyr Ristow Jr pela infra-estrutura disponibilizada na Steelinject.

Aos colegas do Labmat: Alessandro Foyth, Cristiano Binder e Eduardo Kühl, pela ajuda prestada.

Aos colegas e amigos (por que não família) do Cimject: Armando Sá Ribeiro Júnior, Aurélio Sabino, Cristóvão Buzzarello, Diovani Castoldi Lencina, Fernando Hummel Lafratta, Gean Salmoria, Jonas Danker, Marcelo Fraga, Marcelo Vandresen e Ricardo Lucianetti, pela paciência e companheirismo.

Ao professor André Ogliari pelo empenho durante o estudo de caso PAT.

Aos amigos: Alan Henn, Daisy Ruiz Díaz Lovera, Daniel Alberto Cardoso Junior, Juliano Heidrich e Saulo Dalmedico Costa, por me aturarem por tanto tempo.

Ao professor Paulo Antônio Wendhausen, pela co-orientação e apoio indireto desde o tempo da minha graduação.

Ao professor e amigo Carlos Henrique Ahrens, pela confiança depositada em minha pessoa, suporte, apoio e amizade compartilhados nestes 4 anos "cimjectianos".

Aos meus pais Flávio e Isolde, irmãos Silvia e Tiago, pelo apoio e amor incondicional.

Ao meu amor, Aline Silva, pela ternura, alegria e carinho.

A Deus, por ter permitido que o homem fosse capaz de manipular a natureza transformando em tecnologia. Apenas nos falta juízo para utilizá-la de forma inteligente.

Sumário

Glossário de Siglas e Abreviações	VI
Lista de Tabelas	VII
Lista de Figuras	VIII
Resumo	X
Title & Abstract	XI
1 - Introdução	1
1.1 - Objetivos	3
1.2 - Estrutura da Dissertação	4
2 - Insertos Obtidos por Estereolitografia	5
2.1 - Definição de Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)	5
2.2 - Definição de Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>)	7
2.3 - A Estereolitografia	8
2.4 - Ferramental Rápido Obtido por Estereolitografia	9
2.4.1 - Tipos de Insertos SL para Moldagem por Injeção	12
2.4.2 - Operações de acabamento em insertos SL	14
2.4.3 - Moldagem por Injeção em Insertos SL	17
2.4.4 - Limitações dos Insertos SL para a Moldagem por Injeção	19
2.5 - Considerações Finais para o uso de Insertos SL	21
3 - Moldagem por Injeção de Pós	22
3.1 - Aplicações	23
3.2 - Vantagens	24
3.3 - Fundamentos PIM	25
3.3.1 - Pós	25
3.3.2 - Ligantes	27
3.3.3 - Mistura dos Componentes	29
3.3.4 - Moldagem	29
3.3.5 - Extração dos Ligantes	30
3.3.6 - Sinterização	32
3.3.7 - Operações Complementares	34
3.4 - Projeto de Peças e Moldes PIM	34
3.5 - Limitações	36
3.6 - Considerações Finais para a Moldagem de Pós	37

4 - Estudos de Caso	38
4.1 - Estudo de Caso 1 – Avaliação Preliminar	38
4.1.1 - Objetivos	38
4.1.2 - Projeto, Fabricação e Ajuste dos Insertos	38
4.1.3 - Etapa de Moldagem	41
4.1.4 - Resultados e Discussão do Estudo de Caso 1	42
4.2 - Estudo de Caso 2 – Geometria Simples	44
4.2.1 - Objetivos	44
4.2.2 - Projeto, Fabricação e Ajuste dos Insertos	45
4.2.3 - Etapa de Moldagem	51
4.2.4 - Extração do Ligante e Sinterização	51
4.2.5 - Métodos Utilizados para a Análise dos Resultados	52
4.2.6 - Resultados e Discussão do Estudo de Caso 2	53
4.3 - Estudo de Caso 3 – Geometria Circular de Baixa complexidade	59
4.3.1 - Objetivos	59
4.3.2 - Descrição do Projeto, Fabricação e Ajuste dos Insertos	59
4.3.3 - Descrição do Processo de Moldagem	63
4.3.4 - Operação de Extração do Ligante e Sinterização	63
4.3.5 - Métodos Utilizados para a Análise dos Resultados	64
4.3.6 - Resultados e Discussão do Estudo de Caso 3	65
5 - Conclusões	73
5.1 - Moldagem por Injeção de Pós em Insertos SL	73
5.2 - Projeto e Produção de Insertos Obtidos por Estereolitografia	78
5.3 - Sugestões para Trabalhos Futuros	81
6 - Referências Bibliográficas	83
7 - Bibliografia	87

Glossário de Siglas e Abreviações

3D: Tridimensional;

ACES: *Accurate Clear Epoxy Solid*, Estilo de construção em estereolitografia;

CAD: *Computer Aided Design*, Projeto Auxiliado por Computador;

CAE: *Computer Aided Engineering*, Engenharia Auxiliada por Computador;

CAM: *Computer Aided Manufacturing*, Manufatura/Fabricação Auxiliada por Computador;

CIM: *Ceramic Injection Molding*, Moldagem de Cerâmica por Injeção;

Direct AIM: *Direct ACES Injection Molding*, Técnica de injeção em moldes feitos por estereolitografia;

DMLS: *Direct Metal Laser Sintering*, Sinterização Direta de Metal por Laser;

EDM: *Electrical Discharge Machining*, Eletroerosão;

EXACT: Estilo de construção em estereolitografia;

FDM: *Fused Deposition Modeling*, Modelagem por Fusão e Deposição;

HSC: *High Speed Cutting*, Usinagem a Altíssima Velocidade

LMT: *Layer Manufacturing Technologies*, Tecnologias de Fabricação por Camadas;

LOM: *Laminated Object Manufacturing*, Fabricação de Objetos Laminados;

MIM: *Metal Injection Molding*, Moldagem de Metais por Injeção;

PIM: *Powder Injection Molding*, Moldagem de Pós por Injeção;

PLT: *Paper Layer Technology*, Tecnologia de Camadas de Papel;

RM: *Rapid Manufacturing*, Manufatura/Fabricação Rápida;

RP: *Rapid Prototyping*, Prototipagem Rápida;

RT: *Rapid Tooling*, Ferramental Rápido;

SLA: *Stereolithography Apparatus*, Máquina de Estereolitografia;

SL: *Stereolithography*, Estereolitografia;

STL: *Structured Triangular Language*, Linguagem por Estrutura de Triângulos;

SLS: *Selective Laser Sintering*, Sinterização Seletiva por Laser.

Lista de Tabelas

Tabela 1: Métodos para a obtenção de insertos para moldagem por injeção com o auxílio da estereolitografia. _____	10
Tabela 2: Outros métodos para a obtenção de moldes com o uso da estereolitografia. _____	11
Tabela 3: Ligas de baixo ponto de fusão utilizadas para preencher moldes construídos em forma de casca (Indalloy, 2000). _____	12
Tabela 4: Operações usuais de pós-processamento de objetos construídos por estereolitografia. _____	15
Tabela 5: Características de um pó ideal para PIM (German & Bose, 1997). _____	26
Tabela 6: Atributos ideais de um ligante (German & Bose, 1997). _____	27
Tabela 7: Sistemas Ligantes Convencionais (Petzoldt, 1992). _____	28
Tabela 8: Orientações para projeto de componentes PIM (German & Bose, 1997). _____	35
Tabela 9: Composição da mistura utilizada. _____	41
Tabela 10: Parâmetros de injeção com maior sucesso de obtenção de peças. _____	43
Tabela 11: Descrição das etapas de extração e sinterização. _____	51
Tabela 12: Evolução dos parâmetros de injeção ao longo do experimento. _____	56
Tabela 13: Médias e desvios padrão obtidos no estudo de caso 2. _____	57
Tabela 14: Variação dos parâmetros de injeção para a obtenção de peças. _____	66
Tabela 15: Variação dimensional do inserto. _____	67
Tabela 16: Médias e desvios padrão obtidos para as peças obtidas no estudo de caso 3. _____	68
Tabela 17: Percentuais de contração entre peças, modelo CAD e insertos. _____	69
Tabela 18: Percentual de perda de massa e porosidade das peças. _____	70
Tabela 19: Recomendações para insertos SL. _____	80

Lista de Figuras

Figura 1: Ciclo genérico nos processos por adição de camadas.	6
Figura 2: Esquema básico do processo de estereolitografia da 3DSystems.	9
Figura 3: Diferentes tipos de insertos feitos em estereolitografia (Ahrens et alii, 2001).	14
Figura 4: Erros provenientes da construção e erros ocasionados pela operação de lixamento.	16
Figura 5: Representação gráfica da diferença entre os parâmetros de moldagem entre moldes convencionais e moldes de estereolitografia.	19
Figura 6: Curva representando a tendência do decréscimo da tensão de ruptura com o aumento da temperatura, considerado válido para resinas SL.	20
Figura 7: Esquema do processo PIM (adaptado de German & Bose, 1997).	22
Figura 8: Exemplos de peças fabricadas pelo processo MIM .	24
Figura 9: Alguns tipos de geometrias de pós utilizados em PIM (German&Bose, 1997).	26
Figura 10: Classificação dos processos de extração dos ligantes (adaptado de German & Bose, 1997).	30
Figura 11: Estrutura porosa formada na extração da parafina.	31
Figura 12: Mecanismos de sinterização (German & Bose, 1997).	33
Figura 13: Preferência no uso de processos de fabricação na relação quantidade versus complexidade (adaptado de German & Bose, 1997).	36
Figura 14: Imagens do modelo CAD da geometria projetada.	39
Figura 15: Imagens dos modelos CAD dos insertos gerados para o estudo de caso 1.	39
Figura 16: Insertos montados no porta-molde e posicionados na máquina injetora.	41
Figura 17: Defeitos ocasionados pela aderência do material ao molde com o uso do desmoldante silicone. Também indicados: rebarba e marcas de pinos extratores.	43
Figura 18: Diferenças entre as geometrias do primeiro e segundo estudos de caso.	46
Figura 19: Imagens do modelo CAD da geometria alterada juntamente como canal de injeção.	46
Figura 20: Modelos CAD da geometria dos insertos.	46
Figura 21: Inseto fixo pronto para ser preenchido e inseto móvel em processo de preenchimento: nota-se a grande espessura utilizada nos insertos.	47
Figura 22: Etapa de preenchimento e ajuste no porta-molde.	49
Figura 23: Seqüência do lixamento do plano de partição do inseto móvel.	50
Figura 24: Dimensões analisadas na cavidade, peças “verdes” e sinterizadas.	52
Figura 25: Esforço, durante a extração, provocado pelo material que penetra na folga do furo do pino extrator.	53

Figura 26: Ressaltos provocados pelos pinos extratores. Peças verde (escura) e sinterizada (prateada).	54
Figura 27: Fotografia do inserto móvel deformado.	58
Figura 28: Geometria estudada no estudo de caso 3.	59
Figura 29: Modelos CAD dos insertos.	60
Figura 30: Insertos preenchidos e acabados.	62
Figura 31: Molde aberto com os insertos instalados.	62
Figura 32: Dimensões analisadas na peça e cavidade.	64
Figura 33: Bancada para a aquisição da variação da temperatura no inserto fixo durante a moldagem.	65
Figura 34: Imagens dos insertos após a moldagem (deformações sinalizadas).	68
Figura 35: Gráfico apresentando os picos de temperatura e a estabilização do aquecimento dos insertos (cada pico representa a moldagem de uma peça)	71
Figura 36: Peças verdes (escuras) e sinterizadas (prateadas).	72
Figura 37: Tempo utilizado em cada etapa do estudo de caso 3.	76
Figura 38: Orientações para o uso do sistema de planificação com camada extra.	79
Figura 39: Recomendações para as dimensões das guias dos pinos extratores.	80

Resumo

O uso de insertos de estereolitografia na produção de pré-séries de peças de plástico moldado por injeção busca a redução de custos no ciclo de vida do produto, principalmente nas fases de projeto e fabricação. O emprego desta tecnologia de Ferramental Rápido na produção de peças de pós metálicos é avaliado neste trabalho. A grande diferença entre os moldes convencionais e moldes com insertos de estereolitografia é a difusividade térmica dos materiais empregados. Moldes de aço, por exemplo, possuem tipicamente coeficiente de condutividade térmica 300 vezes maior do que os insertos feitos com as resinas fotossensíveis utilizadas na estereolitografia. A diferença na taxa de resfriamento do volume mássico moldado durante o ciclo de injeção deve ser compensada com a alteração dos parâmetros do processo de injeção, tais como temperaturas, pressões e velocidades. A otimização destes parâmetros mostrou que é possível a extração de peças “verdes” do inserto sem o surgimento de defeitos que dificultem a realização das etapas posteriores (extração do ligante e sinterização). No entanto, um dos fatores de maior dificuldade de controle é a precisão dimensional dos insertos de estereolitografia, principalmente para peças de pó metálico. Análises dimensionais realizadas nos estudos de caso indicaram que a contração final das peças obtidas é a mesma que em peças obtidas a partir de moldes convencionais (metálicos). Além disso, os erros percentuais alcançados ficaram inferiores à 2%, que podem ser considerados satisfatórios para uma pré-série de peças produzidas (ou série-protótipo). Também foram empregadas e avaliadas soluções para o projeto e a fabricação dos insertos, visando aumentar a vida útil dos insertos e melhorar a qualidade das peças moldadas.

Title & Abstract

“Evaluation of stereolithography molds for powder metal injection molding”

The utilization of stereolithography molds in manufactured pre-series of injection molded plastic parts searches cost reduction in product life-time, mainly on design and manufacturing phases. The use of this Rapid Tooling (RT) technique in powder metal injection molding is evaluated on this work. The greatest difference between traditional and stereolithography tools is the heat diffusivity from employed materials. For example, steel molds have heat conductivity coefficient 300 fold higher than molds made with the photosensitive resin used in stereolithography process. The discrepancy regarding cooling rate of the molded parts during the injection cycle must be compensated with adjustments in the injection molding parameters, such as temperatures, pressures and speeds. The optimization of these parameters had made possible to eject green parts from the mold without causing defects which will be evidenced in debinding and sintering stages. The dimensional analysis performed at the end of each study case had show that the shrinking factor of the component after the sintering have the same value obtained for components made using traditional metallic molds. Moreover, the dimensional error remains under 2%, what can be considered low for a pre-series of components (or prototype series). In this work improvements on mold design and production were used and evaluated to achieve higher average life of the tools and to obtain better part quality as well.

1 - Introdução

Na crescente busca por competitividade, as empresas utilizam cada vez mais tecnologias que permitam um rápido desenvolvimento de novos produtos com qualidade e redução dos custos envolvidos (Jacobs, 1992 & 1996).

As tecnologias de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping*, RP) são importantes para a indústria mundial devido, basicamente, proporcionarem, através de protótipos e/ou modelos, redução do tempo de desenvolvimento, identificação de erros de projeto, melhor comunicação entre membros de uma equipe de desenvolvimento, avaliações funcionais de produtos e muitos outros benefícios que este grupo de tecnologias pode oferecer para uma empresa. No ano de 2000, para se ter uma idéia mais clara, foram vendidos aproximadamente mais de 1320 sistemas de prototipagem rápida no mundo, sendo que em 1990 foram vendidos apenas 114 (Wholers, 2001). Nos últimos anos o aumento foi de 12,1% na implementação de equipamentos novos de prototipagem rápida na indústria. Outras vantagens como o ferramental rápido e a manufatura rápida (*Rapid Tooling & Manufacturing*, RT&M), que são aplicações da prototipagem rápida, ampliam ainda mais os campos de utilização destas tecnologias. No caso do ferramental rápido, são construídas ferramentas capazes de produzir pré-séries de peças de produtos a serem testados, ou até mesmo, séries limitadas para atender uma crescente tendência de exclusividade e renovação de produtos para diferentes mercados consumidores.

Dentre este grupo de tecnologias, a estereolitografia (*stereolithography*, SL) destaca-se por ser uma das tecnologias mais versáteis e utilizadas pela indústria mundial (Jacobs, 1992). Uma das aplicações é a utilização de insertos feitos em

estereolitografia para moldagem de componentes de plástico injetado, proporcionando a fabricação de pré-séries de peças, no material final do produto, em um curto espaço de tempo.

Outra maneira de atingir competitividade é a utilização de tecnologias que proporcionem propriedades técnicas diferenciadas e menores custos de fabricação para seus produtos. A moldagem por injeção de pós (*Powder Injection Molding*, PIM), cerâmicos e/ou metálicos, é outra tecnologia que cresce 15% ao ano (German&Bose, 1997) devido às vantagens atingidas com sua utilização, como por exemplo: repetibilidade, alta-produtividade e complexidade geométrica. Normalmente, a moldagem por injeção de pós compete com tecnologias como fundição, conformação e usinagem quando a complexidade geométrica e o número de peças a ser produzido são altos. Isso significa que esta tecnologia possui um custo inicial elevado, pois necessita de uma infraestrutura composta de fornos específicos para a aplicação desejada, máquinas injetoras apropriadas e, no custo direto de produção de um componente, um molde que garanta a qualidade especificada para o componente injetado.

Em função dos benefícios proporcionado pelas técnicas de Ferramental Rápido e Moldagem por Injeção de Pós, torna-se fundamental desenvolver pesquisas que proporcionem a integração entre estas áreas.

Em trabalho realizado por Gomide (2000), são apresentadas as dificuldades ocorridas em uma tentativa de moldar uma mistura de pó de aço inox 316L em insertos de estereolitografia. Contudo, como o experimento não fazia parte do objetivo do trabalho, este foi pouco documentado e analisado, restringindo-se a apresentar uma característica da aderência muito forte da mistura moldada com o inserto de

estereolitografia, sendo que este fenômeno impossibilitou a obtenção de qualquer peça. O referido autor sugere que o colapso da peça moldada durante a extração do molde é causado pelas características abrasivas do material injetado, que supostamente causa a aderência excessiva do moldado às paredes da cavidade. Um outro trabalho que trata deste assunto foi publicado no *Rapid Prototyping Journal*, onde Hemrick (2001) apresenta um estudo a respeito da aderência de uma mistura contendo o aço 316L e a resina DSM Somos 7110. Apesar da sua relevância científica, o estudo não foi realizado com parâmetros similares aos habitualmente utilizados no processo de moldagem por injeção, e analisa a força necessária para separar os materiais após o resfriamento da mistura com aço 316L.

1.1 - Objetivos

Com base no exposto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilizar insertos de estereolitografia na fabricação de componentes metálicos pelo processo de moldagem por injeção de pós. Por se tratar, praticamente, de uma nova aplicação da estereolitografia, bem como existir uma escassez de informações a respeito do assunto, o trabalho proposto tem como objetivos específicos:

- Identificar, de um estudo preliminar, as principais dificuldades e características envolvidas no processo;
- Desenvolver estudos de caso, com o intuito de:
 - Estabelecer recomendações de projeto e fabricação para insertos de estereolitografia para a moldagem de pós metálicos;
 - Indicar parâmetros de processo para a moldagem de pós metálicos.

1.2 - Estrutura da Dissertação

A organização desta dissertação foi dividida em capítulos onde o conteúdo de cada um deles é brevemente descrito a seguir:

- ⇒ Capítulo 2: é apresentada uma revisão bibliográfica sobre insertos obtidos por estereolitografia, abordando como estes são fabricados e utilizados na moldagem de componentes de termoplástico;
- ⇒ Capítulo 3: este capítulo apresenta uma revisão sobre o processo de moldagem por injeção de pós, abrangendo os fundamentos básicos desta tecnologia;
- ⇒ Capítulo 4: neste, o trabalho desenvolvido é apresentado na forma de estudos de caso seqüenciais, onde são descritos os procedimentos em cada estudo realizado;
- ⇒ Capítulo 5: são feitas conclusões e considerações finais a respeito do trabalho, analisando a utilização de insertos de estereolitografia na moldagem por injeção de componentes de pó.

Os outros capítulos são relativos às referências e bibliografias que foram essenciais para o embasamento deste trabalho.

2 - Insertos Obtidos por Estereolitografia

2.1 - Definição de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*)

No final da década de 80 surgiram os resultados das primeiras pesquisas que buscavam desenvolver tecnologias capazes de produzir objetos diretamente de um modelo tridimensional projetado em um programa CAD (*Computer Aided Design*). Estas tecnologias ficaram conhecidas como Prototipagem Rápida, pois fabricam objetos que visavam, inicialmente, auxiliar equipes de engenharia simultânea na visualização, montagem e teste de produtos, acelerando o seu desenvolvimento. Atualmente, no entanto, existe uma grande discussão¹ a respeito de uma definição mais apropriada uma vez que os objetos construídos não são necessariamente protótipos. Generalizando, todo processo de manufatura que proporcione a fabricação de objetos 3D, a partir de um modelo CAD, com o auxílio de um sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*), em um curto espaço de tempo (incluindo o tempo de programação CAM), pode ser considerado um processo de prototipagem rápida. Neste contexto podem ser citadas: Estereolitografia (SL), Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Thermojet, Fabricação de Objetos Laminados (LOM), Impressão Tridimensional (3DP), Eletroerosão por penetração (EDM), Usinagem à Alta Velocidade (HSC), além de muitos outros processos.

Contudo existe um consenso entre a comunidade internacional, que considera todo processo de fabricação por adição sucessiva de camadas bidimensionais (LMT, *Layer Manufacturing Technologies*) como sendo um processo de prototipagem rápida. Tais processos, apesar de possuírem princípios físicos distintos, apresentam uma seqüência muito parecida para a obtenção de um objeto 3D. O primeiro passo consiste

¹ Amplamente debatido pela internet em lista de discussão mundial de prototipagem: <http://tk.hut.fi/rp-m/> (2000-2001).

na obtenção de uma representação tridimensional, do objeto a ser gerado, a partir de um software de CAD, geralmente no formato STL² (representação de uma malha triangular). Após a obtenção do arquivo STL, o modelo 3D é enviado para um sistema CAM, geralmente específico para cada processo/máquina, onde será seccionado em finas fatias paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de construção Z, conforme ilustrado na Figura 1. Na seqüência de etapas, o sistema CAM processa a trajetória da ferramenta para cada uma das camadas bidimensionais e o arquivo para o comando numérico (NC) da máquina é gerado. O arquivo NC é então enviado para máquina, normalmente via intranet, e a máquina de prototipagem rápida inicia a fabricação do objeto 3D pela adição de camadas bidimensionais, onde cada camada construída é adicionada sobre a camada anterior (Figura 1).

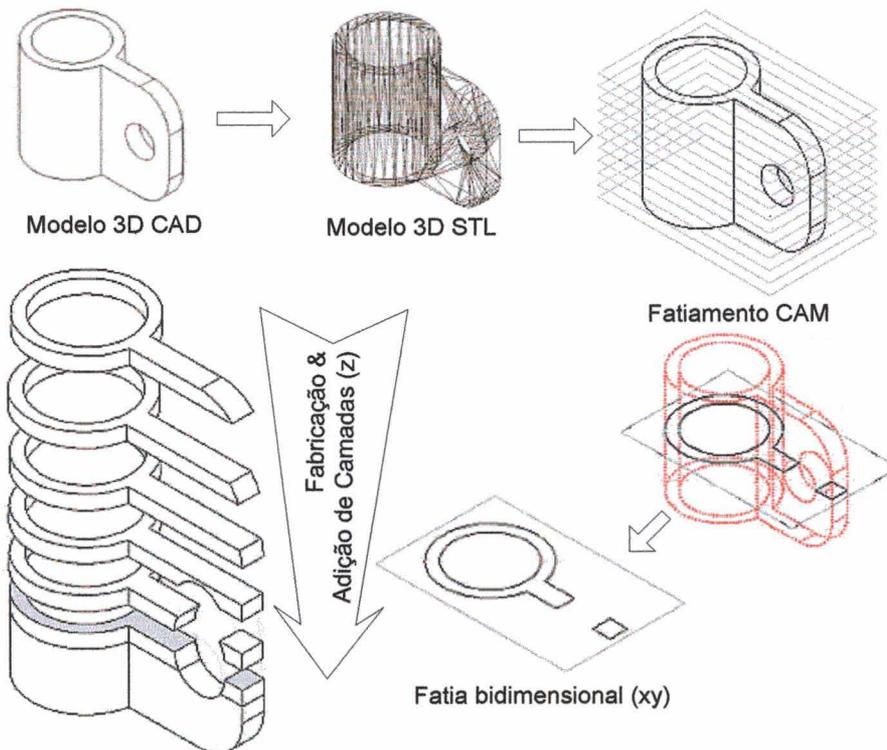


Figura 1: Ciclo genérico nos processos por adição de camadas.

² STL: *Structured Triangle Language*, ou abreviação de *Stereolithography*.

Existem diferentes princípios físicos que distinguem os protótipos em precisão, qualidade superficial, material, operações de acabamento, tempo de fabricação e espessura de camadas. Uma característica marcante na maioria destes processos é a presença do *efeito-escada* que é causado pela sobreposição de camadas. Quanto mais finas as camadas, menor será o efeito-escada. Para reduzir este efeito, geralmente são realizadas operações de lixamento, jateamento com material abrasivo e recobrimento na superfície da peça. Maiores informações podem ser obtidas em Jacobs (1992), Gomide (2000), Reeves (1997) e Renap (1995) .

2.2 - Definição de Ferramental Rápido (*Rapid Tooling*)

O termo *ferramental* faz referência aos moldes utilizados por processos como moldagem por injeção e conformação. A definição de ferramental rápido provém da utilização de tecnologias de prototipagem rápida para a construção de uma ferramenta (molde), que proporcione a fabricação de peças em um curto espaço de tempo (geralmente o prazo máximo é de uma semana), normalmente no material final da peça a ser fabricada.

A fabricação de moldes pelas tecnologias de prototipagem rápida pode ser realizada por processos diretos e indiretos. Nos processos diretos o molde é fabricado em uma máquina de prototipagem rápida e nos processos indiretos o molde é obtido através de um modelo que é fabricado em uma máquina de prototipagem rápida. Independentemente se o processo é direto ou indireto, a ferramenta final possuirá diferentes características que são importantes para o produto moldado, como por exemplo, rugosidade e precisão dimensional. Contudo, uma das maiores preocupações na

atualidade é com o prolongamento da vida útil da ferramenta, que varia significativamente entre os mais variados processos. Um aprofundamento maior no assunto pode ser obtido em Gomide (2000), Lafratta (1997), Jacobs (1992 & 1996), Dickens (1999), Wholers (1999) e Radstok (1999).

2.3 - A Estereolitografia

A estereolitografia proporciona a fabricação de objetos tridimensionais através da foto-polimerização de uma resina pela incidência de luz ultravioleta (UV). Um esquema simplificado do funcionamento do processo pode ser visualizado na Figura 2. O feixe de laser UV, indicado na figura, é direcionado por um conjunto de espelhos sobre a superfície da cuba com resina foto-sensível, polimerizando a resina para formar uma camada do objeto em construção. Ao final da polimerização da camada, a plataforma é abaixada por um elevador, adicionando resina líquida sobre a camada anterior. Uma faca regulariza a camada de resina líquida, devido a viscosidade elevada, e novamente o feixe de laser é direcionado sobre a resina líquida, polimerizando e grudando uma camada à outra. O processo continua até a completa formação do objeto tridimensional. Salienta-se que o processo apresentado é o originalmente concebido em 1988 pela empresa norte-americana 3Dsystems, que desenvolveu o primeiro sistema RP. Entretanto, existem muitos outros processos de estereolitografia com diferentes configurações, mas que possuem a foto-polimerização como princípio físico-químico para fabricação e adesão entre camadas. Em Jacobs (1992 & 1996) e 3Dsystems (1998) as diferenças entre os processos são detalhadamente explicadas.

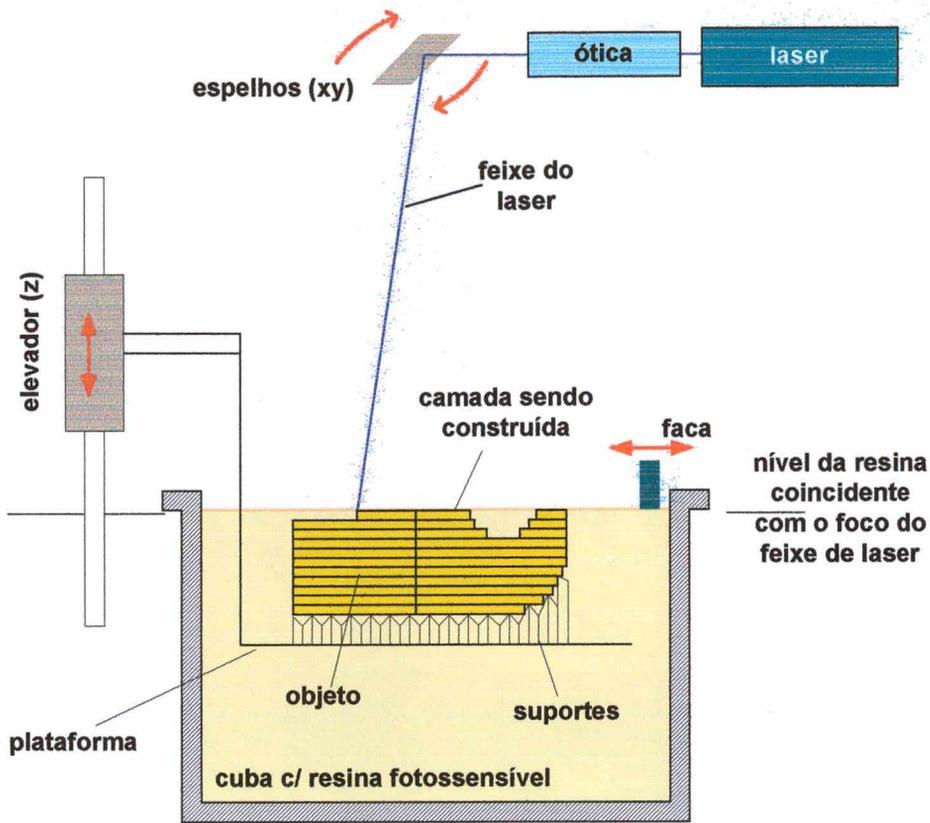


Figura 2: Esquema básico do processo de estereolitografia da 3D Systems.

2.4 - Ferramental Rápido Obtido por Estereolitografia

No que se refere à fabricação de ferramentas (moldes/insertos), a estereolitografia tem sido aplicada principalmente para a moldagem por injeção de termoplásticos na confecção de insertos SL que contém a forma geométrica da cavidade do molde (método direto) ou de modelos que servirão de padrão para a confecção do inserto (ou molde) por um método indireto de fabricação (Tabela 1).

Tabela 1: Métodos para a obtenção de insertos para moldagem por injeção com o auxílio da estereolitografia.

Nome	Descrição	Características
Insertos SL ou <i>Direct AIM</i> ^{TM 3} (direto)	Obtenção direta da ferramenta em estereolitografia. O inserto pode ser submetido à 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 contra-molde de silicone e fabricação do molde sinterizado.	Possibilidade de alcançar mais de 1.000.000 ⁴ de peças moldadas. O molde é fabricado em 8 dias.
3D Keltool Reverso (indireto)	Fabricação de um modelo em SL, fabricação de um molde em silicone, mais um contra-molde em silicone e fabricação do molde sinterizado.	
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 (Grellmann, 2001).	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) (Arthur et al., 1996). 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 1 eletrodo para a fabricação de cada inserto.

A estereolitografia vem sendo também pesquisada no sentido de diversificar seu campo de aplicação, por exemplo, na fabricação de moldes para a confecção de peças de plástico reforçado com fibra de vidro (PRVF), coquilhas para ligas fundíveis e moldes para termoformagem (Tabela 2).

³ 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*.

⁴ Dados obtidos em: <http://www.3dsystems.com> (26/04/2001).

Tabela 2: Outros métodos para a obtenção de moldes com o uso da estereolitografia.

Nome	Descrição	Características
Coquilhas para a técnica de núcleo perdido, "lost-core" (direto)	A coquilha é construída em SL e ligas fusíveis (baixo ponto de fusão) podem ser vazadas diretamente no inserto (Vandresen, 1999).	Resultados preliminares apontam bons resultados, porém a técnica está em desenvolvimento.
Moldes para PRFV (direto e indireto)	Modelo e molde são construídos em estereolitografia e utilizados para a fabricação de peças e/ou outro modelo para peças reforçadas com fibra de vidro (Longhi, 1999).	Resultado final de excelente qualidade, mas ainda são necessários alguns aprofundamentos para a sua utilização.
Moldes para termoformagem (direto)	Os moldes são fabricados de maneira similar a aquele utilizado na obtenção de um inserto SL para injeção, mas o uso é termoformagem.	Não há dados registrados a respeito do número de peças que podem ser fabricadas.

Em se tratando de insertos SL para a injeção de material termoplástico, estes permitem a fabricação de pré-séries de peças moldadas com o mesmo material do produto final. Isso proporciona uma melhor avaliação do produto injetado que poderá ser testado amplamente antes da fabricação de uma ferramenta definitiva, em aço ou alumínio. Insertos SL oferecem também a oportunidade de pré-avaliar a ferramenta de injeção (canal de injeção, pinos extratores, etc). Outra vantagem do processo é o reduzido prazo, inferior a 4 dias para a fabricação dos insertos e moldagem da pré-série (Gomide, 2000). Outras vantagens são a fidelidade geométrica aos detalhes e as tolerâncias alcançadas com uso de insertos SL, que ainda não são possíveis de serem alcançadas em outras tecnologias de ferramental rápido. Tais vantagens proporcionadas com a utilização de insertos SL faz com que os mesmos sejam, atualmente, utilizados nos mais diversos segmentos industriais, como produtos de informática, telefonia, eletrodomésticos, setor automobilístico, etc (Wholers, 2001).

2.4.1 - Tipos de Insertos SL para Moldagem por Injeção

Os insertos SL podem ser fabricados de quatro maneiras diferentes: em forma de casca, totalmente sólidos, pelo processo denominado de *conformal cooling* (canais incorporados) e, mais recentemente, com aletas (Ahrens et alii, 2001). A técnica mais tradicional é a de casca descrita por Decelles & Barritt (1997), onde os insertos são fabricados com espessura de 1,27mm para depois serem preenchidos com uma liga metálica de baixo ponto de fusão ou resinas com carga de alumínio. Para auxiliar na extração de calor durante o ciclo de moldagem, um circuito de refrigeração constituído por tubos de cobre é incorporado ao material de preenchimento, para circulação de água. Alguns tipos de preenchimentos possíveis de serem utilizados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Ligas de baixo ponto de fusão utilizadas para preencher moldes construídos em forma de casca (Indalloy, 2000).

Ligas [% em massa]				Temp. Solidus [K] / [°C]	Temp. Liquidus [K] / [°C]	Densidade [g/cm ³]	Condutividade Térmica [W/cm. °C] ⁵	Coeficiente de Expansão Térmica [ppm/°C] ⁶	Custo [US\$/kg] (12/2000)
Bi	Sn	Pb	Cd						
50	12,5	25	12,5	343,15 / 70	346,15 / 73	9,6	~0,18	~22	11,00
54	26	--	20	375,15 / 102	376,15 / 103	8,78	---	---	13,00
56,6	--	43,5	--	397,15 / 124 (eutética)		~10,44	~0,04	---	10,60

Apesar da técnica de casca ter sido desenvolvida em conjunto com a empresa 3Dsystems para expandir as aplicações da tecnologia de estereolitografia, outros pesquisadores (Dickens, 1999) optaram pela utilização de insertos sólidos, pois

⁵ Propriedades a 85°C.

⁶ Propriedades a 20°C.

argumentam que a baixa condutividade térmica da resina de estereolitografia não permite uma transferência de calor da peça moldada através da casca para o material de preenchimento do inserto (exemplo: resina DSM 7110, coeficiente de condutividade térmica, $k=0,19\text{W/m.K}$, DSM Somos, 1999). Outro argumento apresentado é que o procedimento de preenchimento do inserto pode causar distorções no molde que serão reproduzidos na peça moldada. Em Li et alii (2000), Ahrens et alii (2001) e Saurkar (1998) são apresentadas comparações entre algumas das técnicas em discussão.

Para melhorar o resfriamento do inserto SL, foi adaptada a técnica do *Conformal Cooling* de insertos obtidos a partir de pós sinterizados (utilizados com as tecnologias SLS e DMLS). Nesta técnica, canais de refrigeração são incorporados no projeto do modelo CAD do inserto a ser construído na máquina. Os canais podem ser projetados livremente de forma a melhor se ajustarem à superfície da cavidade do inserto.

Os insertos com aletas incorporadas na superfície da cavidade foram adaptados a partir dos insertos em forma de casca. O objetivo desta técnica é proporcionar uma extração de calor mais eficiente que a do inserto fabricado em formato de casca. Esta técnica permite o contato direto entre a peça moldada e a liga metálica de baixo ponto de fusão em regiões específicas da cavidade. Em Ahrens et alii (2001) são apresentados resultados de simulações térmicas comparativas entre insertos de cavidades idênticas, fabricados em forma de cascas, sólidos e com aletas, onde é comprovada a eficiência térmica superior de insertos com aletas. Contudo, este processo encontra-se em desenvolvimento no laboratório CIMJECT da Universidade Federal de Santa Catarina e necessita de estudos mais aprofundados visando sua otimização. A Figura 3 ilustra as quatro alternativas de construção de insertos SL comentadas. Em Gomide (2000) a obtenção de insertos em casca é explicada em maiores detalhes.

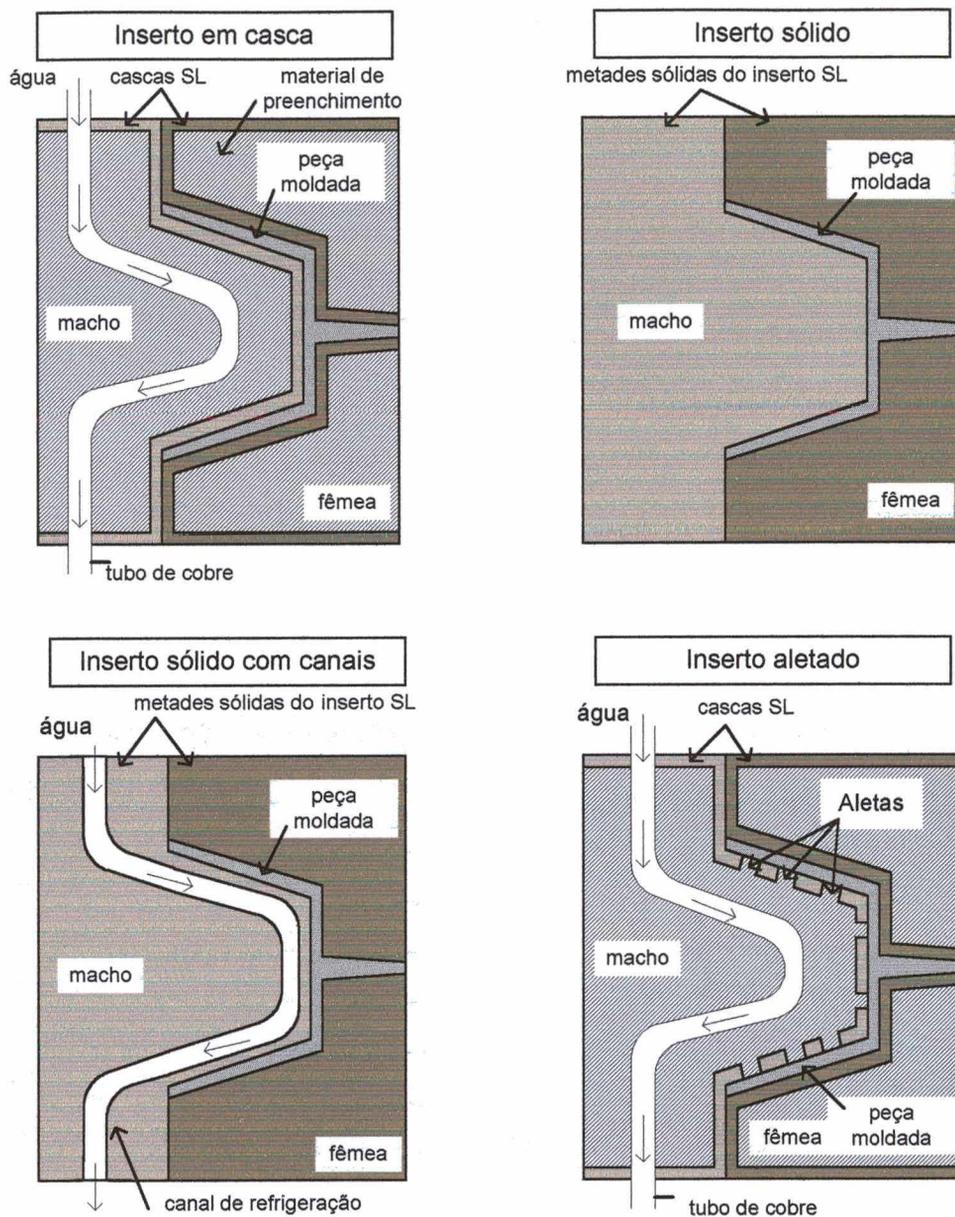


Figura 3: Diferentes tipos de insetos feitos em estereolitografia (Ahrens et alii, 2001).

2.4.2 - Operações de acabamento em insetos SL

Para produzir peças com a qualidade superficial desejada os insetos passam, geralmente, por operações de acabamento (também denominadas de operações de pós-processamento) após a sua fabricação na máquina de estereolitografia. Na Tabela 4 é apresentada uma relação sucinta das operações de pós-processamento realizadas em objetos construídos por estereolitografia, sejam peças, modelos ou insetos.

Tabela 4: Operações usuais de pós-processamento de objetos construídos por estereolitografia.

Operação	Material/Método	Objetivo
Exposição UV	1 hora de forno UV.	Curar a resina SL que não tenha sido curada no objeto recém tirado da máquina.
Tratamento térmico	30 minutos à 150°C ⁷ .	Aumentar a rigidez do objeto.
Lixamento manual	Lixas 100 a 2000mesh	Melhorar o aspecto superficial, amenizar o efeito escada, ajustar as dimensões, etc.
Recobrimento	Vernizes, tintas, massa plástica, promotores de aderência, etc.	Melhorar a estética ou preparar a superfície para operações posteriores.
Galvanoplastia	Banho eletrolítico de cobre, prata, etc.	Criar uma fina camada metálica na superfície do objeto, tanto para melhorar o aspecto estético quanto as propriedades mecânicas e/ou químicas.
Jateamento	Jato-de-areia ou esferas de vidro.	Melhorar o aspecto superficial e atenuar os riscos remanescentes do lixamento.
Colagem	Resina SL ou Epoxi (Araldite®).	Colar pedaços de um objeto que tenha sido fabricado em etapas, por ser maior que o tamanho máximo de construção da máquina.

A primeira operação básica de pós-processamento é a exposição dos insertos em forno ultra-violeta durante 1 hora para garantir um maior grau de polimerização da resina. Este é um procedimento padrão para qualquer objeto fabricado por estereolitografia, mas o tempo de exposição pode variar dependendo da geometria, do volume e da espessura média do objeto.

Na seqüência das operações de pós-processamento utilizadas em insertos SL, são executadas operações de lixamento manual, para reduzir o efeito-escada. Inicialmente são utilizadas lixas de 300mesh e podem ser empregadas lixas de até 1000mesh para garantir superfícies lisas e sem arranhões. Pastas abrasivas e feltros são usados para garantir a remoção de material em áreas de difícil acesso. Além de garantir uma boa qualidade superficial à peça moldada, esta etapa contribui para a sua

⁷ Tempo e temperatura variam conforme resina utilizada. Os dados apresentados são para resina DSM Somos 7110 conforme Cedorge (1999).

extração, ao final do ciclo de moldagem. O processo de lixamento das superfícies deve ser feito por um operador experiente, pois se trata de um processo de retirada de material e as tolerâncias requeridas devem ser respeitadas para que, os erros dimensionais já característicos do processo, não sejam aumentados. A Figura 4 ilustra um esquema com algum dos erros provenientes do efeito escada em superfícies inclinadas em relação ao plano de construção da máquina de estereolitografia e a operação de lixamento.

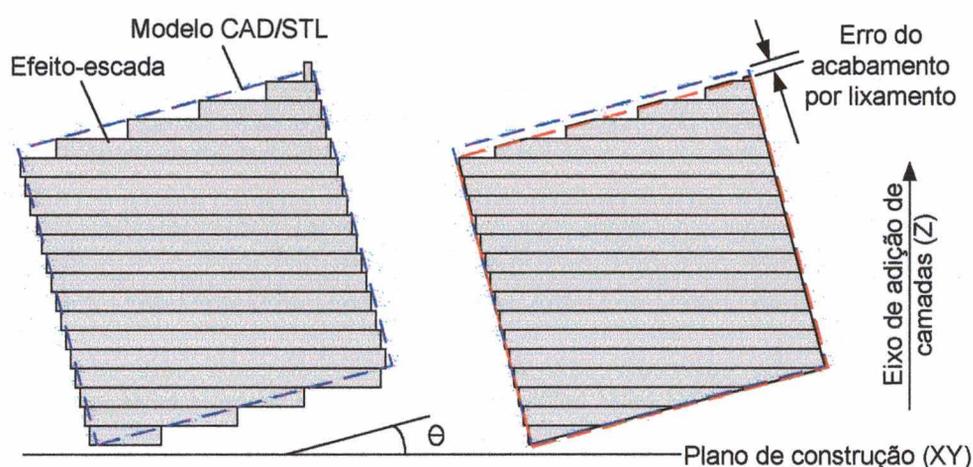


Figura 4: Erros provenientes da construção e erros ocasionados pela operação de lixamento.

Para facilitar a extração do moldado e prolongar a vida útil do inserto, pode ser realizado um recobrimento superficial da cavidade. Recomenda-se a utilização de vernizes e principalmente metais através, por exemplo, da galvanoplastia ou eletrodeposição, sendo que o recobrimento metálico confere um melhor acabamento superficial à peça (Arthur et alii, 1996). As dificuldades em recobrir insertos estão em aplicar camadas uniformes, aderentes e finas (menores que $50\mu\text{m}$).

Outra etapa recomendada por Cedorge et alii (1999) é a realização de um tratamento térmico para aumentar a rigidez da resina. É sugerido que os insertos sejam

inseridos em um forno à temperatura de 150°C durante 30 minutos. Este autor afirma que, devido a rigidez adicional adquirida pela resina através do tratamento térmico, os esforços aplicados sobre o inserto SL, durante a etapa de extração da peça, serão reduzidos. Desta forma, o molde termicamente tratado possui vida útil maior mas, no entanto, a resina torna-se muito frágil e pode ocorrer a fratura em regiões mais solicitadas por efeitos termomecânicos.

Para os insertos SL em forma de casca e aletados, o preenchimento com ligas condutoras de calor é considerado como sendo uma etapa que faz parte das operações de pós-processamento. Após a finalização dos insertos estes ainda passam por ajustes (usualmente o lixamento) para que sejam fixados nos porta-moldes.

2.4.3 - Moldagem por Injeção em Insertos SL

Depois de construídos e acabados, os insertos são acoplados ao porta-molde e fixados nas placas da máquina injetora. O processo de injeção ocorre diferentemente do processo usual utilizado em moldes metálicos. Portanto, o objetivo não é uma elevada produtividade, mas sim a produção de uma certa quantidade de peças, de qualidade, possíveis de serem moldadas na cavidade formada pelos insertos SL. Como as características da resina SL não permitem a aplicação de elevadas pressões, é necessário reduzir as pressões de injeção e recalque⁸ durante o ciclo de moldagem, sendo que esta última muitas vezes não é nem aplicada (Decelles & Barritt, 1997). Outro parâmetro que deve ser controlado é a temperatura de injeção do termoplástico que deverá ser a mais baixa possível, sem no entanto provocar a elevação da pressão

⁸ A redução das pressões durante a injeção são ajustadas conjuntamente com velocidades de deslocamento do fuso e temperaturas do molde e material fundido.

necessária para injetar o material. Este parâmetro é menos crítico, pois o inserto SL não possui uma difusividade térmica tão grande quanto os moldes metálicos, não permitindo que ocorra tão facilmente o congelamento da frente de fluxo.

Com relação ao tempo de resfriamento, existem duas linhas de pensamento. A primeira proposta por Decelles & Barritt (1997) argumenta que o tempo de resfriamento deverá ser o mais prolongado possível para que a peça transfira calor para o inserto e possa ser retirada sem ocorrer deformações. Para Hopkinson (2000) e Colton (2001) o tempo de resfriamento deve ser o mínimo possível, pois quanto menor o tempo de exposição do inserto SL às altas temperaturas de injeção, menor será o risco de degradação prematura do material. Nesta linha é sugerido que o molde seja aberto no instante que a peça moldada adquirir resistência mecânica suficiente para ser manuseada. Nos dois casos é recomendada a utilização de jatos de ar comprimido para ajudar na retirada de calor da superfície do molde entre ciclos consecutivos. Para auxiliar na extração da peça são utilizados desmoldantes iguais aos utilizados em moldes convencionais, como por exemplo, o silicone líquido. Convenientemente, pinos extratores são utilizados para que as peças sejam ejetadas do molde com maior facilidade.

Outro parâmetro a ser alterado é a velocidade de injeção. Esta deverá ser reduzida, pois como não ocorre o “congelamento” da camada criada pela frente de fluxo do material injetado na cavidade, podem ocorrer fenômenos como o esguichamento (*jetting*).

Na Figura 5 é apresentada a comparação de valores entre alguns parâmetros de moldagem para o termoplástico polipropileno injetado em diferentes moldes: um metálico (aço) e um construído por estereolitografia.

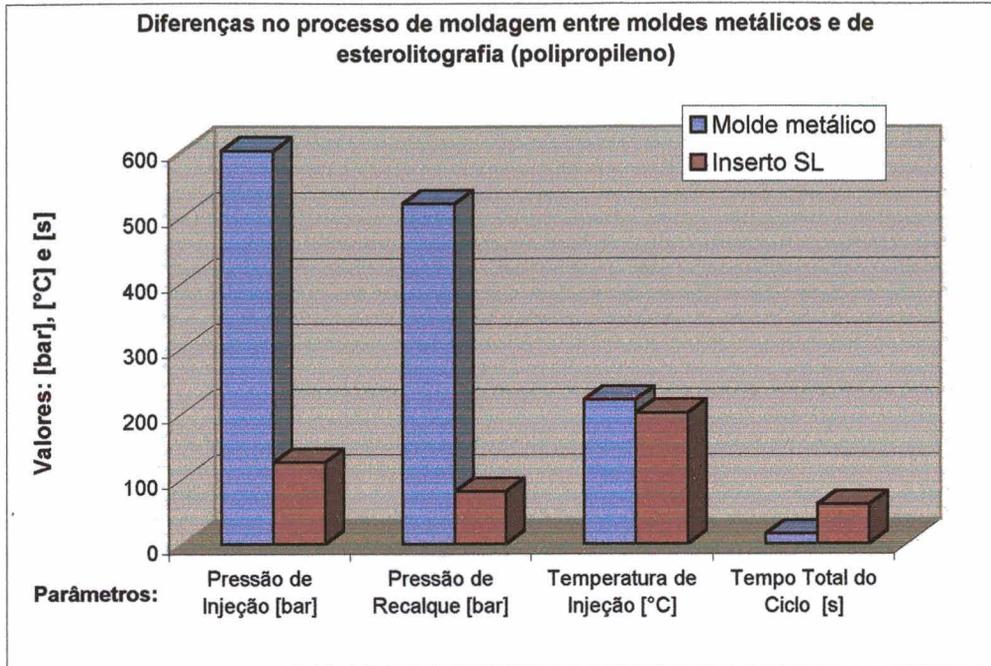


Figura 5: Representação gráfica da diferença entre os parâmetros de moldagem entre moldes convencionais e moldes de estereolitografia.

2.4.4 - Limitações dos Insertos SL para a Moldagem por Injeção

Os insertos SL possuem restrições quanto ao número de peças possíveis de serem obtidas. Este número depende, basicamente, das propriedades da resina de estereolitografia utilizada, das propriedades do material termoplástico injetado e da complexidade geométrica da peça. No trabalho de Gomide (2000) foram injetadas até 270 peças, Dickens (1999) por sua vez, relata ter conseguido injetar cerca de 500 peças de polipropileno antes do molde apresentar algum tipo de defeito. Para muitos pesquisadores, as maiores dificuldades provêm da complexidade geométrica da peça e da degradação da resina SL durante o ciclo de moldagem. Em Hopkinson (2000) é apresentada a relação da tensão de ruptura da resina SL (Cibatool® SL5170) em função da temperatura, onde fica evidente o decréscimo da tensão de ruptura com a elevação da temperatura. Esta situação é considerada válida para os tipos de resina mais comuns utilizados em estereolitografia e pode ser representada pela curva da Figura 6, adaptado de Hopkinson (2000).

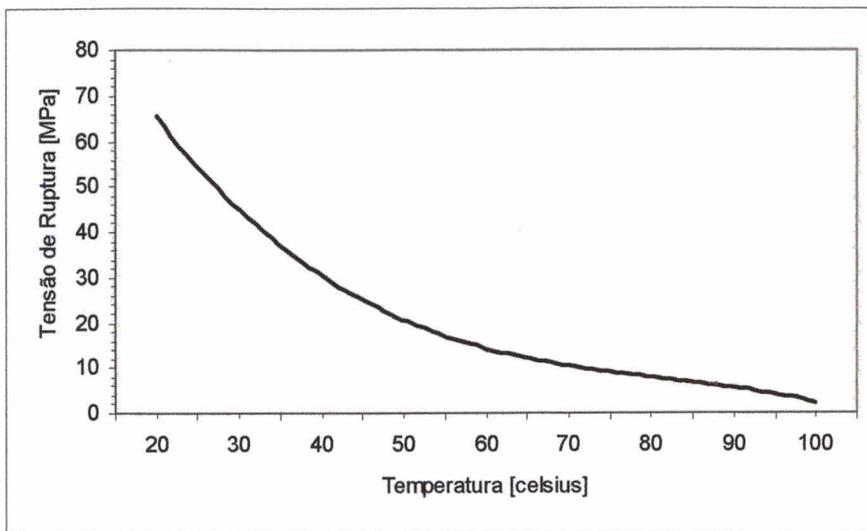


Figura 6: Curva representando a tendência do decréscimo da tensão de ruptura com o aumento da temperatura, considerado válido para resinas SL.

A utilização de gavetas em insertos SL para a fabricação de peças com detalhes que necessitem de mecanismos móveis para poderem ser fabricados (exemplo: furos com eixo paralelo ao plano de abertura do molde) ainda é objeto de estudo e necessita de otimização para que possa ser utilizada com eficiência sem reduzir a vida útil do inserto (Ribeiro, 2000).

A degradação da resina SL devido à exposição a altas temperaturas de injeção causa a redução da vida útil da ferramenta. Conseqüentemente, termoplásticos que necessitem de temperaturas de injeção maiores reduzem ainda mais a vida útil da ferramenta. De acordo com Dickens (1999), grande parte das falhas dos insertos SL ocorre quando as forças de extração superam a tensão de ruptura do material SL ao ser extraída a peça moldada. Atualmente o desenvolvimento de novas resinas vem criando expectativas com relação a um aumento do número de peças moldadas em insertos SL.

2.5 - Considerações Finais para o uso de Insertos SL

Com base na revisão apresentada, os insertos obtidos por estereolitografia para a moldagem por injeção de termoplásticos possuem diferentes técnicas que podem ser utilizadas igualmente para a moldagem de pós, no entanto, para redução do número de variáveis nos estudos de caso, algumas técnicas selecionadas e listadas abaixo, foram utilizadas para o desenvolvimento dos estudos:

➤ Quanto ao projeto e à fabricação dos insertos:

- Na etapa de pós processamento, execução apenas da cura em forno ultravioleta para melhorar as características mecânicas da resina;
- Na etapa de acabamento superficial não será realizado acabamento superficial nos insertos para que as dimensões não sejam alteradas pelo operador na etapa de pós-processamento;
- Os insertos serão projetados em forma de casca por motivos econômicos. A espessura das cascas deverá ser de 2mm para aumentar a resistência da casca de resina;
- O material disponível que será utilizado para o preenchimento das cascas é a liga de baixo ponto de fusão à base de bismuto e chumbo (72°C), alterando o material se o desempenho não for satisfatório;

➤ Quanto à moldagem por injeção:

- Ciclos com parâmetros de injeção não agressivos assim como os de termoplásticos;
- Uso de um agente desmoldante para auxiliar na extração da peça.

3 - Moldagem por Injeção de Pós

A moldagem por injeção de pós (PIM, *Powder Injection Molding*) é uma combinação da metalurgia do pó com o processo de moldagem por injeção, portanto, através deste processo, pode-se obter peças com geometrias complexas (moldagem por injeção) com o uso de materiais com propriedades⁹ superiores ou especiais (metalurgia do pó). São utilizados materiais como metais, cerâmicas, compostos intermetálicos e compósitos que são misturados a um sistema ligante (por exemplo: polipropileno, cera e ácido esteárico) que possibilitam a moldagem do componente. Na Figura 7 é apresentado um esquema básico do processo PIM.

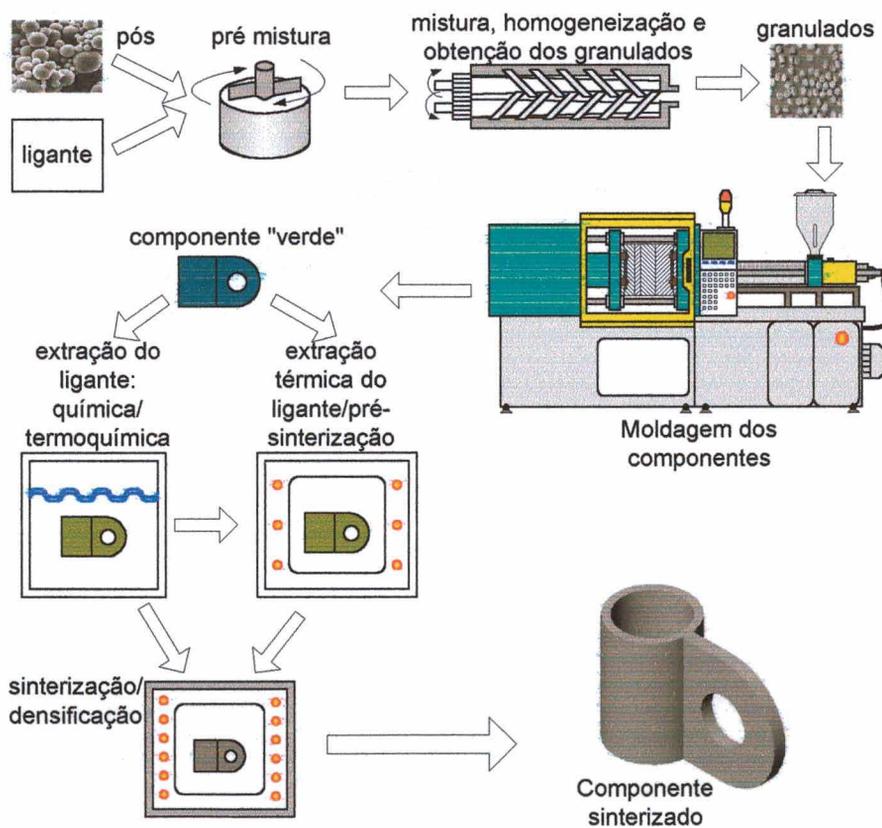


Figura 7: Esquema do processo PIM (adaptado de German & Bose, 1997).

⁹ Propriedades mecânicas, térmicas, eletromagnéticas, etc.

O processo inicia-se com a escolha de um sistema de pós e ligantes apropriados que apresentam, principalmente, características consideradas adequadas ao processo de moldagem por injeção. Após a mistura, homogeneização e granulação, a matéria-prima é depositada no sistema de alimentação de uma máquina injetora que possui pequenas diferenças em relação às injetoras convencionais de plástico. O ciclo de moldagem ocorre de maneira similar ao processo de moldagem de termoplásticos com o aquecimento da mistura, fechamento do molde, pressurização da mistura aquecida para o interior da cavidade, resfriamento da mistura e formação do componente, seguido pelos passos de abertura do molde e extração da peça moldada. Obtido o componente “verde” seguem então os passos de extração do ligante (peça “marrom”) e sinterização, como visto na Figura 7. Esta é uma descrição básica do processo, pois existem muitas variações entre cada uma das etapas. Maiores detalhes de cada uma destas etapas serão vistos no tópico 3.3.

3.1 - Aplicações

As aplicações possíveis são diversas e podem ser encontradas peças nos mais diferentes segmentos industriais tais como automotivo, aeroespacial, implantes médicos e odontológicos, armamentos, computadores, celulares e etc.

A escolha pela utilização da moldagem por injeção de pós pode ser feita tanto por motivos econômicos quanto técnicos. Na Figura 8 são apresentadas imagens de peças fabricadas por MIM (*Metal Injection Molding*, moldagem por injeção de pós metálicos), apresentando geometrias simples e complexas.

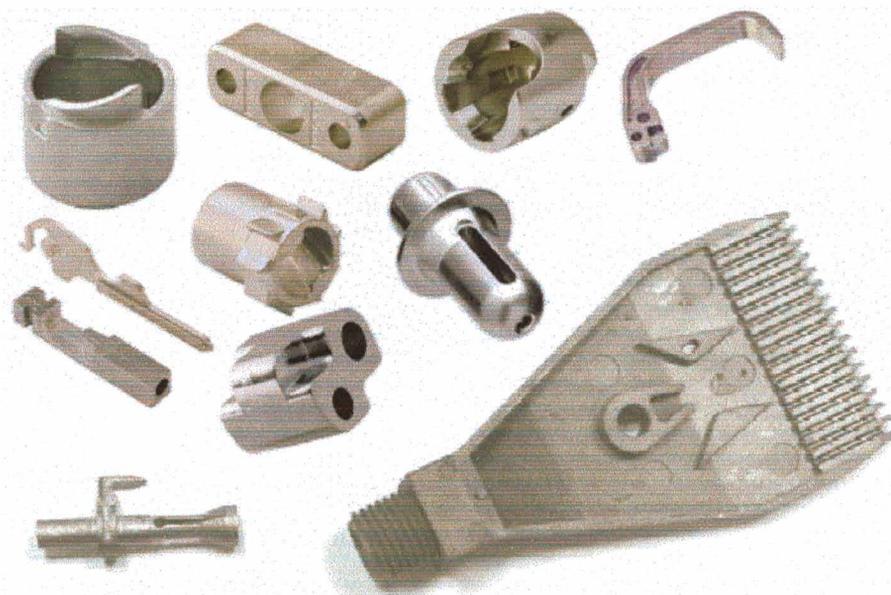


Figura 8: Exemplos de peças fabricadas pelo processo MIM ¹⁰.

3.2 - Vantagens

As maiores vantagens da tecnologia PIM podem ser citadas como (German & Bose, 1997):

- Obtenção de geometrias complexas e bem projetadas;
- Custo baixo para grandes lotes;
- Precisão, acabamento e reprodutibilidade;
- Flexibilidade de materiais;
- Ótimas propriedades (mecânicas, térmicas, etc).

A moldagem por injeção surgiu em decorrência de limitações do processo convencional por compactação uniaxial que não permite a eficiente compactação de peças com relativa complexidade geométrica. Portanto, com o uso da tecnologia PIM é possível obter-se componentes com densidade de 95% do valor teórico, ou maior, homoganeamente distribuída na peça.

¹⁰ Imagens obtidas em <http://www.oemsuppliers.com> e <http://www.pacificsintered.com> (23/10/2001).

3.3 - Fundamentos PIM

Na metalurgia do pó convencional é comum a peça sinterizada possuir dimensões próximas a do componente compactado. Desse modo é relativamente fácil assegurar tolerâncias dimensionais estreitas. Para a moldagem por injeção isso pode tornar-se um problema, pois a extração do ligante, que é misturado ao pó para dar fluidez à matéria-prima, ocasiona grandes contrações na peça. Apesar de causar este efeito, proporciona uma grande vantagem sobre a metalurgia do pó convencional, pois o risco de empenamento devido a diferenças de densidades ocasionadas pela má compactação do material é reduzido. Isso depende de uma mistura homogênea entre o ligante e o pó, condições de processo e projetos adequados do molde e da peça.

A combinação entre a geometria do pó e do ligante deve proporcionar características reológicas suficientemente boas que proporcionem fluidez sem ocasionar a segregação de pó na cavidade durante a injeção. Alguns destes aspectos serão discutidos nos próximos tópicos.

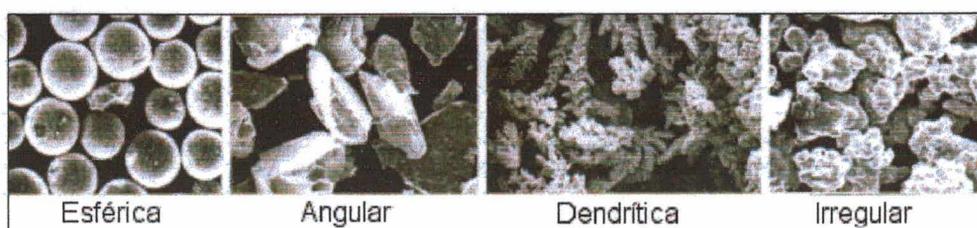
3.3.1 - Pós

Os pós definem as propriedades finais do componente. Porém, existem muitos fatores envolvidos que influenciam no processo e, conseqüentemente, na qualidade final do componente, afetando tais características. As características do pó influenciarão nas propriedades da mistura devido à interação com o ligante. Na Tabela 5 são apresentadas as características ideais de um pó para o processo PIM, apesar de, na prática, não ser possível encontrar todas estas características em um mesmo pó.

Tabela 5: Características de um pó ideal para PIM (German & Bose, 1997).

- Partículas com tamanho entre 0,5 e 20 μ m com 50% da distribuição entre 4 e 8 μ m;
- Distribuição de tamanho de partículas muito estreita ou muito dispersa;
- Não aglomerante;
- Geometria esferóide;
- Ângulo de repouso¹¹ maior que 55°;
- Partículas densas;
- Baixa toxicidade ou poder de explosão;
- Superfície do pó limpa;
- Segregação mínima;

Tamanho de grão pequeno é uma característica desejável para acelerar a sinterização do componente, porém o custo de fabricação é alto e facilmente ocorre a aglomeração do pó ao ser misturado com o ligante. Procura-se utilizar pós com partículas grandes e pequenas para que as partículas pequenas possam ocupar os espaços entre as partículas grandes. Quanto mais esférica a partícula menor a viscosidade da mistura, porém o custo ao utilizar-se partículas esféricas é mais alto e o componente fica muito frágil após a etapa de extração do ligante, pois não há formação de uma estrutura rígida nos contatos entre as esferas. Contudo, as misturas que utilizam pós esféricos apresentam maiores quantidades de pó em relação ao ligante, pois partículas esféricas garantem maior fluidez. Esta característica de maior carga de pó na mistura proporciona uma facilidade maior no controle dimensional do componente devido às menores taxas de contração nas fases de extração do ligante e sinterização. Na Figura 9 são apresentadas algumas geometrias de pós utilizadas na moldagem por injeção.

**Figura 9: Alguns tipos de geometrias de pós utilizados em PIM (German&Bose, 1997).**

¹¹ Ângulo de repouso é determinado a partir do empilhamento do pó. Maiores detalhes German & Bose (1997) e Thümmeler & Oberacker (1993).

3.3.2 - Ligantes

A combinação entre o sistema de pós e ligantes é o ponto crítico do processo PIM. Normalmente o ligante é composto por um conjunto de componentes que proporcionam características distintas para cada fase do processo. A escolha dos componentes depende de uma série de fatores que estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6: Atributos ideais de um ligante (German & Bose, 1997).

Características de moldagem	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Viscosidade inferior a 10Pa.s na temperatura de moldagem; ▪ Baixa alteração da viscosidade durante a moldagem; ▪ Rápida mudança de viscosidade durante o resfriamento; ▪ Resistente e rígido após o resfriamento; ▪ Moléculas pequenas que preencham o espaço entre as partículas de pó e evitem orientação durante a moldagem;
Interação com o pó	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pequeno ângulo de contato¹²; ▪ Aderência ao pó; ▪ Quimicamente estável, mesmo em altas temperaturas e tensões; ▪ Termicamente estável durante a mistura e moldagem;
Etapa de extração	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Múltiplos componentes com diferentes características; ▪ Sub-produtos, após a extração, não corrosivos e não tóxicos; ▪ Baixo teor de cinzas e baixos índices de constituintes metálicos; ▪ Temperatura de decomposição acima da temperatura de moldagem e mistura; ▪ Temperatura de decomposição inferior a de sinterização; ▪ Completa eliminação do ligante quando o pó fornecer rigidez estrutural ao componente;
Fabricação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixo custo e grande disponibilidade; ▪ Seguro e ecológico; ▪ Estocagem segura, baixa absorção de água e sem componentes voláteis; ▪ Não degradável por ciclos térmicos (reciclável); ▪ Alto poder de lubrificação; ▪ Rígido e não deformável; ▪ Alta condutividade térmica; ▪ Baixo coeficiente de expansão térmica; ▪ Solúvel em solventes comuns; ▪ Pequeno tamanho de cadeia e sem orientação;

As características da Tabela 6, traduzida de German & Bose (1997), resumem as propriedades que um ligante deve possuir, porém é difícil satisfazer todas estas

¹² Maiores informações a respeito do ângulo de contato podem ser obtidas em German et alii (1991) e Thümmler & Oberacker (1993).

propriedades, pois são alteradas a medida que o pó é misturado ao ligante (exemplo: aumento da viscosidade com o aumento da quantidade de pó adicionado à mistura).

Como exemplos de componentes de ligantes usualmente utilizados pode-se citar: polipropileno, polietileno, poliestireno, parafina, óleo de carnaúba, água, ácido esteárico, etc. Em uma mistura com, por exemplo, 55% de parafina, 35% de polietileno e 10% de ácido esteárico, cada componente possui funções distintas. O ácido esteárico facilita o envolvimento das partículas de pó e os outros dois componentes, evita a formação de aglomerados de pó e aumenta a viscosidade da mistura. A parafina é extraída do componente na primeira etapa da extração, criando uma estrutura porosa enquanto o polietileno fornece rigidez ao componente interligando as partículas de pó. Posteriormente, o polietileno será mais facilmente extraído, antes da etapa de sinterização, devido à estrutura porosa deixada pela parafina. Este é apenas um exemplo de como cada componente é importante para o sucesso do processo PIM. A Tabela 7 mostra, de modo sucinto, os sistemas ligantes mais utilizados atualmente.

Tabela 7: Sistemas Ligantes Convencionais (Petzoldt, 1992).

Ligante	Principal constituinte	Polímero de estrutura	Aditivos
Ligantes Termoplásticos	parafina microcristalina / carnaúba / cera de abelha / vegetais / óleo de amendoim/ acetanilide, anitpyrine / naftaleno	PE, PP, PS, PA, PE-VA, PE-a, PP-A, PMBA-E-VA	esteárico / ácido oléico e éster
Ligantes Termofixos	resina epoxi, resina furan	---	ceras, surfactantes
Ligantes Gelatinosos	água	metil celulose, ágar	glicerina, ácido bórico
Ligantes Congelantes	polioximetileno	---	---

3.3.3 - Mistura dos Componentes

A mistura do pó com o ligante é realizada com cuidado e depende das características dos componentes, como por exemplo, da geometria do pó. A mistura ocorre em uma temperatura abaixo da temperatura de degradação dos constituintes do ligante e é realizada de maneira mais eficiente em extrusoras com dois fusos cônicos, garantindo através de forças cisalhantes, uma perfeita homogeneização dos componentes. A proporção e aglomeração do pó são fatores críticos a serem controlados durante a mistura, para que não ocorram dificuldades nas operações posteriores e, principalmente, o aparecimento de defeitos nas peças PIM.

3.3.4 - Moldagem

As máquinas injetoras para pós possuem pequenas diferenças em relação às utilizadas em moldagem de termoplásticos. A diferença principal é uma folga maior entre o cilindro e o parafuso da unidade de injeção. Outra diferença é um endurecimento superficial do cilindro e parafuso para diminuir o desgaste provocado pela abrasão dos pós utilizados.

O processo de moldagem de pós metálicos por injeção distingue-se muito pouco em relação ao de termoplásticos. O composto granulado é alimentado no funil da unidade de injeção, sendo empurrado pelo parafuso para frente do cilindro. As bandas térmicas e a força de cisalhamento gerada pela movimentação de matéria-prima entre o parafuso e cilindro causam o aquecimento da mistura, proporcionando fluidez à mesma. Quando o molde está fechado a unidade injetora aproxima-se do molde e a mistura aquecida é empurrada pelo parafuso para o interior da cavidade do molde. A mistura esfria ao entrar em contato com as paredes da cavidade dando a forma final ao componente. O molde é aberto e o componente “verde” pode ser retirado e conduzido para a etapa de extração do ligante.

Durante o processo de moldagem de pós metálicos muitas variáveis influenciam na obtenção de peças livres de defeitos que, em muitos casos, podem ser identificados somente após a sinterização das peças. As temperaturas de injeção demasiadamente elevadas podem levar a formação de rebarbas e a segregação de pó. Contudo, o contrário não favorece o preenchimento completo da cavidade. Pressões elevadas causam o esguichamento, rebarbas e dificultam a ejeção da peça. Já pressões reduzidas causam laminação do material. Estas são apenas algumas das variáveis que controlam esta etapa do processo de moldagem.

3.3.5 - Extração dos Ligantes

A extração dos ligantes possui diversas variações de processos que são utilizados conforme as características dos ligantes e pós. A Figura 10 mostra a variedade de processos existentes, subdivididos em processos térmicos e químicos (extração com o uso de solventes).

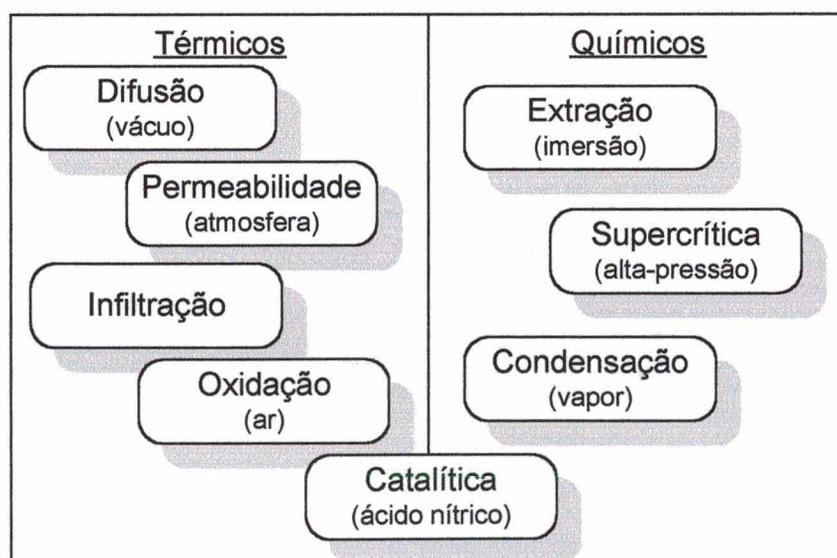


Figura 10: Classificação dos processos de extração dos ligantes (adaptado de German & Bose, 1997).

Recentemente Wendhausen et alii (2000) apresentaram a técnica de extração do ligante em reatores de plasma, onde um arco elétrico excita uma atmosfera gasosa superaquecida que atua na remoção dos ligantes dos componentes.

Independentemente do método utilizado para a extração, a maioria baseia-se na extração prévia de um primeiro constituinte, em maior quantidade, seguida da extração do segundo constituinte do ligante. Ao extrair-se o primeiro elemento que se dissolve ou volatiliza mais facilmente que o outro, cria-se uma estrutura porosa, onde o segundo componente é responsável por conectar as partículas de pó proporcionando rigidez ao componente para que este não apresente deformações (Figura 11).

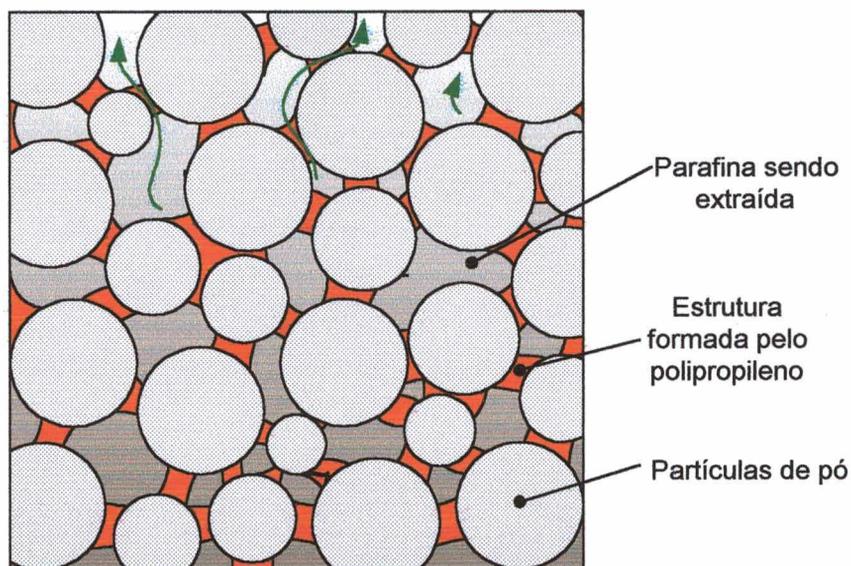


Figura 11: Estrutura porosa formada na extração da parafina.

Os métodos de extração seguem taxas de aquecimento otimizadas para evitar que ocorra o aparecimento de defeitos como empenamento, rachaduras, bolhas internas e resíduos.

A espessura das peças é um fator crítico para o processo de extração do ligante. Quanto mais espessa a peça, mais difícil será a extração do ligante assim como o tempo de extração pode tornar-se um fator economicamente inviável. Via de regra, é recomendável o valor máximo de 5mm para a espessura a ser utilizada em peças para o processo PIM. Adicionalmente, recomenda-se utilizar geometrias de espessura constante, pois evitam que ocorram distorções geométricas nos componentes durante o processo de extração do ligante, assim como na moldagem e na sinterização.

3.3.6 - Sinterização

A sinterização incorpora as características mecânicas desejadas ao componente moldado. Portanto, o objetivo da etapa de sinterização é reduzir os poros formados durante a extração do ligante, desenvolver o contato das regiões entre as partículas de pó, provocando a contração do componente. Usualmente a contração das mais diferentes matérias-primas utilizadas em PIM varia de 10 à 20%, sendo um valor característico de 15% muito comum. A contração depende de fatores como tamanho das partículas de pó, presença de fase líquida durante a sinterização, atmosfera utilizada durante a sinterização e, principalmente, das taxas de aquecimento e temperaturas empregadas. Apesar do percentual de contração ser considerável, o controle dimensional durante a etapa de sinterização é fácil de ser obtido. Na maioria dos casos, tanto variações dimensionais como defeitos são provindos das etapas anteriores de extração do ligante e, principalmente, da moldagem. Estas afirmações foram comprovadas em diversas pesquisas através de controle estatístico (German & Bose, 1997) durante as diversas etapas de obtenção de componentes.

O principal agente da sinterização é a temperatura que incita os diferentes mecanismos de sinterização a crescer a região de contato entre as partículas de pó. Na Figura 12 são apresentados os diferentes mecanismos de sinterização que transportam massa para as regiões de contato, ocasionando a diminuição dos poros, contração do material e união entre as partículas de pó.

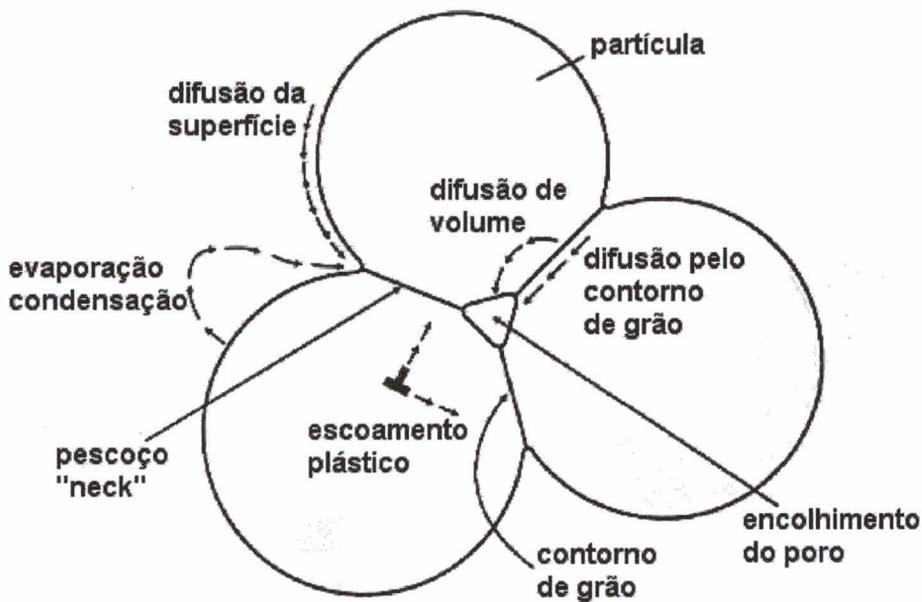


Figura 12: Mecanismos de sinterização (German & Bose, 1997).

As maiores preocupações na sinterização são o controle do crescimento dos grãos e a alteração das propriedades da liga ou componente. O crescimento dos grãos depende da temperatura e da taxa de aquecimento empregado que variam conforme o material utilizado. A predominância de grãos pequenos nas partículas de pó, auxilia o aumento das propriedades mecânicas do componente, assim como, possibilita uma sinterização mais rápida, pois os contornos de grãos permitem o transporte de massa

até os contatos entre as partículas de pó. Como regra básica, o aumento da temperatura de sinterização e a diminuição do tamanho de grão auxiliam a densificação do componente com a eliminação dos poros.

3.3.7 - Operações Complementares

Para a maioria das aplicações, a sinterização é a etapa final para a obtenção de peças PIM. Porém, dependendo da necessidade, ainda podem ser realizadas etapas complementares como por exemplo um tratamento superficial ou térmico, a densificação por pressão isostática, ou a conformação para ajuste dimensional ou de forma.

3.4 - Projeto de Peças e Moldes PIM

O projeto de componentes e moldes para a moldagem por injeção de termoplásticos é complexo, pois envolve muitas variáveis que geralmente estão ligadas à experiência da equipe de desenvolvimento e projeto. Para a moldagem por injeção de pós a complexidade dos problemas se estende ainda mais, pois abrange aspectos que devem ser considerados também para os processos posteriores aos da moldagem (extração do ligante e sinterização). Em German & Bose (1997) é apresentada de maneira genérica, uma tabela com orientações básicas para o projeto de peças PIM (Tabela 8).

Tabela 8: Orientações para projeto de componentes PIM (German & Bose, 1997).

Restrições:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cavidades internas restritas; ▪ Rebaixos em furos; ▪ Raios de arredondamento devem ser maiores que 0,075mm; ▪ Uso de ângulos de extração maiores que 2° em peças longas; ▪ Diâmetros devem ser maiores que 0,1mm; ▪ Espessura mínima de 0,2mm; ▪ Peso entre 0,02 a 20kg;
Detalhes desejáveis:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mudanças graduais entre seções; ▪ Maior dimensão menor que 100mm; ▪ Peso menor que 100g; ▪ Espessuras menores que 10mm; ▪ Montagens em uma única peça; ▪ Uma superfície plana para suporte; ▪ Geometrias não longas, mais simétricas;
Detalhes permitidos:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Furos com ângulos; ▪ Furos hexagonais, quadrados, cegos e de fundo quadrado; ▪ Nervuras; ▪ Superfícies onduladas; ▪ Protuberâncias; ▪ Roscas internas e externas; ▪ Furos coincidentes em formato "D"; ▪ Números de série e identificação;

Como comentado anteriormente, as orientações apresentadas na Tabela 8 são genéricas e existem muitos outros aspectos a serem abordados durante o desenvolvimento de componentes e ferramentas para a sua produção. Aspectos como a precisão dimensional dos moldes a fim de permitir a fabricação de componentes com pequena variação dimensional, são acompanhados de cuidados como a escolha de canais de injeção, pontos de alimentação, localização de pinos extratores e planos de abertura (partição) apropriados.

Analisando mais especificamente as variações dimensionais permitidas de acordo com os padrões internacionais, encontram-se na literatura desvios de $\pm 0,3\%$ na dimensão alvo (Kulkarni, 1996). Entretanto, David (1998) afirma que os pequenos desvios dimensionais são pouco realísticos para a indústria e que mesmo que sejam alcançados, estes só valem para algumas das dimensões de um componente, para a maioria das aplicações onde a PIM é utilizada.

3.5 - Limitações

A moldagem de pós compete com muitas outras tecnologias como a fundição, usinagem e a metalurgia do pó. Dependendo da complexidade da geometria, das propriedades requeridas e custos envolvidos, as tecnologias anteriormente citadas podem sobrepor-se em resultados satisfatoriamente parecidos. O gráfico da Figura 13 apresenta uma relação de combinação entre a produção e complexidade geométrica delimitando, aproximadamente, a atuação dos processos de fabricação.

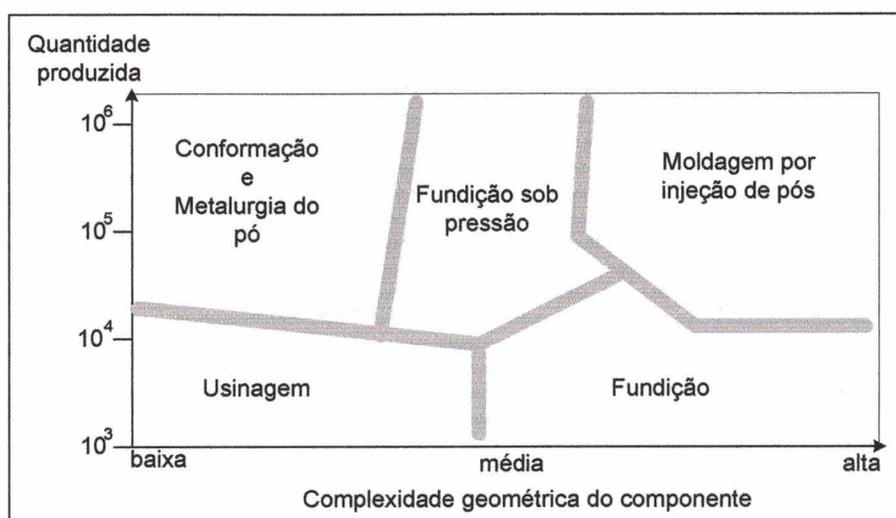


Figura 13: Preferência no uso de processos de fabricação na relação quantidade versus complexidade (adaptado de German & Bose, 1997).

Além dos custos de infraestrutura que envolve a fabricação de componentes PIM, existe a problemática do conhecimento técnico no assunto que deve ser suprida para o sucesso do investimento. Outra limitação é relativa principalmente à etapa de extração do ligante, que fica restrita a espessuras máximas de 5mm, pois o tempo requerido é economicamente inviável, além das dificuldades técnicas envolvidas. Conforme David (1998) a tecnologia PIM é restrita a peças pequenas, complexas e de alto valor agregado.

3.6 - Considerações Finais para a Moldagem de Pós

A moldagem de pós por injeção é um processo que envolve muitas variáveis interdependentes, sendo que o ajuste de parâmetros é uma tarefa árdua e complexa. Entretanto, para reduzir a influência das muitas variáveis do processo no desenvolvimento dos estudos de caso, foram tomadas as seguintes recomendações obtidas na revisão bibliográfica:

- As geometrias utilizadas nos estudos de caso deverão ter baixa complexidade, serem planas, com espessura de parede constante, canal de injeção largo e ângulos de saída entre 1° e 2°;
- Nestas geometrias, será necessário o emprego de um sistema de extração, no caso, pinos extratores.

4 - Estudos de Caso

Visando alcançar os objetivos propostos neste trabalho foram desenvolvidos um estudos de caso preliminar, de caráter exploratório, e dois estudos de caso adicionais planejados com base nos resultados e informações obtidas do estudo anterior. Os objetivos específicos e uma descrição de cada estudo de caso são apresentados a seguir.

4.1 - Estudo de Caso 1 – Avaliação Preliminar

4.1.1 - Objetivos

Neste estudo preliminar, em caráter exploratório, foi averiguada a moldagem de uma mistura de pó de aço 316L comercial em uma cavidade fabricada pelo processo de estereolitografia, utilizando procedimentos empregados na moldagem de termoplásticos em cavidades obtidas por estereolitografia. Os objetivos deste experimento foram:

- ⇒ Identificar as principais dificuldades do processo;
- ⇒ Avaliar o uso de pinos extratores;
- ⇒ Determinar parâmetros do processo de moldagem para a combinação de material e molde propostos.

4.1.2 - Projeto, Fabricação e Ajuste dos Insertos

Para iniciar os estudos identificando as eventuais dificuldades, foi realizado o projeto e a fabricação de uma cavidade de geometria simples, ou seja, de baixa complexidade. Baseando-se nas recomendações de Potsch et alii (1996) e Menges et alii (1993) foi selecionada a geometria de espessura constante igual a 2,5mm e ângulo

de saída igual a $1,5^\circ$, representada em CAD na Figura 14, por apresentar poucas dificuldades para moldagem e extração em moldes convencionais.

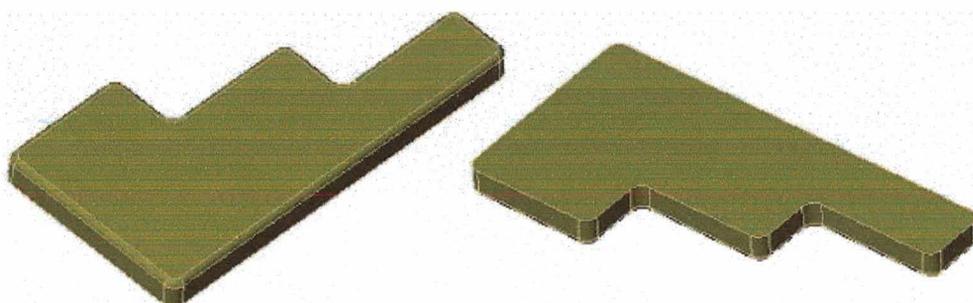


Figura 14: Imagens do modelo CAD da geometria projetada.

Os dois insertos foram projetados e modelados no software de CAD Solidworks2000[®] (Solidworks Corporation) em forma de casca com espessura de 2mm (Figura 15).

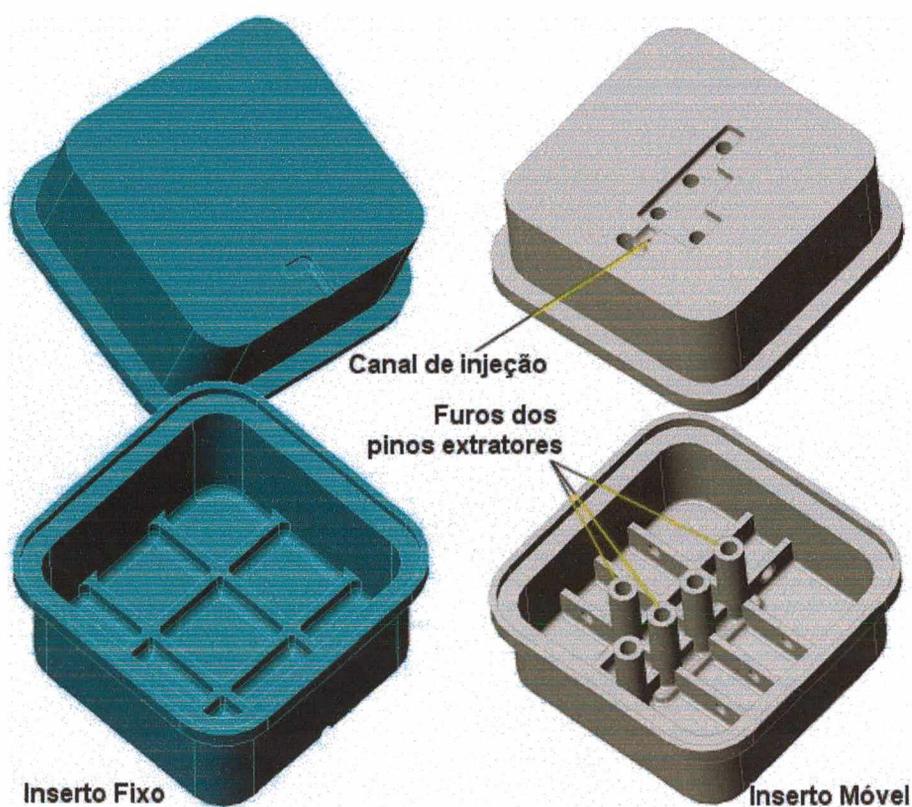


Figura 15: Imagens dos modelos CAD dos insertos gerados para o estudo de caso 1.

Os insertos SL foram projetados para serem devidamente montados em um porta-molde modular de duas placas, que é utilizado nos trabalhos científicos realizados no núcleo PAT/PRONEX (Processos e Produtos de Alta Tecnologia). Por isso algumas restrições foram impostas, como a localização dos pinos extratores e canal de injeção.

A fabricação dos insertos foi realizada na máquina de estereolitografia 3D Systems SLA 250/30A (pertencente ao PAT e instalada no laboratório CIMJECT), com o plano de abertura paralelo ao plano xy de fabricação de camadas. A resina utilizada para a fabricação dos insertos foi a resina DSM Somos 7110, que apresentou temperatura média de construção igual a 29⁰C e potência do laser igual a 16mW. Os parâmetros do processo de fabricação utilizados, referentes à resina SL, foram os valores padronizados e fornecidos pelo fabricante da resina. Devido à redução da potência e, conseqüentemente, do diâmetro do feixe do laser¹³, estes foram corrigidos no software de CAM MaestroTM Workstation R1.9.1 (3Dsystems Corporation) para garantir uma fabricação mais precisa dos insertos.

Após a confecção dos insertos na máquina de estereolitografia, foram executadas as etapas usuais de acabamento, com retirada do excesso de resina, limpeza em álcool isopropílico, remoção dos suportes e exposição durante uma hora em forno ultravioleta (potência de consumo do forno igual a 280W). Contudo, não foram realizadas operações de acabamento para redução do efeito-escada nas superfícies da cavidade, com o intuito de analisar o experimento com o mínimo de influência do operador.

As cascas dos insertos foram preenchidas (material de reforço) com a liga de ponto de fusão próximo a 72⁰C (50%Bi, 25%Pb, 12,5%Sn e 12,5%Cd em massa) apresentada anteriormente na Tabela 3. Pinos extratores foram posicionados para auxiliar na extração da peça e do canal de injeção. Entretanto, não foram utilizados

¹³ Potência ideal do laser varia entre 30 a 40mW. Cabeçotes laser de HeCd possuem perda de potência ao longo da vida útil que varia entre 2000 a 8000 horas dependendo do modelo.

tubos de cobre para auxiliar na refrigeração devido sua ineficiência durante a troca de calor já estudada e descrita em Ahrens et alii (TCT-2001, 2001). Os insertos foram ajustados, montados no porta-molde e posicionados na máquina injetora ARBURG ALLROUNDER 320S 50T, com unidade de injeção especial para a moldagem de misturas com pó ($\varnothing=25\text{mm}$), pertencente ao PAT/PRONEX (instalada no Laboratório de Materiais) conforme mostra a Figura 16.



Figura 16: Insertos montados no porta-molde e posicionados na máquina injetora.

4.1.3 - Etapa de Moldagem

Para o processo de moldagem o material escolhido para a moldagem foi o aço inox 316L devido a sua importância comercial nas mais variadas aplicações industriais (German, 1997). A composição da mistura (ligante+316L) e suas características são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Composição da mistura utilizada.¹⁴

316L HMB1-91.3 Batelada 260698-1 IR 000/98 (26/06/1998) $\rho=4,73\text{g/cm}^3$				
Componente	316 L	Parafina	Polipropileno	Acetato de Vinil Etila
% em massa	91,50	3,47	3,36	1,40

¹⁴ Segundo composição fornecida pela empresa Steelinject (Grupo Lupatech S.A.).

O procedimento de moldagem iniciou com o ajuste dos parâmetros de injeção. Estes, por sua vez, foram determinados de maneira a obter maior segurança, evitando uma ruptura prematura para os insertos SL (baixas pressões, força de fechamento, velocidade de injeção, temperatura de injeção, etc). Durante cada tentativa de moldagem os parâmetros foram ajustados até obter-se a moldagem de peças sem defeitos aparentes. O desmoldante utilizado para auxiliar na extração da peça foi um silicone comum, aplicado em aerosol (produto “Silicone” da marca Sil Trade Indústria e Comércio. Composição: polidimetilsiloxano e propelente butano, estável em temperaturas entre -42°C e 215°C). Entre cada ciclo de moldagem a cavidade foi resfriada com o uso de um jato de ar comprimido.

4.1.4 - Resultados e Discussão do Estudo de Caso 1

Em relação ao objetivo do estudo de caso 1 de identificar as principais dificuldades do processo, a tentativa de preencher a cavidade durante a moldagem e ajuste dos parâmetros provocou o rompimento dos insertos (aparecimento de rachaduras superficiais). No ciclo em que ocorreu o rompimento dos insertos, a pressão de injeção era demasiadamente elevada (800bar). Entretanto, prosseguiu-se com o experimento reduzindo a pressão de injeção, a fim de determinar as condições do processo.

Ao longo das tentativas de ajuste dos parâmetros do processo, o material injetado aderiu às paredes de molde, impossibilitando extrair peças com qualidade (Figura 17). Uma das hipóteses avaliadas foi a de que o silicone utilizado como desmoldante não estaria auxiliando na extração. Após o abandono do uso do silicone as peças moldadas passaram a ser extraídas mais facilmente do molde, mas não de maneira satisfatória.

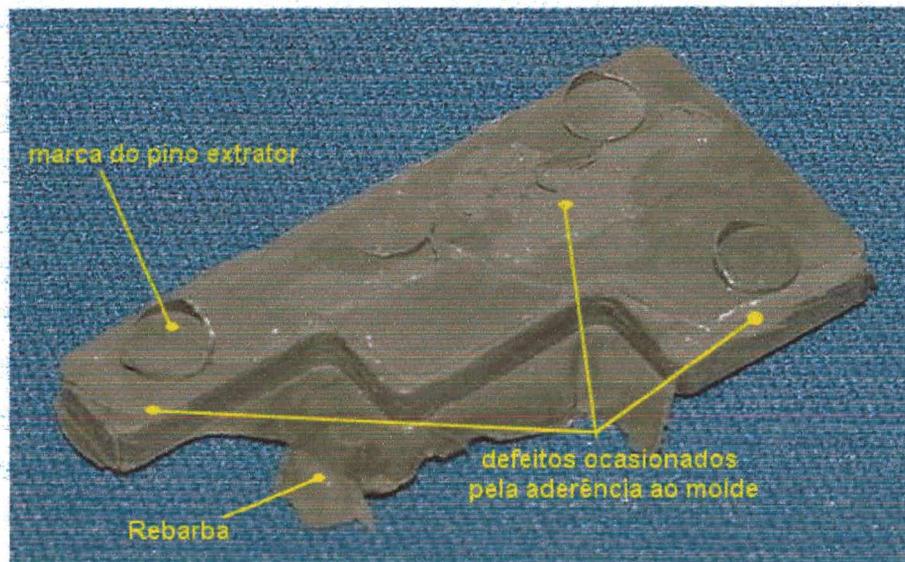


Figura 17: Defeitos ocasionados pela aderência do material ao molde com o uso do desmoldante silicone. Também indicados: rebarba e marcas de pinos extratores.

Um problema verificado foi o incorreto ajuste dos pinos extratores que serviram de concentradores de tensão por estarem muito próximos da parede da cavidade e possuírem folga excessiva, permitindo a entrada de material injetado entre o pino e a guia. O ajuste de altura dos pinos foi realizado de forma incorreta e ocasionou o aparecimento de marcas nas peças além de favorecer a sua quebra durante a extração.

Com a finalização da vida útil dos insertos (rachaduras e quebra), após a moldagem de 20 peças, chegou-se aos parâmetros de injeção da Tabela 10, que possibilitaram a obtenção de peças mais facilmente, com um tempo de resfriamento igual à 40 segundos.

Tabela 10: Parâmetros de injeção com maior sucesso de obtenção de peças.

Temperatura		Fase de injeção		Fase de recalque	
Zona 01:	160°C	Curso de Dosagem:	23mm	Tempo de Atraso:	0,1s
Zona 02:	170°C	Velocidade de Injeção:	30mm/s	Primeira Pressão:	50bar
Zona 03:	180°C	Pressão de Injeção:	450bar	Tempo de Atraso:	0,1s
Zona 04:	185°C	Ponto de Comutação:	5,5mm	Segunda Pressão:	50bar
Zona 05 (Bico):	190°C				

4.2 - Estudo de Caso 2 – Geometria Simples

4.2.1 - Objetivos

Para a continuação dos experimentos, optou-se pela realização de um segundo semelhante ao experimento 1, baseando-se nos resultados obtidos nele. Visando obter maior sucesso no experimento 2, diferenciações foram realizadas no projeto dos insertos e na moldagem das peças:

- Redimensionamento da cavidade para evitar concentrações de tensões próximas aos furos dos pinos extratores;
- Uso de um sistema desmoldante alternativo ao silicone;

Tais modificações foram necessárias para serem estabelecidos os objetivos para o estudo de caso 2, que visava a continuação da moldagem da mistura de aço inox 316L, assim como no estudo de caso 1. Portanto, os objetivos do estudo foram:

- ⇒ Avaliar as alterações dimensionais realizadas e o uso de um sistema alternativo para desmoldagem das peças;
- ⇒ Avaliar a temperatura superficial do inserto, entre os ciclos de moldagem, com o uso de um termômetro infravermelho (radiômetro);
- ⇒ Identificar os parâmetros do processo de moldagem com maior influência no sucesso para a obtenção de peças verdes;
- ⇒ Analisar as dimensões da cavidade e peças antes e após a sinterização, calculando e comparando os coeficientes de contração das peças durante o processo;
- ⇒ Analisar possíveis defeitos nas peças injetadas, decorrentes do processo de moldagem, após as etapas de extração do ligante e sinterização.

4.2.2 - Projeto, Fabricação e Ajuste dos Insertos

A geometria de estudo e o molde foram novamente projetados no sistema CAD Solidworks2000[®] (Solidworks Corporation) não tendo sido considerado o percentual de contração do material após a injeção, extração do ligante e sinterização. O sistema de alimentação foi dimensionado para que não ocorressem problemas, sendo que o ponto de injeção é direto, evitando problemas do tipo esguichamento do fluxo de material injetado. Para facilitar a extração da peça do molde, um ângulo de saída de 1,5°, foi utilizado nas superfícies perpendiculares ao plano de abertura do molde. Além disso, 5 pinos de extração de 4mm de diâmetro foram utilizados: 4 pinos distribuídos sobre a superfície da peça e 1 para o canal de injeção. A posição dos pinos foi determinada pela distribuição dos mesmos no molde, pois o molde modular utilizado possui posições fixas para os insertos e pinos extratores, cabendo então ao projetista posicionar a peça no inserto como melhor lhe convém. Com relação às dimensões usadas no estudo anterior, a peça foi projetada com largura maior, para que os pinos extratores ficassem posicionados com um espaçamento maior entre as superfícies perpendiculares ao plano de abertura do molde. Esta alternativa teve por objetivo diminuir a concentração de tensão, para os furos dos pinos extratores, que foi verificada no estudo de caso 1 (Figura 18). A geometria 3D da peça pode ser visualizada na Figura 19 e os insertos na Figura 20.

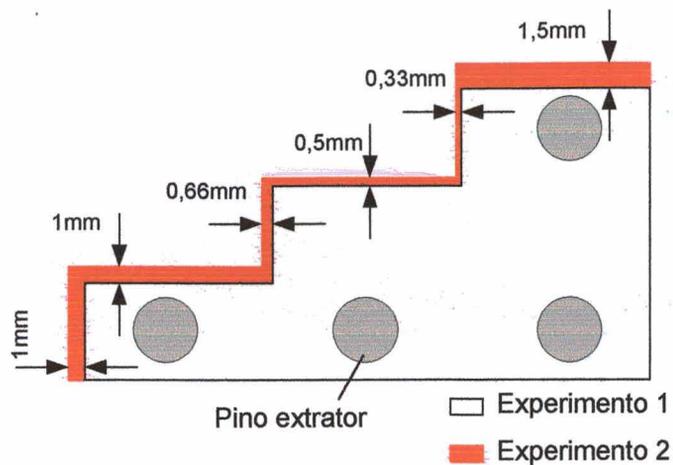


Figura 18: Diferenças entre as geometrias do primeiro e segundo estudos de caso.



Figura 19: Imagens do modelo CAD da geometria alterada juntamente como canal de injeção.

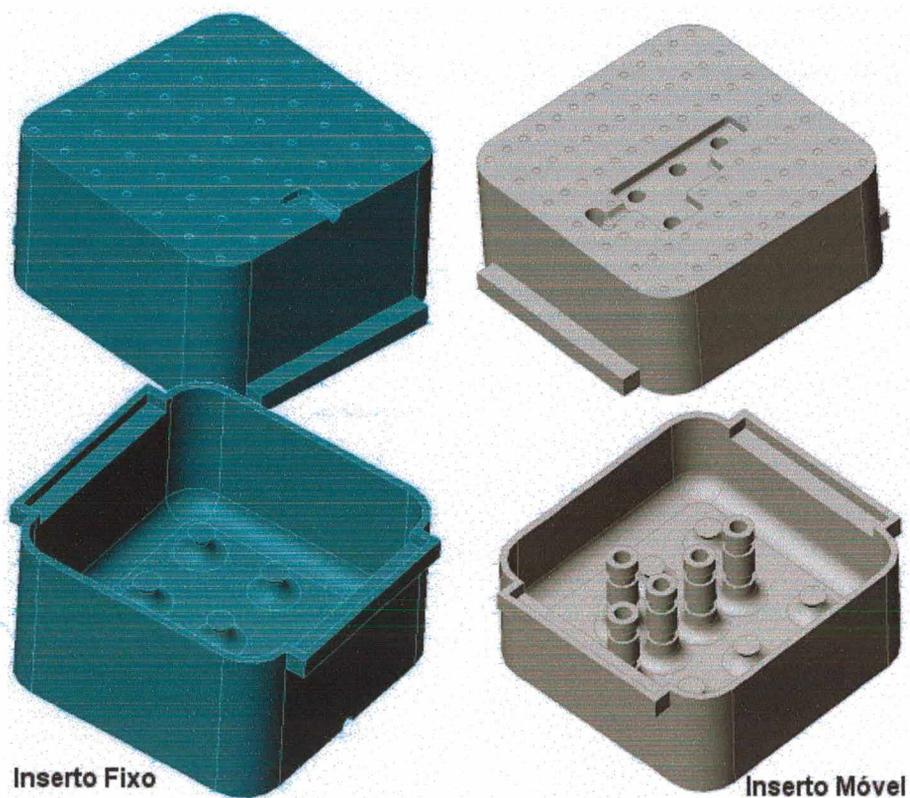


Figura 20: Modelos CAD da geometria dos insertos.

Os insertos podem ser considerados de formato sólido como explicado no item 2.3.4, pois apresentam uma espessa de parede, maior que 4,75mm, atrás das superfícies da geometria da cavidade (Figura 21). Esta abordagem teve o objetivo de preservar o inserto livre de deformações que possam ocorrer durante a etapa de preenchimento da parte traseira. Por motivos econômicos o inserto não foi projetado para ser completamente sólido; no entanto, para garantir uma melhor interação mecânica entre o material de preenchimento e o molde, pinos foram incorporados na superfície posterior do inserto (detalhes podem ser observados no inserto fixo mostrado na Figura 21).

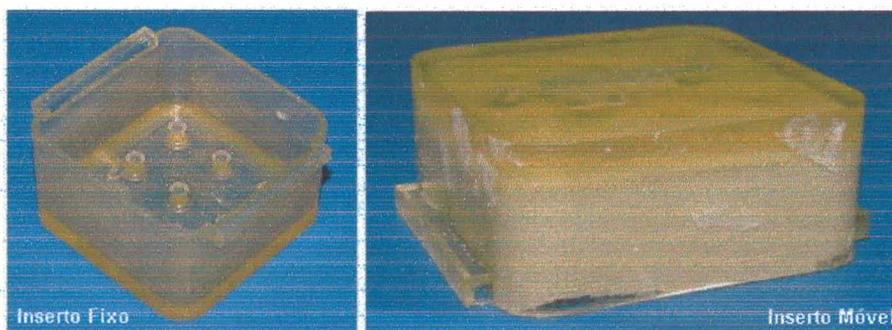


Figura 21: Inserto fixo pronto para ser preenchido e inserto móvel em processo de preenchimento: nota-se a grande espessura utilizada nos insertos.

No sentido de minimizar a possibilidade de formação de rebarbas, as superfícies de abertura foram construídas com 150 μ m a mais de espessura para posteriormente ser retirada na etapa de pós-processamento do inserto. Com o intuito de orientar o operador na retirada de apenas 150 μ m, pequenos furos, de mesma profundidade, foram introduzidos nesta “camada extra” ao longo de toda a superfície. Os pequenos furos podem ser visualizados na Figura 20 e na Figura 21. Este procedimento de planificar os planos de abertura do inserto de estereolitografia, baseia-se em trabalho realizado por Male (1996), onde a planicidade de peças produzidas por estereolitografia é objeto de estudo e Brown et alii (2000), onde os planos de partição em insertos de

estereolitografia são analisados para estudar o aparecimento ou não de rebarbas. Por tratar-se de um molde com um único plano de partição, sem a presença de machos, esta técnica da camada extra pode ser aplicada sem dificuldades, no entanto peças com geometrias mais complexas podem inviabilizar a etapa de lixamento de vários planos.

Os modelos 3D dos insertos foram gerados no formato STL com ajustes, no sistema Solidworks, de “*Total Quality Deviation*” igual a 0,015mm e “*Detail Quality Angle Tolerance*” ajustado para 7° conforme recomendações apontadas em Ahrens et alii (COBEF, 2001).

O sistema CAM utilizado para preparar o arquivo de comando numérico para a fabricação dos insertos na máquina de estereolitografia, neste estudo de caso, foi o *3D Lightyear 1.1 Advanced User* (3Dsystems Corporation). As peças foram posicionadas com planos de abertura paralelos ao plano xy de construção da máquina. Nenhuma alteração nos parâmetros de construção dos insertos foi realizada, além da alteração do diâmetro do feixe do laser como no estudo de caso 1, sendo que o estilo de construção utilizado foi o EXACT, fornecido pela DSM Somos¹⁵, para a resina DSM Somos 7110. A espessura de camadas utilizada na construção dos insertos foi de 150µm por ser o valor possível de ser utilizado no sistema de regulagem de camadas por faca em máquinas modelo SLA250/30A.

Os insertos foram construídos com a temperatura da resina DSM Somos 7110 à 29°C e potência média de 16mW do feixe gaussiano do laser de hélio-cádmio. Após a construção, foram retirados os suportes dos insertos, embebidos em álcool isopropílico para retirar o excesso de resina e limpos com papel absorvente. Na seqüência os insertos foram colocados no forno de luz ultravioleta pelo tempo de 90 minutos (30 minutos a mais do que o usual devido à espessura do inserto).

¹⁵ Parâmetros obtidos em <http://www.dsmsomos.com> (Maio de 2001).

Diferentemente do estudo de caso 1, o material utilizado para preenchimento foi massa plástica com carga de pó de ferro. A escolha deste material foi baseada nos critérios custo e deformação provocada ao inserto na etapa de preenchimento em relação à liga utilizada anteriormente. A massa plástica utilizada foi a da marca Anjo Química do Brasil que é constituída de resina poliéster com cargas e aditivos não especificados pelo fabricante. Nesse caso, a massa plástica serve apenas como material de reforço do inserto. O pó de ferro adicionado serve para diminuir a contração do material, depois da aplicação do catalisador, durante o endurecimento da mistura.

Para não ocasionar contração excessiva da parte de trás do molde, a massa plástica foi aplicada em camadas seqüenciais de aproximadamente 5mm, intercalando com o endurecimento completo da camada anterior. A Figura 22 mostra etapas do preenchimento de um dos insertos de estereolitografia e seu ajuste no porta-molde.



Figura 22: Etapa de preenchimento e ajuste no porta-molde.

Após o preenchimento dos insertos foi feita a planificação da superfície de abertura. Nesta etapa uma lixa foi colocada sobre uma superfície rígida e plana e os insertos foram colocados com as superfícies de abertura em contato com a lixa. O operador deslizou os insertos com movimentos de rotação e translação sobre a lixa

preocupando-se em deixar apenas a massa do inserto fazer força sobre a lixa, evitando assim o desgaste preferencial em algum lado do inserto (Figura 23). Inicialmente utilizou-se lixa de 300mesh de granulometria, ocorrendo uma progressão até 600mesh com a utilização de água como lubrificante (com o uso de água um melhor acabamento superficial é alcançado). Constantemente, o operador monitorou o “desaparecimento” dos furos incorporados nestas superfícies, sabendo que a dimensão correta é alcançada quando estes desaparecem deixando apenas marcas suaves na superfície.

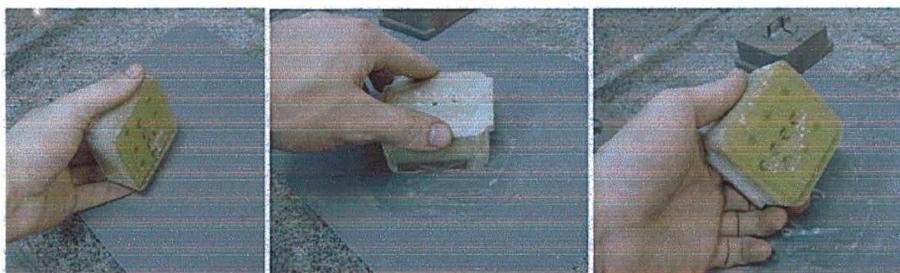


Figura 23: Seqüência do lixamento do plano de partição do inserto móvel.

As superfícies da cavidade pertencentes ao inserto móvel não passaram por operações de acabamento. Esse procedimento foi executado com o objetivo de avaliar, para esta geometria, o uso de insertos SL sem acabamento. Porém, na face da cavidade do inserto fixo foi realizado o lixamento durante a etapa de planificação do plano de abertura.

Após a montagem dos insertos no porta-molde foi realizada a etapa de ajuste dos pinos extratores. Inicialmente, os pinos foram cortados para possibilitar o fechamento do molde e a colocação do mesmo na máquina injetora. Após serem feitos os ajustes de abertura, fechamento e avanço da placa extratora, os pinos foram cuidadosamente lixados até que a ficassem perfeitamente paralelos à superfície da cavidade após o fechamento do molde.

4.2.3 - Etapa de Moldagem

Ao ser iniciado o processo de moldagem por injeção, procurou-se evitar a utilização de parâmetros não muito recomendáveis como, por exemplo, elevadas velocidades e pressões de injeção. A partir dos valores de referência utilizados no estudo de caso 1, foram variados diversos parâmetros, visando obter a moldagem de peças. A pressão de recalque não foi aplicada na fase inicial de ajuste dos parâmetros.

Entre cada ciclo a cavidade foi inspecionada e aplicada uma nova camada de desmoldante PVA (Poli vinil álcool) líquido com o auxílio de papel absorvente. O uso deste tipo de desmoldante é comum para desmoldagem de termoplásticos.

4.2.4 - Extração do Ligante e Sinterização

A extração do ligante e a sinterização de dezenove peças (as melhores peças obtidas) foram realizadas na divisão Steelinject do Grupo Empresarial Lupatech, sendo que as peças foram inseridas na linha de produção da empresa. As etapas de extração do ligante e sinterização do componente estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11: Descrição das etapas de extração e sinterização.

Fase		Parâmetros
Extração do Ligante (Tempo do ciclo 48 horas)	Extração Química	⇒ Vapor de hexano por 2 horas; ⇒ Imersão em hexano por 8 horas;
	Extração Térmica	⇒ Atmosfera de H ₂ + Ar; ⇒ Temperatura final igual á 950°C;
Sinterização (Tempo total do ciclo 20 horas)		⇒ Forno a vácuo, atmosfera de H ₂ + Ar; ⇒ 3 horas à temperatura de 1300°C;

4.2.5 - Métodos Utilizados para a Análise dos Resultados

Para o acompanhamento da temperatura da superfície dos insertos, a cada cinco ciclos, um termômetro infravermelho (Omegascope OS71, Omega, do LABTERMO/EMC) com emissividade ajustada para 0,85, era direcionado para o molde e a temperatura era mensurada.

Com relação ao controle dimensional, este foi realizado com medições do inserto ao final dos ajustes (antes da moldagem) e após a moldagem. As peças também foram mensuradas após a moldagem e após a sinterização com um paquímetro (marca Mitutoyo, modelo Digimatic Caliper CD-6"). A Figura 24 apresenta detalhadamente as dimensões analisadas, nas peças e cavidade dos insertos, sendo que os valores, em milímetros, correspondem aos projetados em CAD para os insertos.

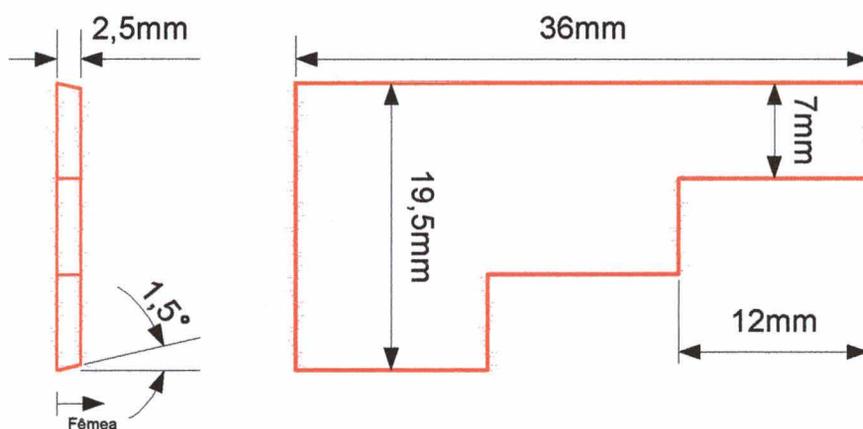


Figura 24: Dimensões analisadas na cavidade, peças “verdes” e sinterizadas.

Para a averiguação de defeitos internos foram realizadas análises de seções transversais de algumas das peças sinterizadas, tomadas aleatoriamente (seis peças que correspondem à 32% das 19 peças sinterizadas). Após o embutimento em baquelite, lixamento até lixa de 600mesh e polimento das amostras com alumina de $0,3\mu\text{m}$, estas foram atacadas com uma mistura de reagentes denominada VSP-B (100ml de H_2O , 100ml de HCl, 50ml de HNO_3 e 0,2ml de V2-A) e analisadas no microscópio ótico do Laboratório de Conformação (LABCONF), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

4.2.6 - Resultados e Discussão do Estudo de Caso 2

As modificações de projeto do inserto, estabelecidas a partir dos problemas ocorridos no primeiro estudo, foram úteis, pois não foi observado o mesmo problema de concentração de tensão ocorrido nos pinos extratores do estudo de caso 1. A dificuldade, no entanto, continuou sendo a vedação dos pinos extratores, pois o material injetado, devido a sua baixa fluidez, continuou a penetrar na folga entre os pinos e os furos guias, aumentando os esforços na estrutura da casca SL quando executado o movimento de avanço da placa extratora na etapa de ejeção da peça (Figura 25).

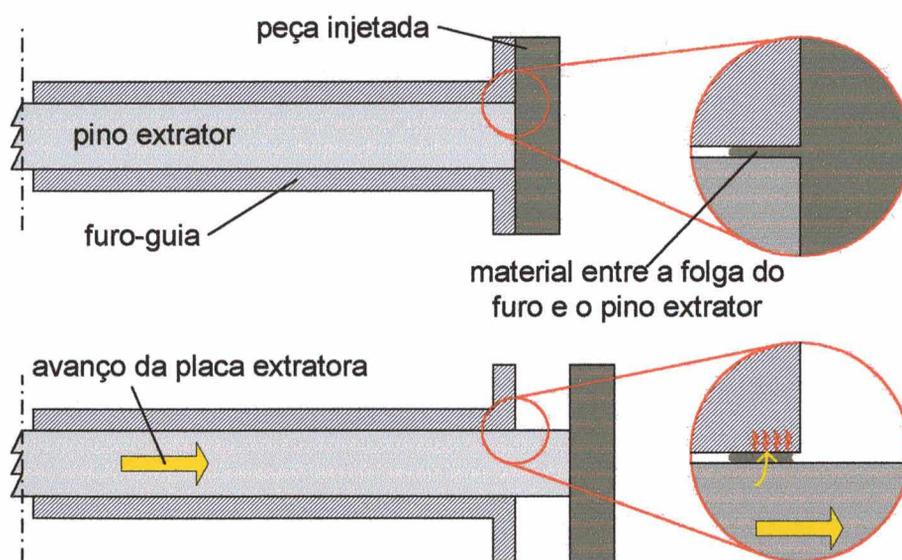


Figura 25: Esforço, durante a extração, provocado pelo material que penetra na folga do furo do pino extrator.

Apesar do ajuste dos pinos ter sido realizado com maior cautela neste experimento, com o passar dos ciclos e a acomodação dos insertos no porta-molde, os pinos ocasionaram novamente a inclusão de defeitos que podem ser visualizados na Figura 26.

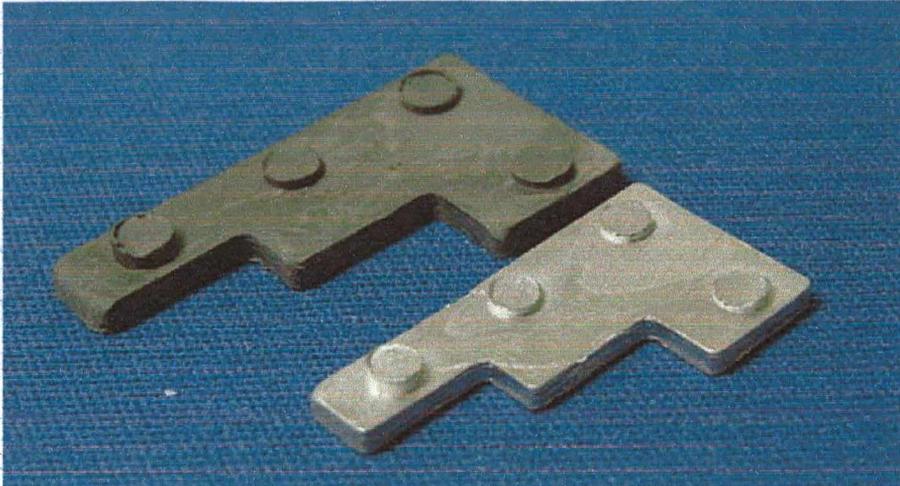


Figura 26: Ressaltos provocados pelos pinos extratores. Peças verde (escura) e sinterizada (prateada).

O uso de PVA (álcool polivinílico) como desmoldante alternativo ao Silicone foi eficiente para a quantidade de peças moldadas (baixa produção). Devido ao PVA ser aplicado em temperatura ambiente e possuir características desmoldantes satisfatórias, este pode ser utilizado no processo. Porém, a dificuldade de aplicar uma camada uniforme na cavidade prejudicou, em parte, a dinâmica do ciclo de moldagem.

O uso do termômetro infravermelho para averiguar a temperatura superficial do molde ao ser aberto não foi de grande valia. O objetivo do uso do termômetro era medir a temperatura da superfície da cavidade em determinado ponto. Entretanto, o modelo utilizado (único disponível) possui uma área de medição mínima equivalente a um círculo de diâmetro igual a 1 polegada, que corresponde a uma área maior que a da cavidade, portanto, o termômetro mensura uma temperatura média do inserto inteiro. O valor de pico apresentado durante as medições chegou a 36°C (Temperatura ambiente igual a 22°C).

Nos ciclos iniciais a temperatura da massa fundida era relativamente baixa ao penetrar no interior da cavidade, provocando o fenômeno de esguichamento. Para

evitar este efeito, a temperatura de injeção foi aumentada em 5°C resultando num preenchimento maior, porém ainda incompleto. A variação da pressão de injeção, dentro de limites de segurança (menor que 500bar), não alterou o preenchimento da cavidade. Como o aumento da temperatura poderia provocar a segregação do material, partiu-se então para o aumento da velocidade de injeção. Com isto foi possível preencher por completo a cavidade, porém sem ocorrer a reprodutibilidade completa da forma geométrica, em particular nas quinas e nos cantos. Alteraram-se então os valores de pressão de recalque, que passou de 50 para 100bar, ocorrendo a moldagem completa da peça no 36º ciclo. Porém, o inserto móvel sofreu danos, com rachaduras geradas a partir dos furos dos pinos-extratores. A pressão de recalque foi reduzida para 65bar e continuou-se a obter bons resultados passando de mais de 100 peças injetadas. O processo foi interrompido, pois havia pouca mistura disponível e o molde estava começando a apresentar significativo crescimento das rachaduras da cavidade, o que refletia na superfície das peças.

A Tabela 12 sintetiza o parâmetros de injeção utilizados durante o experimento de moldagem, apresentando a evolução dos parâmetros. O primeiro ciclo corresponde aos valores do estudo de caso 1 pois foram utilizados como ponto de partida. Entre o segundo e trigésimo quinto ciclo os parâmetros foram ajustados até que no trigésimo sexto ciclo a primeira peça, livre de defeitos, foi obtida. Os demais ciclos apresentados na Tabela 12 representam variações importantes que foram realizadas até o final do experimento. Pode-se observar que a velocidade de injeção e o tempo de resfriamento foram os parâmetros mais modificados ao longo do experimento. A velocidade de injeção influenciou no preenchimento da cavidade e o tempo de resfriamento na resistência da peça para ser extraída do inserto.

Tabela 12: Evolução dos parâmetros de injeção ao longo do experimento.

Ciclos de injeção	Temperatura de injeção	Dosagem	Velocidade de Injeção	Pressão de Injeção	Comutação:	Tempo de atraso	Primeira Pressão	Tempo de atraso	Segunda Pressão	Tempo de resfriamento	Temperatura do molde
	[°C]	[mm] ¹⁶	[mm/s]	[bar]	[mm]	[s]	[bar]	[s]	[bar]	[s]	[°C]
1º	190	23	30	450	5,5	0,1	50	0,1	50	40	36
2º ao 35º	200	20	30	450	3	0,1	50	0,1	50	35	36
36º	190	18	60	450	1,5	0,1	85	0,1	85	30	31
37º	190	18	150	500	1,7	1	65	1	65	25	38
47º	190	19	120	380	1,7	1	65	1	65	25	34
53º	190	19	110	375	1,7	1	65	1	65	30	38
Final	190	19	70	390	1,7	1	65	1	65	30	36

Com relação ao controle dimensional, a Tabela 13 apresenta as variações médias para cada uma das dimensões apresentadas anteriormente na Figura 24, item 4.2.5 (página 52). A média da variação dimensional linear das peças sinterizadas em relação às medidas do inserto após a moldagem apresentou valor igual a 21,56%, que corresponde, dentro das margens de erro de medição dos equipamentos utilizados, ao valor de peças fabricadas com o mesmo material, mas submetidas a moldagem em moldes metálicos convencionais, com processos iguais de extração do ligante e sinterização.

¹⁶ Multiplicado a área do cilindro com $\varnothing=25\text{mm}$ pelo curso é obtido o volume dosado. A máquina fornece estas duas opções para ajuste da dosagem: curso em [mm] ou volume em [cc].

Tabela 13: Médias e desvios padrão obtidos no estudo de caso 2.

Inserto após ajustes (n=6)¹⁷					
Dimensão CAD	2,5mm	7mm	12mm ¹⁸	19,5mm	36mm
Média	2,48	6,97	- - -	19,45	35,52
Desvio Padrão	0,035	0,038	- - -	0,041	0,37
% desvio dim. ¹⁹	0,80%	0,43%	- - -	0,26%	1,33%

Inserto após moldagem (n=6)					
Dimensão CAD	2,5mm	7mm	12mm	19,5mm	36mm
Média	2,13	6,76	- - -	19,28	35,95
Desvio Padrão	0,072	0,033	- - -	0,033	0,348
% desvio dim. ¹⁹	15,00%	3,43%	- - -	1,15%	0,13%

Peças após a moldagem (n=19)					
Dimensão CAD	2,5mm	7mm	12mm	19,5mm	36mm
Média	2,24	6,88	11,96	19,21	35,55
Desvio Padrão	0,026	0,043	0,055	0,053	0,037
% contração ²⁰	10,23%	1,68%	0,32%	1,49%	1,26%

Peças sinterizadas (n=19)					
Dimensão CAD	2,5mm	7mm	12mm	19,5mm	36mm
Média	1,75	5,61	9,82	15,84	29,33
Desvio Padrão	0,034	0,025	0,025	0,057	0,038
% contração ²⁰	30,06%	19,82%	18,13%	18,77%	18,52%
% contração ²¹	21,54%	20,44%	- - -	21,70%	22,56%

As medidas dos insertos após a moldagem revelaram alterações substanciais nas dimensões da cavidade. O inserto apresentou deformações permanentes, principalmente devido ao esforço provocado pelos pinos extratores que refletiram a variação dimensional maior, em relação ao modelo CAD, para a espessura da peça (2,5mm), indicado na Figura 25. Na Figura 27 é identificável a alteração na geometria da cavidade.

¹⁷ n corresponde ao tamanho da amostra.

¹⁸ Não possível de mensurar com paquímetros na cavidade.

¹⁹ Desvio dimensional percentual em relação ao modelo CAD.

²⁰ Contração percentual linear em relação ao modelo CAD.

²¹ Contração percentual linear em relação às dimensões do molde após a moldagem.

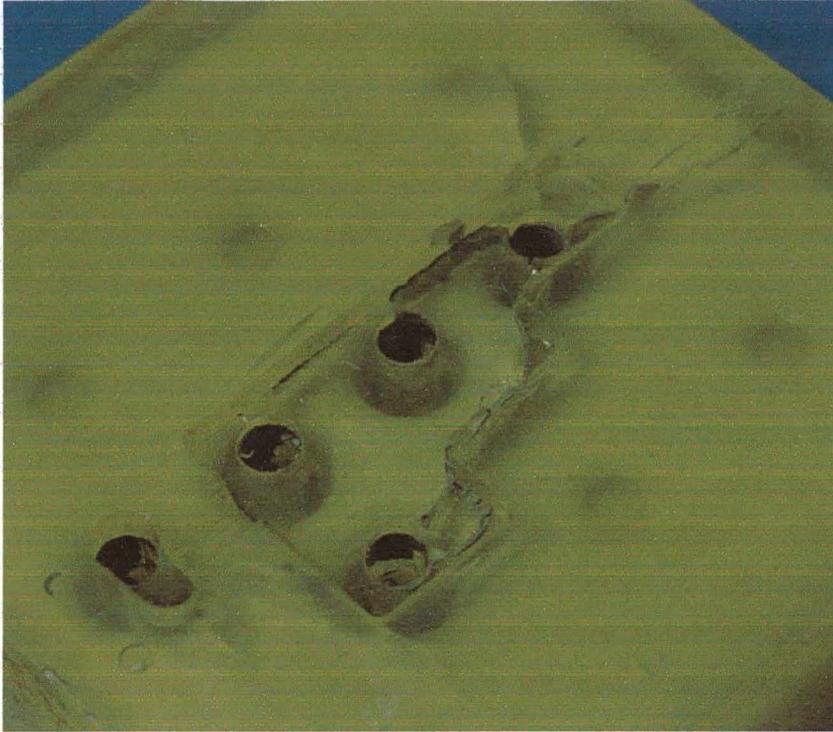


Figura 27: Fotografia do inserto móvel deformado.

Quanto à verificação de defeitos internos, das seis peças analisadas no microscópio nenhuma apresentou quaisquer anomalias que pudessem ter sido geradas durante o processo de moldagem, tais como espaços vazios, laminação ou rachaduras.

4.3 - Estudo de Caso 3 – Geometria Circular de Baixa complexidade

4.3.1 - Objetivos

Os resultados e experiência adquiridos com os estudos de caso 1 e 2 induziram a utilização de uma geometria mais complexa, sendo que os objetivos para o estudos de caso 3 foram:

- ⇒ Aplicar parâmetros de moldagem constantes, correlacionando com o controle dimensional e mássico das peças produzidas;
- ⇒ Acompanhar a temperatura dos insertos durante a moldagem.

4.3.2 - Descrição do Projeto, Fabricação e Ajuste dos Insertos

A geometria foi projetada com a forma de um anel, e a complexidade em relação a geometria anterior é destacada pelo encontro de duas frentes de fluxo durante a moldagem. Após ajustes da geometria (ângulo de saída igual a 1°) e do canal de alimentação, as peças foram aumentadas em escala no fator de 21,5%. Este fator corresponde ao valor de contração obtidos com os resultados do estudo de caso 2, sendo que o objetivo é que as peças sinterizadas obtenham as dimensões estabelecidas em CAD (dimensões “alvo”). A Figura 28 apresenta a geometria didática utilizada neste estudo.



Figura 28: Geometria estudada no estudo de caso 3.

Os insertos foram projetados para serem construídos em forma de casca com espessura uniforme de 2mm. Nervuras perforadas foram introduzidas na parte posterior dos insertos proporcionando maior rigidez e melhor fixação ao material de preenchimento. Quatro pinos extratores foram posicionados para auxiliar na extração da peça, além de um pino extra para garantir a extração do canal de injeção. Assim como no estudo de caso 1, optou-se pelo procedimento de construir os insertos com uma camada ($0,150\mu\text{m}$) extra no plano de partição, a ser retirada na etapa de acabamento quando então é feita a planificação do plano de abertura. Na Figura 29 são apresentadas imagens CAD dos insertos projetados.

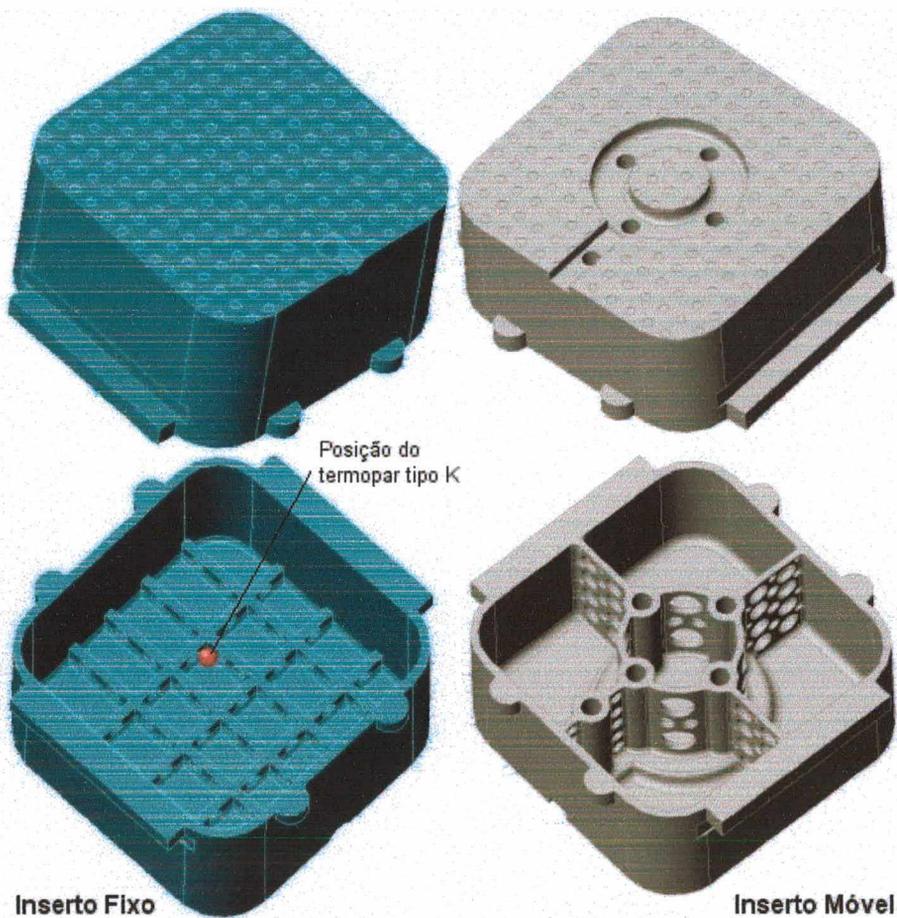


Figura 29: Modelos CAD dos insertos.

Novamente os insertos foram construídos com a resina DSM Somos 7110 com os mesmos parâmetros de construção do inserto anterior. Na etapa de acabamento, os insertos foram expostos a 1 hora no forno UV.

Com exceção à etapa de lixamento para a planificação do plano de abertura, explicada com detalhes no estudo de caso 2, nenhum outro tipo de acabamento foi executado na cavidade.

Um termopar de sacrifício do tipo K foi posicionado no inserto fixo para acompanhamento posterior da temperatura do inserto, indicado na Figura 29. O posicionamento da ponta do termopar foi realizado com um furo feito na casca SL com uma mini-fresa, estimando-se que a sua distância em relação à superfície da cavidade permaneceu próxima à 0,5mm.

O material de preenchimento utilizado foi o sistema Vantico RP4036 Resin & RP1500 Hardener – Heat Resintat Casting System²². A resina, baseada em epoxilato, possui carga de pó de alumínio e baixo coeficiente de contração. A maior vantagem deste material de preenchimento é a fácil aplicação e fluidez, que proporciona um ótimo preenchimento do inserto. Como desvantagem pode ser citado o tempo de cura de cerca de 24 horas necessário para o endurecimento da resina. A Figura 30 apresenta uma imagem com os insertos, já preenchidos, prontos para serem ajustados e posicionados no porta-molde.

²² Propriedades podem ser obtidas em <http://www.vantico.com>

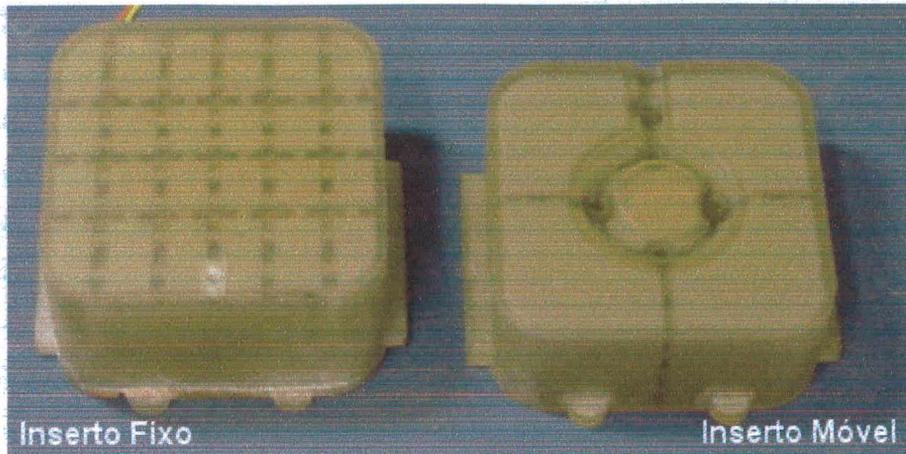


Figura 30: Insertos preenchidos e acabados.

Depois de curada a resina de preenchimento, os insertos foram posicionados e ajustados no porta-molde para serem montados na máquina injetora. A Figura 31 apresenta os insertos montados no porta-molde já com os pinos extratores posicionados e ajustados.



Figura 31: Molde aberto com os insertos instalados.

4.3.3 - Descrição do Processo de Moldagem

A mistura utilizada para a moldagem possuía a mesma composição da mistura utilizada nos estudos anteriores (Tabela 9), com a diferenciação de ser nova.

O ajuste dos parâmetros para a moldagem começou com os mesmos parâmetros finais de injeção do estudo de caso 2, com exceção da etapa de recalque que foi reduzida para 25bar (mínimo valor permitido pelo controle numérico da máquina injetora), pressão de injeção para 250bar, dosagem de material para 10mm de curso do fuso e ponto de comutação (quando é aplicada a pressão de recalque) em 0,5mm. Gradativamente os valores foram alterados para que fosse possível moldar e extrair peças sem defeitos.

Nos ciclos iniciais foram aplicadas camadas de PVA para ajudar na extração da peça. Depois da 10ª peça obtida não foi utilizado nenhum desmoldante na cavidade. Apenas estopa foi utilizada para auxiliar na limpeza da cavidade quando os parâmetros de injeção ocasionavam a aderência do material nas paredes da cavidade.

Para ajudar no resfriamento da cavidade, jatos de ar-comprimido foram utilizados entre os ciclos de moldagem.

4.3.4 - Operação de Extração do Ligante e Sinterização

Assim como no estudo de caso 2, as operações de extração do ligante e sinterização das peças foram realizadas na empresa Steelinject, onde 30 peças foram inseridas na linha de produção. A única diferença em relação aos dados das etapas apresentadas na Tabela 11 foi a temperatura de sinterização que foi realizada à 1350°C durante 3 horas, ao invés dos 1300°C utilizados anteriormente.

4.3.5 - Métodos Utilizados para a Análise dos Resultados

Para o acompanhamento dimensional do inserto móvel e de peças, após a moldagem e sinterização, utilizou-se um paquímetro (marca Mitutoyo, modelo Digimatic Caliper CD-6”), sendo que as dimensões analisadas são apresentadas na Figura 32.

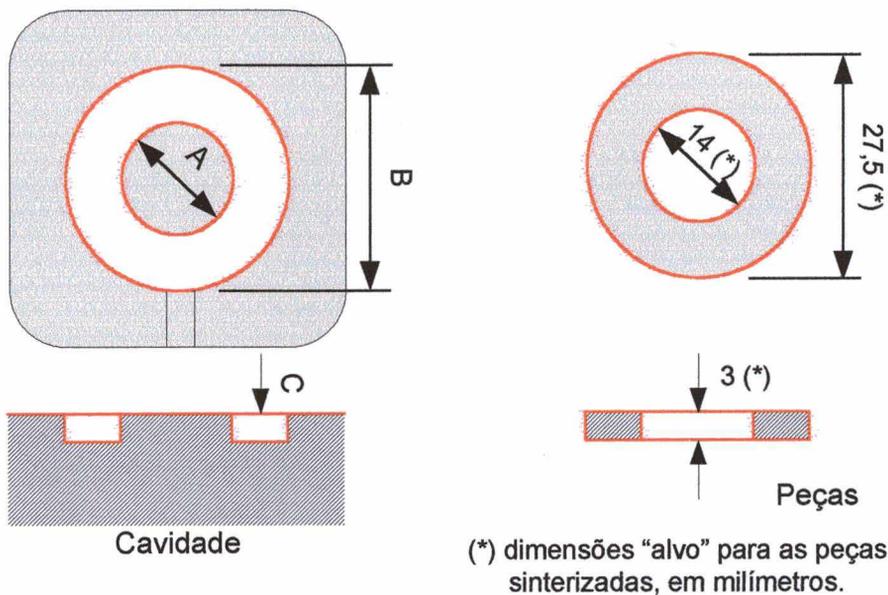


Figura 32: Dimensões analisadas na peça e cavidade.

As peças escolhidas para a medição foram as 20 peças produzidas entre o 44° e o 64° ciclos (ciclos com parâmetros fixos) e 10 peças escolhidas aleatoriamente entre os ciclos anteriores (ajustes). Além do acompanhamento das dimensões, as massas das peças foram determinadas com uma balança (marca Mettler Toledo – PG5002-S DeltaRange, do Laboratório de Materiais, Depto. de Eng. Mecânica – UFSC).

O acompanhamento da temperatura, durante os ciclos de moldagem, foi realizado com um sistema de aquisição de dados conectado ao termopar posicionado posteriormente à casca do inserto fixo. O sistema de aquisição de dados Picolog, modelo TC08 (Picotech Technology Ltd, Reino Unido) foi conectado à porta serial de

um computador pessoal, onde o software do sistema realizou a aquisição de dados conforme os ajustes do usuário (intervalos de 5 segundos entre cada medição). Na Figura 33 pode ser observada a bancada de aquisição de dados em frente à máquina injetora.

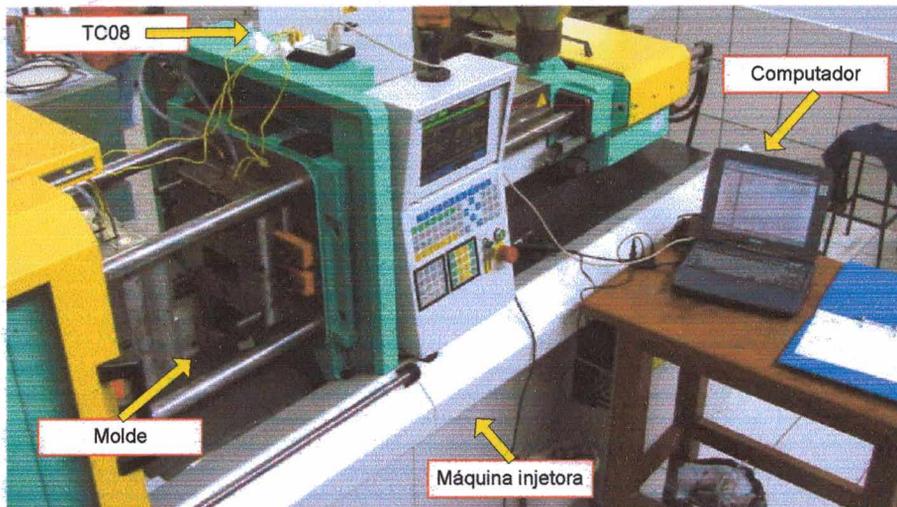


Figura 33: Bancada para a aquisição da variação da temperatura no inserto fixo durante a moldagem.

4.3.6 - Resultados e Discussão do Estudo de Caso 3

Com relação ao objetivo de utilizar parâmetros de injeção constantes, para posterior correlação com a variação dimensional e da massa das peças verdes e sinterizadas, os parâmetros do estudo de caso 3 que obtiveram maior sucesso na obtenção de peças durante a moldagem são mostrados na Tabela 14. Entre a 1ª e 43ª peças os parâmetros de moldagem foram ajustados para obter peças livres de defeitos. Como comentado anteriormente, na etapa de moldagem, a partir da 10ª peça obtida não foi mais necessário o uso do desmoldante PVA, apenas a limpeza com estopa quando ocorria a adesão de material na superfície da cavidade. Da 44ª a 64ª peça foram utilizados parâmetros constantes, pois a extração de peças livres de defeitos aparentes indicou que ocorreu a estabilização do processo.

Tabela 14: Variação dos parâmetros de injeção para a obtenção de peças.

Peça	Temperatura de injeção [°C]	Dosagem [mm] ²³	Velocidade de Injeção [mm/s]	Pressão de Injeção [bar]	Comutação [mm]	Tempo de atraso [s]	Primeira Pressão [bar]	Tempo de atraso [s]	Segunda Pressão [bar]	Tempo de resfriamento [s]
0	190	10	70	250	0,5	1	25	1	25	30
1	190	23	70	300	1	1	70	1,5	70	50
4	185	20	70	350	1	0,2	70	1,5	70	50
6	185	19,5	90	350	2	0,2	70	1,5	70	55
7	185	19,5	105	350	2	0,2	100	1,5	100	55
8	185	19,5	120	380	2	0,2	100	1,5	100	60
10	190	19,5	110	382	2	0,5	150	1,5	150	60
12	190	19,5	110	382	2	0,5	180	1,5	180	60
16	190	19,5	110	382	2	0,5	165	1,5	165	60
17	190	19,5	110	382	2	0,5	165	1,5	165	70
35	190	19,5	110	382	2	0,5	200	1,5	200	70
37	190	19,5	110	382	2	0,5	205	1,5	205	70
42	190	19,5	110	382	2	0,5	210	1,5	210	70
43	190	19,5	110	382	2	0,5	220	1,5	220	70
44 ao 64	190	19,5	110	382	2	0,5	210	1,5	210	70

Devido a problemas de ajustes entre o porta-molde e o inserto móvel, uma folga entre os insertos (não correto fechamento da cavidade) ocasionou a formação de uma rebarba espessa (espessura média igual a 0,4mm). Entretanto, prosseguiu-se com a moldagem das peças pois, a rebarba era de fácil remoção. Posteriormente foi realizado um reajuste dos insertos e as rebarbas foram controladas e reduzidas para valores de 0,15mm em média.

²³ Multiplicado a área do cilindro com $\varnothing=25\text{mm}$ pelo curso é obtido o volume dosado. A máquina fornece estas duas opções para ajuste da dosagem: curso em [mm] ou volume em [cc].

O acompanhamento dimensional do inserto móvel é apresentado na Tabela 15. Para facilitar o entendimento, as dimensões analisadas são as mesmas apresentadas na Figura 32.

Tabela 15: Variação dimensional do inserto.

		Recém Construído	Após Acabamento	Após a Moldagem	Diferença percentual entre o inserto antes e após a moldagem
A	Média (n=4) ²⁴	17,01mm	17,03mm	17,47mm	2,58% maior
	Desvio Padrão	0,022	0,021	0,025	
B	Média (n=4)	33,21mm	33,12mm	32,93mm	0,57% menor
	Desvio Padrão	0,013	0,034	0,017	
C	Média (n=4)	4,04mm	3,82 mm ²⁵	3,72mm	2,62% menor
	Desvio Padrão	0,010	0,017	0,029	

Os resultados das variações apresentadas na Tabela 15 representam as deformações plásticas que o inserto adquiriu quando foi submetido a uma força de fechamento igual à 100kN e uma temperatura de injeção igual a 190°C. Tanto no inserto móvel quanto no inserto fixo, ficam evidentes as deformações causadas nas linhas de fechamento, principalmente pelo escoamento da rebarba. A Figura 34 apresenta o resultado da combinação dos fatores calor e pressão sobre a resina de estereolitografia.

²⁴ n é referente ao tamanho da amostra.

²⁵ Variação grande ocasionada pelo processo de acabamento para planificação do plano de abertura dos insertos.

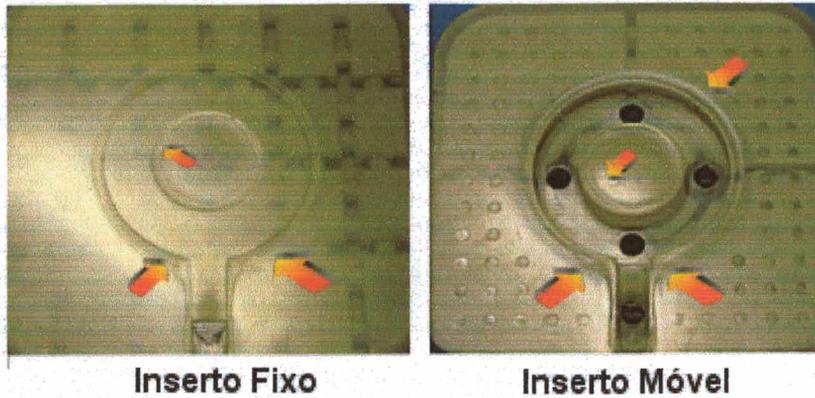


Figura 34: Imagens dos inserts após a moldagem (deformações sinalizadas).

A superfície do inserto fixo, que deveria ser plana, apresentou desníveis de até 0,04mm e, no inserto móvel, verificou-se variações de até 0,16mm próximo à linha de partição da cavidade.

O controle dimensional, média e desvio padrão, das peças verdes e sinterizadas é apresentado na Tabela 16, onde estão subdivididas em dois grupos: peças produzidas em ciclos aleatórios e peças produzidas com parâmetros de ciclo constante.

Tabela 16: Médias e desvios padrão obtidos para as peças obtidas no estudo de caso 3.

Dimensão alvo	10 peças aleatórias:				20 peças com ciclo constante:			
	A	B	C	m	A	B	C	M
	14mm	27,5mm	3mm	10g ²⁶	14mm	27,5mm	3mm	10g ²⁶

Verdes:

Média	17,19	32,53	4,00	10,64	17,25	32,54	4,00	10,57
Desvio Padrão	0,053	0,032	0,023	0,053	0,023	0,017	0,021	0,013

Sinterizadas:

Média	14,18	27,02	3,34	9,66	14,28	27,01	3,32	9,61
Desvio Padrão	0,069	0,084	0,063	0,052	0,014	0,027	0,023	0,015

²⁶ Cálculo baseado em uma densidade de 7,8g/cm³, sem poros (Norton, 1996).

Na Tabela 16, nota-se que para a dimensão “C” existe um erro adicional introduzido pela rebarba que foi incorporada à espessura das peças. Entretanto, não é possível distinguir diferenças dimensionais de relevância entre os dois grupos de peças. Contudo, é verificável a tendência de deformação do molde observada na Tabela 15 que foi refletida nas peças, pois as peças escolhidas aleatoriamente foram moldadas anteriormente às peças fabricadas com ciclo fixo.

Utilizando-se as médias é possível fazer relações para obter as contrações das peças em relação ao inserto móvel e o modelo CAD. A Tabela 17 apresenta os valores percentuais de contração e os erros percentuais, em negrito, das dimensões finais das peças sinterizadas relativas ao modelo CAD (dimensões alvo). Os valores das dimensões correspondem à média de todas as peças verdes e sinterizadas, sem haver distinção entre os ciclos de moldagem.

Tabela 17: Percentuais de contração entre peças, modelo CAD e insertos.

		Inserto após o acabamen- to	Inserto após a molda- gem	Média de todas as peças verdes	Média de todas as peças sinterizadas
Dimensão “A” – Ø Interno		17,03mm	17,47mm	17,22mm	14,23mm
CAD	14mm	+21,64%	+24,79%	+23,00%	+1,64%
	Inserto após acabamento	17,03mm	+2,58%	+1,12%	-16,44%
	Inserto após a moldagem	17,47mm		-1,43%	-18,55%
	Média de todas as peças verdes	17,22mm			-17,36%
Dimensão “B” – Ø Externo		33,12mm	32,93mm	32,54mm	27,02mm
CAD	27,5mm	+20,44%	+19,75%	+18,31%	-1,76%
	Inserto após acabamento	33,12mm	-0,57%	-1,77%	-18,43%
	Inserto após a moldagem	32,93mm		-1,20%	-17,96%
	Média de todas as peças verdes	32,54mm			-16,97%
Dimensão “C” – Espessura		3,82mm	3,72mm	4,00mm	3,33mm
CAD	3mm	+27,33%	+24,00%	+33,33%	+11,00%
	Inserto após acabamento	3,82mm	+2,62%	+4,71%	-12,83%
	Inserto após a moldagem	3,72mm		+7,53%	-10,48%
	Média de todas as peças verdes	4,00mm			-16,75%

Na Tabela 17, o erro relativo a dimensão “C” é muito maior que os valores de erro das dimensões “A” e “B”, que é provocado pela presença da rebarba que afeta esta dimensão nas peças.

Também foi calculada a relação entre a massa prevista no modelo CAD e das peças verdes e sinterizadas. A Tabela 18 apresenta os valores obtidos de contração da massa onde, nota-se que a diferença entre as peças verdes e sinterizadas corresponde ao percentual mássico do sistema ligante da mistura que foi retirado na etapa de sinterização. O valor da diferença relativa entre a massa calculada no CAD (100% densa) e a massa das peças sinterizadas é dividido entre porosidade e massa adicional da rebarba não prevista no projeto CAD.

Tabela 18: Percentual de perda de massa e porosidade das peças.

		Média de todas as peças verdes	Média de todas as peças sinterizadas
Massa das peças		10,61g	9,64g
	CAD	10g	+6,05%
	Média de todas as peças verdes	10,61g	-9,15%

O acompanhamento da temperatura, durante os ciclos de moldagem, no inserto fixo pode ser observado pela curva da Figura 35. A curva apresenta picos de temperatura de até 49°C para a posição onde se encontra o termopar (cerca de 0,5mm da superfície da cavidade). Adicionalmente, analisando a distância entre cada pico pode-se obter o tempo de duração entre cada ciclo, que varia de 60 à 360 segundos, por causa das operações de limpeza e resfriamento da cavidade.

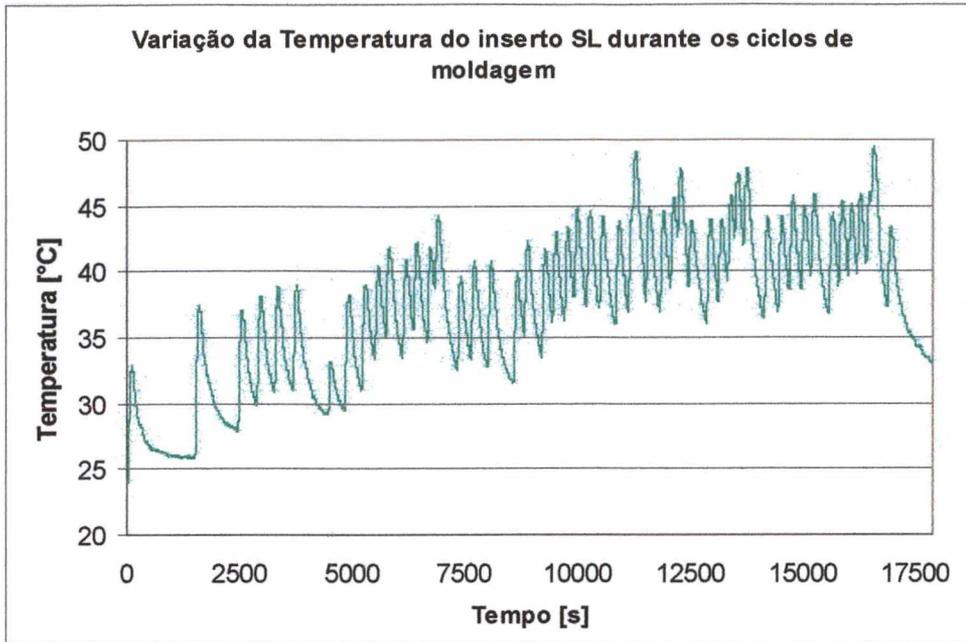


Figura 35: Gráfico apresentando os picos de temperatura e a estabilização do aquecimento dos insertos (cada pico representa a moldagem de uma peça).

O aspecto visual das peças verdes e posteriormente sinterizadas foi satisfatório, somente apresentado um pequeno rechupe em regiões próximas aos pinos extratores, evidenciando a diferença de resfriamento nas regiões que possuem pino extrator. A análise visual da secção de algumas peças verdes selecionadas aleatoriamente não identificou defeitos internos como espaços vazios ou laminação. Um pequeno empenamento é identificável em algumas das peças obtidas, originário na etapa de moldagem. A Figura 36 apresenta peças verdes e sinterizadas. As peças apresentam pequenas marcas dos pinos extratores no lado da cavidade do inserto móvel.



Figura 36: Peças verdes (escuras) e sinterizadas (prateadas).

5 - Conclusões

Os resultados obtidos com a realização de três estudos de caso possibilitaram uma avaliação mais completa a respeito da moldagem de pós metálicos em insertos feitos por estereolitografia.

Entretanto, este trabalho reúne conclusões que são aplicáveis aos insertos fabricados por estereolitografia independentemente do material que está sendo injetado. Por isso segmentou-se as conclusões, uma relativa ao objetivo principal desta pesquisa de mestrado (moldagem de pós metálicos em insertos SL) e outra referente às técnicas utilizadas no projeto, fabricação e acabamento de insertos de estereolitografia.

5.1 - Moldagem por Injeção de Pós em Insertos SL

Em Gomide (2000) e Hemrick (2001) afirma-se que a mistura com pó metálico adere às paredes dos moldes, dificultando a extração da peça. No entanto, a aderência da mistura à cavidade ainda não pode ser completamente definida por um único fenômeno, sendo que diversos fatores influenciam de forma similar em molde metálico, com diferenças nos valores dos parâmetros utilizados.

Valores de pressão de recalque elevados e/ou tempo de resfriamento muito longos dificultam a extração, podendo ocasionar a quebra ou aparecimento de fissuras na peça. Um sistema de extração eficiente diminui este problema e a pressão de recalque é baixa em insertos SL, restando o tempo de resfriamento como sendo o parâmetro de moldagem mais crítico para o sucesso na extração das peças. O tempo de resfriamento é relacionado à temperatura do material, sendo que a contração da peça quando extraída (agarramento da peça no macho do molde) é maior quanto menor a temperatura da peça e maior o tempo de resfriamento. No entanto, as propriedades

mecânicas da peça, também são afetadas pelo tempo de resfriamento, que no caso de misturas com pós é crítico, pois quanto mais fria (tempo maior) mais frágil torna-se a peça injetada e, quando mais quente (menor tempo de resfriamento), a peça está sujeita a maiores deformações. Infelizmente este é um parâmetro iterativo, que só pode ser ajustado na tentativa e erro. Sistemas CAE (*Computer Aided Engineering*) como o Moldflow Expert poderiam auxiliar na determinação dos parâmetros iniciais de injeção, estimando o tempo requerido para o resfriamento da peça e tantas outras combinações de fatores que influenciam no processo de moldagem.

A qualidade superficial do inserto também influencia na extração da peça. Nos estudos de caso não foi verificada dificuldade de extração devido ao acabamento; porém, o efeito de sobreposição de camadas (efeito-escada) poderá provocar a aderência de material nas interfaces entre as camadas. Ainda é necessário lembrar que, a máquina de estereolitografia utilizada neste estudo (3D Systems SLA250/30A) fabrica objetos com espessura de camada de 150 μm e os modelos mais recentes apresentam capacidade de fabricação de camadas de 20 μm , além de precisão dimensional superior e tempo de fabricação reduzido. Portanto, insertos fabricados com camadas de 20 μm apresentam uma qualidade superficial muito superior e, conseqüentemente, reduziriam problemas de aderência do material na superfície do molde. A utilização uma máquina mais precisa também diminui os problemas com a vedação dos pinos extratores, aumentando a eficiência do sistema extrator.

As pressões de injeção e de recalque são importantes para a moldagem de componentes de pó metálico em insertos SL. O correto ajuste das pressões é complexo, pois há um limite entre o mínimo necessário para injetar a peça sem defeitos como rechupes e o máximo sem ocasionar o agarramento da peça no inserto. Além disso, existe o limite de pressão que não pode ultrapassar o valor máximo de tensão de ruptura da resina SL. É importante salientar que, com a absorção de calor pelo inserto

durante a moldagem o aumento da temperatura reduz drasticamente as propriedades mecânicas da resina (Hopkinson, 2000). Para completar, Salmoria (2002) e Fernandes (2001) apontam que o grau de cura da resina SL, mesmo após a cura em forno UV, ainda é pequeno se comparado com amostras de resina submetidas ao tratamento térmico de 1 hora em temperatura igual à 125°C, indicado por Cedorge et al (1999). A cada novo ciclo, o calor absorvido pela cavidade aumenta o grau de cura da resina fazendo com que ocorra uma contração do material pela aproximação entre as cadeias do polímero (aumento das ligações cruzadas). Combinando os fatores aumento da temperatura, deixando a resina flexível, e as pressões impostas pelo ciclo de injeção, o inserto SL absorve deformações permanentes com a progressão dos ciclos de moldagem.

A velocidade de injeção para as geometrias avaliadas deve ser muito parecida com a utilizada em moldes metálicos (German & Bose, 1997 e Haupt & Walcher, 1998) ou seja, suficientemente veloz desde que não cause esguichamento, segregação e aprisionamento de ar durante a injeção.

Uma das maiores dificuldades encontradas durante a moldagem nos estudos de caso foi a falta de experiência dos operadores da máquina injetora em processar pó metálico e utilizar insertos de estereolitografia. Possivelmente os estudos de caso 1 e 2 apresentariam resultados ainda melhores se tivessem sido realizados com operadores mais experientes. Esse problema já foi relatado em Jacobs (1992) que analisa a falta de experiência e paciência dos operadores das máquinas injetoras como um dos principais fatores pela redução da vida útil do inserto.

Os resultados obtidos com o acompanhamento dimensional do terceiro estudo de caso apresentaram erros, excluindo os ocorridos devido à presença de rebarba, que são consideravelmente pequenos (máximo de 1,7% da dimensão alvo). Muitos autores (Kulkarni, 1996; Loh & German 1995, German & Bose, 1997) afirmam que as

tolerâncias para componentes PIM devem estar na faixa de $\pm 0,3\%$; entretanto, David (1998) contrapõe racionalizando que para a indústria, especialmente para grandes quantidades produzidas, tolerâncias de até $\pm 1\%$ são mais realistas, a não ser que sejam utilizadas operações secundárias para o ajuste dimensional. Considerando que, o uso dos insertos produzidos por estereolitografia é destinado à produção de pré-séries para a realização de uma avaliação preliminar, podem ser considerados um sucesso desvios dimensionais entre $\pm 2\%$. Contudo, poderão ser alcançados desvios dimensionais ainda menores com o uso de resinas SL mais rígidas e máquinas de estereolitografia mais precisas.

O tempo para obtenção de um inserto para a produção de uma pré-série de componentes PIM, também pode ser considerado um ganho com o uso de insertos SL. O gráfico apresenta do na Figura 37 mostra as parcelas de tempo desprendidas em cada uma das etapas para o estudo de caso 3.

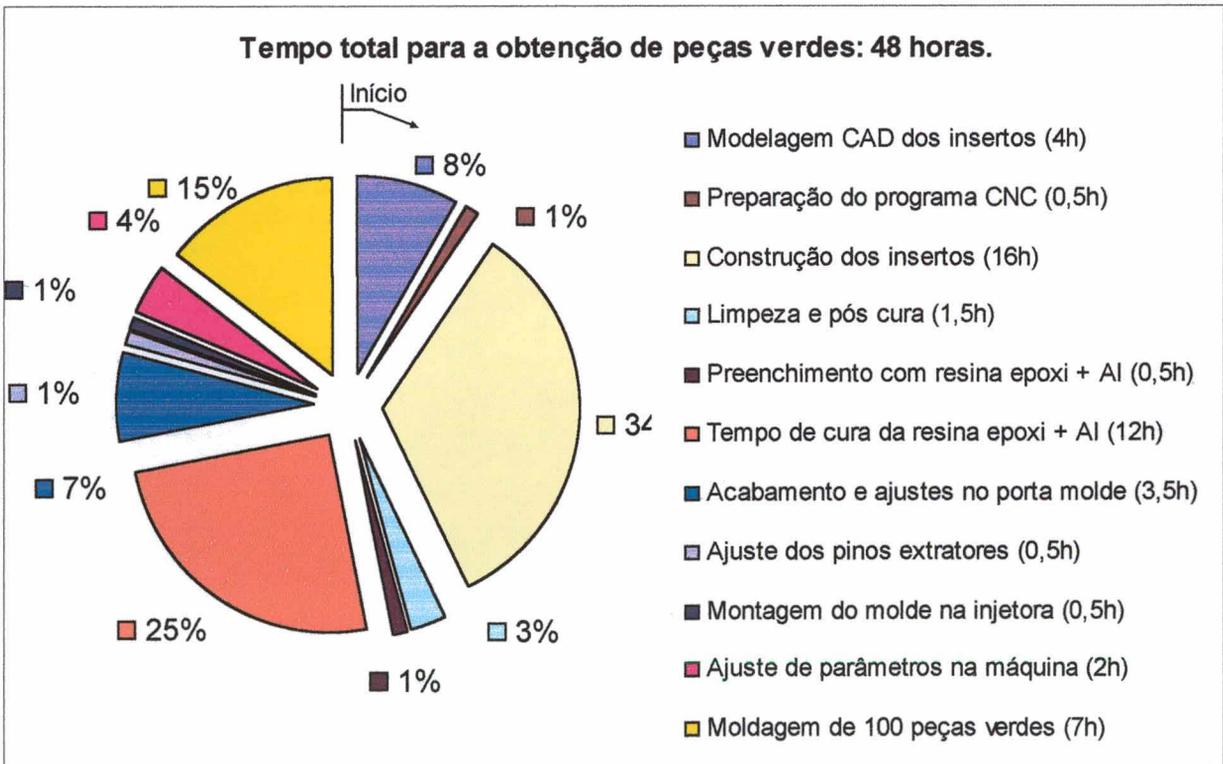


Figura 37: Tempo utilizado em cada etapa do estudo de caso 3.

No gráfico da Figura 37, nota-se duas etapas que ocuparam tempo considerável: i) tempo de cura da resina epóxi com alumínio (12 horas) e ii) tempo de construção dos insertos SL (16 horas). No entanto, o tempo de cura da resina epóxi pode ser diminuído quando utilizado outro material como as ligas de baixo ponto de fusão apresentadas na Tabela 3, para preenchimento da parte traseira dos insertos, reduzindo para apenas 2 horas. O tempo de construção dos insertos depende do sistema de adição de camadas da potência do laser da máquina de estereolitografia. Os insertos foram construídos com potência do laser igual a 13mW quando o normal, para o mesmo modelo de máquina, é de 35mW, o que reduziria o tempo de construção para 8 horas. Em máquinas de estereolitografia mais modernas, o sistema de adição de camadas chega a ser 10 vezes mais rápido e a potência do laser gira em torno de 800mW, produzindo objetos em tempos muito inferiores do que o modelo SLA250/30A.

Além das 48 horas necessárias para a obtenção de 100 peças verdes, ainda são necessárias 68 horas dos ciclos de extração do ligante e sinterização para a obtenção dos componentes finais.

Ainda com relação aos tempos, como o de modelagem CAD e ajuste dos parâmetros na máquina injetora, estes dependem muito da complexidade geométrica dos componentes e da experiência do projetista CAD e operador da máquina injetora.

O objetivo do trabalho, avaliar a moldagem de pós metálicos em insertos produzidos por estereolitografia, foi atingido e considera-se viável a utilização de insertos SL na produção de pré-séries de componentes de aço inoxidável 316L. Apesar da baixa complexidade das peças obtidas, muito poderá ser avançado com base nos resultados aqui obtidos. Os baixos custos para a obtenção de um inserto SL, estimados em torno de R\$1.500,00 (um mil e quinhentos reais) e um tempo reduzido de apenas 2 dias para a sua pronta utilização, são os grandes benefícios que a tecnologia de

estereolitografia pode fornecer para o desenvolvimento de componentes de pós metálicos moldados por injeção. A precisão dimensional ainda necessita de ajustes, porém, dependendo da aplicação do componente, e quais dimensões são realmente críticas, a precisão atingida neste trabalho pode ser considerada suficiente.

5.2 - Projeto e Produção de Insertos Obtidos por Estereolitografia

As técnicas de produção de insertos produzidos por estereolitografia são variadas (Ahrens et alii, 2001). No trabalho experimental realizado, utilizaram-se 3 tipos de preenchimento para os insertos de estereolitografia. O de melhor desempenho foi o utilizado no estudo de caso 4, aonde o sistema de resina epóxi com carga de alumínio demonstrou ser de fácil aplicação e manuseio prático. Porém, o tempo de cura (12 horas) é considerado uma desvantagem. O preenchimento com metal de baixo ponto de fusão é condicionado ao risco de deformações devida a massa do metal e temperatura de fusão. Ainda, a combinação de massa plástica com carga de pó de ferro não evitou que a contração da massa plástica causasse alguma deformação no molde. Além disso, as etapas de preenchimento inserem tempos consideráveis na etapa de acabamento dos insertos.

O sistema de planificação utilizado foi satisfatório, pois é de fácil aplicação e com resultados visíveis; no entanto, é restrito a geometrias de pequena e média complexidade que possuam um único plano de abertura. A Figura 38 exemplifica mais detalhadamente as dimensões recomendadas para o uso da camada extra para a planificação. É importante salientar que a camada de 0,15mm deve ser ajustada para cada máquina, por exemplo, se a máquina utilizada for um modelo 3D Systems SLA Viper SI2 e a construção do inserto for feita com espessuras de camada de 0,05mm, esta será a mesma dimensão a ser utilizada na camada extra.

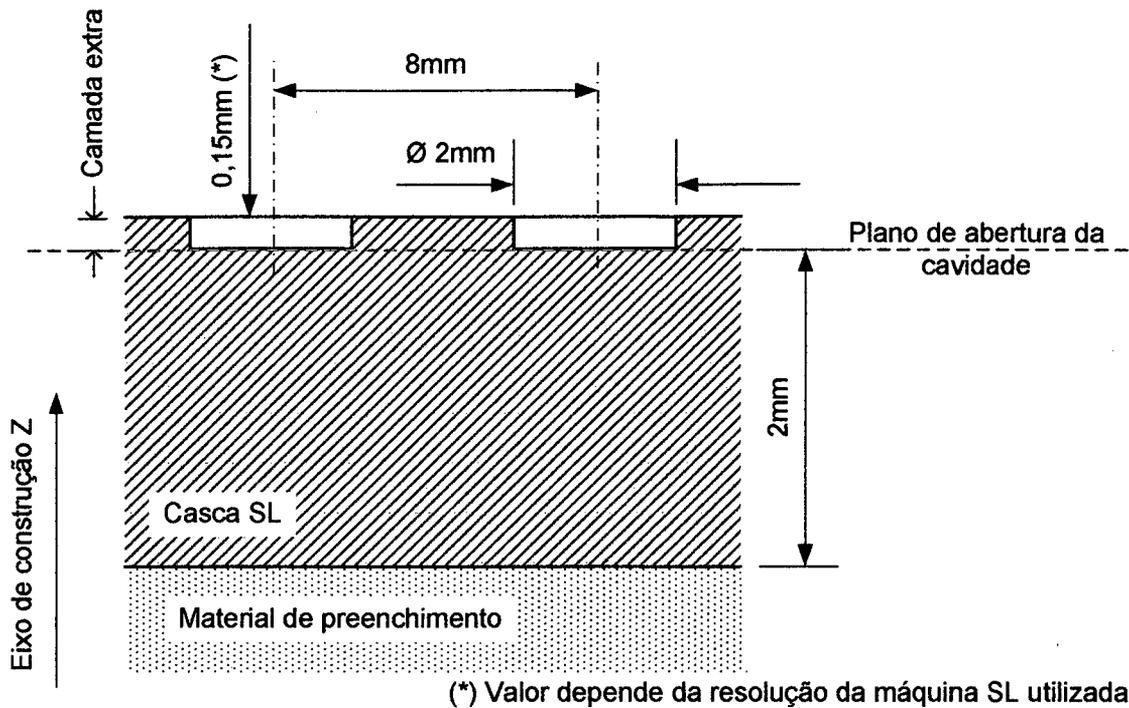
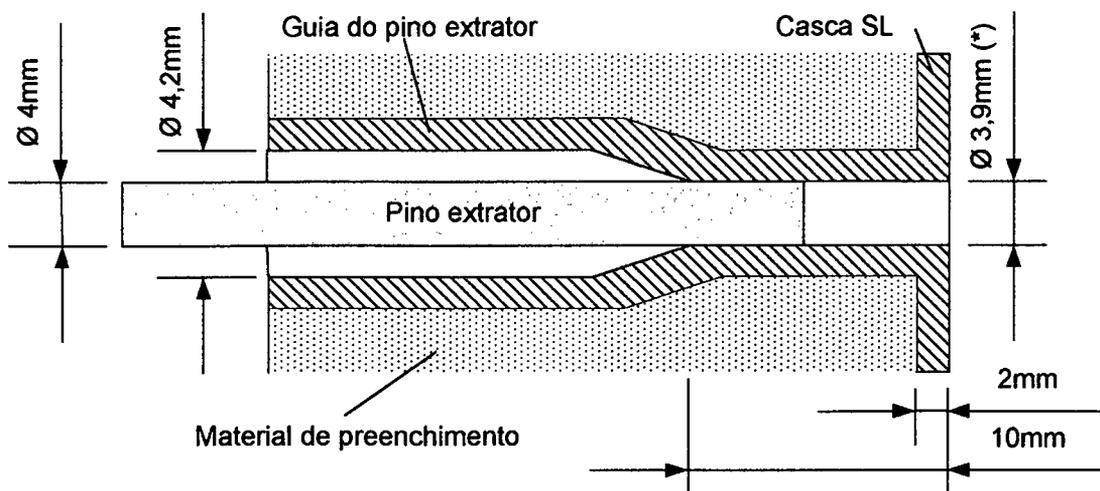


Figura 38: Orientações para o uso do sistema de planificação com camada extra.

O uso de pinos extratores em insertos SL provou ser essencial para a extração das peças em insertos para a moldagem de pós. Sem o uso destes, seria impossível equilibrar as forças de atrito entre o componente e as superfícies da cavidade durante a extração do componente. Contudo, o ajuste da altura dos pinos é uma tarefa delicada e deveria ser facilitada com uso de um porta molde mais adequado ao uso de insertos SL. Além da altura dos pinos, o diâmetro das guias dos pinos também deve ser ajustado para evitar o efeito de entrada de material fundido na folga entre o pino e a guia. A Figura 39 apresenta as dimensões de projeto das guias, para pinos extratores com diâmetro de 4mm, que considera a precisão das máquinas de estereolitografia para o ajuste fino da região próxima à superfície da cavidade.



(*) Medida de fabricação que deverá ser ajustada para o pino extrator.

Figura 39: Recomendações para as dimensões das guias dos pinos extratores.

Para complementação, a Tabela 19 sintetiza algumas recomendações obtidas através do desenvolvimento dos estudos de caso.

Tabela 19: Recomendações para insertos SL.

Pinos extratores:	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de guias com seção variável; • Projetar com interferência entre a guia e o pino para realização posterior de ajuste fino;
Plano de abertura:	<ul style="list-style-type: none"> • Preferência por planos paralelos e coincidentes; • Usar sistema de planificação, se possível;
Ângulo de saída:	<ul style="list-style-type: none"> • Usar no mínimo ângulos de saída entre 1° e 2° ;
Material de preenchimento:	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar sistema de resina epóxi com carga de alumínio;
Rigidez da casca do inserto:	<ul style="list-style-type: none"> • Projetar casca do inserto com 2mm de espessura; • Projetar nervuras para aumentar a rigidez da casca, com espessura igual à da casca, espaçadas em 10mm e perfuradas ($\varnothing=1,75\text{mm}$) para interação entre a casca e o material de preenchimento;
Canal e pontos de injeção:	<ul style="list-style-type: none"> • Canal de injeção com espessura igual ou 75% da espessura da peça; • Ponto de injeção com a mesma geometria do canal, sem cantos arredondados pois facilita separar a peça verde do canal;
Orientação de construção:	<ul style="list-style-type: none"> • Construir os insertos com o plano principal de abertura paralelo ao plano xy de construção (perpendicular ao eixo Z de sobreposição de camadas);
Acabamento:	<ul style="list-style-type: none"> • Se for realizado o lixamento superficial para retirar o efeito-escada, este deverá ser realizado até, no mínimo com lixas de 600mesh com o uso de água (caso a resina SL não seja higroscópica);
Pós cura:	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar pós cura de 1 hora em forno UV;

5.3 - Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados adquiridos com este trabalho fornecem diretrizes para muitos outros aprofundamentos que devem ser feitos para o completo desenvolvimento da tecnologia de moldagem por injeção em insertos fabricados por estereolitografia. A seguir são apresentadas sugestões de trabalhos que possam ser alvos de estudo em pesquisas futuras:

- Investigar a moldagem por injeção de outros materiais além do aço inox 316L (por exemplo: alumina) ampliando o espectro de aplicações da tecnologia de insertos SL;
- Estudar a moldagem de peças/componentes mais complexos do que as geometrias utilizadas nos estudos realizados neste trabalho, estimando a vida útil dos insertos;
- Analisar comparativamente a moldagem de uma mesma geometria em insertos metálicos e de estereolitografia, identificando as diferenças entre os parâmetros de moldagem e os resultados finais;
- Usar misturas de pó com proporções maiores de ligante para auxiliar a etapa de moldagem e extração da peça verde facilitando a moldagem em insertos SL;
- Utilizar insertos aletados, descritos em Ahrens et alii (2000), para a moldagem de misturas com pós;
- Estudar o desenvolvimento das deformações nos insertos fabricados por estereolitografia e maneiras de evitar, ou reduzir, os desvios dimensionais que são adquiridos pelo inserto durante os ciclos de moldagem;
- Mapear os erros dimensionais na técnica de moldagem por injeção em insertos SL identificando desde o projeto CAD, até o ciclo de moldagem a influência de cada fator sobre a precisão dimensional dos insertos;

- Utilizar a metalização superficial em insertos de estereolitografia na moldagem de pós;
- Desenvolver um porta molde modular adequado para a troca de insertos quando utilizadas as técnicas de Ferramental Rápido, com facilidade para a utilização de canais de refrigeração, termopares, sensores de pressão, gavetas e pinos extratores;
- Usar sistemas CAE para auxiliar na moldagem de pós, pré-ajustando os parâmetros do processo de injeção, evitando desperdício de material, economizando tempo e evitando o desgaste prematuro dos insertos SL;
- Repetir experimentos realizados neste trabalho, pois com o desenvolvimento de novas resinas para a estereolitografia, que surgem ano a ano com propriedades mecânicas e térmicas superiores, os insertos deveriam ser fabricados com outras resinas além da DSM Somos 7110;
- Avaliar o uso de uma máquina de estereolitografia mais precisa (exemplo: modelo 3D Systems SLA7000), repetindo os experimentos e comparando a influência do efeito-escada e a precisão dimensional alcançada;
- Avaliar a moldagem de pós metálicos em insertos SL no qual seja realizado um acabamento superficial fino com a completa remoção do efeito-escada.

6 - Referências Bibliográficas

3D Systems. **Maestro™ Workstation User Guide for Software Release 1.9.1**; Valencia, CA, USA; 1998.

AHRENS, Carlos H.; RIBEIRO, Armando de Sá.; BEAL, Valter E. **An Alternative Cooling Technique for Stereolithography Moulds**. Proceedings of Time-Compression Technologies 2001 Conference. Manchester, United Kingdom; September 26th & 27th, 2001.

AHRENS, Carlos H. LENCINA, Diovani; BEAL, Valter E.; FRAGA, Marcelo. **Considerações iniciais para a confecção de protótipos rápidos**. Anais do 1º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (em compact disc). Curitiba- Paraná, Abril de 2001.

ARTHUR, A.; DICKENS, P. M.; COBB, R. C.; **Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes**; Rapid Prototyping Journal; Volume 2, Number 1 – 1996 – pp. 4-12; MBC University Press; UK;

BROWN, Stuart; WYKES, Catherine; BROOKS, Richard. **Split-Line Geometry of Stereolithography Inserts**. Proceedings of the 9th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing; Athens, Greece; July 2000.

CEDORGE, T. et al.; **Design Rules for Stereolithography Injection Molding Inserts**. Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing; Nottingham, UK, pp 193-209, July 1999.

COLTON, J. S.; CRAWFORD, J.; PHAM, G.; RODERT, V. **Failure of rapid prototype molds during injection molding**. Annals of the CIRP, volume 50/01/2001.

DAVID, François. **Powder Injection Molding – Quality Parameters**. PM World Congress, Special Interest Seminar: 1998.

DECELLES, P.; BARRITT, M. **Direct AIM™, Prototype Tooling**. White Paper. 3D Systems Inc. Valencia, California, USA. 1997.

DICKENS, Phill.; HOPKINSON, N.; HARRIS, R. **Layer Thickness Selection for Stereolithography Injection Mould Tooling**. Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing; Nottingham, UK, pp 193-209, July 1999.

DICKENS, Phill. **Rapid Tooling Techniques: Rapid Tooling's Strategic Benefits & Risks**. Frankfurt, Germany. A Special Euromold'99 Conference. Euromold: December 1999.

DSM Somos; **Product Data: Somos 7110 Epoxi Photopolymer**; White paper. 1999.

FERNANDES, Gerson Avelino. **Resina fotopolimérica somos 7110 para estereolitografia: caracterização e condições de processamento.** Dissertação de Mestrado; Curso de Pós-Graduação em Ciência e Eng. de Materiais; Depto. de Eng. Mecânica; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis – SC, Brasil; Dezembro de 2001.

GERMAN, Randall M. **Power Metallurgy Science.** 2nd Edition. New Jersey, USA. MPIF: 1994. 472p.

GERMAN, Randall M., BOSE, Animesh. **Injection Molding of Metals And Ceramics.** Princeton, New Jersey, USA. MPFI: 1997. 413p.

GOMIDE, Ricardo Borges. **Fabricação de componentes injetados com o uso de insertos de resina termofixa produzidos por estereolitografia.** Dissertação de Mestrado; Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica; Depto. de Eng. Mecânica; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis – SC, Brasil; Março de 2000.

GRELLMANN, Dauri A. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e microfusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido.** Dissertação de Dissertação, Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil, Fevereiro de 2001.

HAUT, Uwe; WALCHER, Hartmut. **Defects in PIM-Components: Reasons and Methods for Their Elimination.** Encontro para o desenvolvimento integrado de processos e produtos de Injeção de plásticos, metais e cerâmicas - Semana da Qualidade e Inovação Tecnológica Q&IT 98. Centro Sul – Florianópolis, 16 de setembro de 1998.

HEMRICK, James G.; STARR, Thomas L.; ROSEN, David W.; **Release behavior for powder injection molding in stereolithography molds.** Rapid Prototyping Journal; Volume 7, Number 2 – 2001 – pp. 155-121; MBC University Press; UK. – ISSN 1355-2546.

HOPKINSON, Neil. DICKENS, Phill. **Predicting stereolithography injection mould tool behaviour using models to predict ejection force and tool strength.** International Journal of Production Research, ISSN 0020-7543. Taylor & Francis Ltd, vol.38, no. 16, 3747-3757. United Kingdom, 2000. Disponível em: <<http://www.tandf.co.uk/journals>> ISSN 1366-588X.

HOPKINSON, Neil. DICKENS, Phill. **Using stereolithography tools or injection moulding: research into tensile tool failure and unexpected benefits of the process.** Journal of Process Mechanical Engineering, Institution of Mechanical Engineers, UK; Volume 214 part B; 2000.

INDALLOY Indalex Aluminum Solution Group. **Indalloy Specialty Alloys.** White Paper 2000. USA.

LAFRATTA, Fernando Hummel. **Avaliação da viabilidade do uso de líquidos refrigerantes sob alta pressão no processo de injeção de termoplásticos utilizando técnicas de rapid tooling**. Proposta de Tese, Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil, 1997.

LI, Y.; GARGIULO, E. P.; KEEFE, M. **Studies in Direct Tooling Using Stereolithography**. Transactions of ASME, Vol. 122, pg. 135, May 2000.

LONGHI, Júlio. **Estudo da viabilidade de desenvolvimento de insertos para moldes em plásticos reforçado com fibra de vidro utilizando a tecnologia de ferramental rápido por estereolitografia**. Projeto de Dissertação, Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil, Novembro de 1999.

JACOBS, Paul F. **Rapid Prototyping & Manufacturing – Fundamentals of Stereolithography**. New York, NY, USA. RPA/ASME Press: 1992.

JACOBS, Paul F. **Stereolithography and other RP&M Technologies**. New York, NY, USA. RPA/ASME Press: 1996.

KULKARNI, K. M. **Factors Affecting Dimensional Precision of MIM Parts Under Production Conditions**. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials – 1996; Vol. 5, Part 19, pg. 19-157, 19-170.

MALE, J. C.; BENNETT, G. R. **Development of a system for evaluating the surface flatness of resin in stereolithography process**. Centre for Rapid design and Manufacture, Buckinghamshire College, High Wycombe, UK - 1996. White Paper.

MENGES, George; MOHREN, Paul. **How to Make Injection Molds**. 2nd Edition Munich, Germany: Hanser, 1993. 504p.

NORTON, Robert L. **Machine Design: An Integrated Approach**. Prentice-Hall Inc. New Jersey, EUA – 1996. ISBN 0-13-555475-6.

PETZOLD, F. **MIM Short Course**. European Powder Metallurgy Association. Delft, The Netherlands 1992.

PÖTSCH, Gerd; MICHAELI, Walter. **Injection Molding – An Introduction**. München, Germany. Hanser/Gardner Publications Inc.: 1995. 195p.

REEVES, P. E.; COBB, R. C. **Reducing the surface deviation of stereolithography Using in-process techniques**. Rapid Prototyping Journal; Volume 3, Number – 1997 – pp. 20-31; MBC University Press; UK.

RADSTOK, Eric. **Rapid Tooling**. Rapid Prototyping Journal; Volume 5, Number 4 – 1999 – pp. 164-168; MBC University Press; UK.

RENAP, K.; KRUTH, J. P. **Recoating issues in stereolithography**. Rapid Prototyping Journal; Volume 1, Number 3 – 1995 – pp. 4-16; MBC University Press; UK.

RIBEIRO JR, Armando Sá. **Avaliação do uso de ferramentas CAE no projeto de moldes com gavetas fabricados pelo processo de estereolitografia**. Qualificação para tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Dezembro de 2000.

SALMORIA, Gean Vitor. **Caracterização e análise da microestrutura e das propriedades de peças fabricadas por estereolitografia**. Monografia para concurso de professor adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 30 de Janeiro de 2002.

SAURKAR, Sandeep. **Rapid Tooling: A Study Of Cooling Techniques For Mold Inserts Used In The Direct AIM™ (ACES Injection Molding) Process**. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science; Department of Plastics Engineering, University of Massachusetts, Lowell; April 1998.

VANDRESEN, Marcelo. **Avaliação da viabilidade do uso da técnica do núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de Rapid Tooling, a partir da estereolitografia**. Proposta de Tese, Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil, Dezembro de 1999.

THÜMLER, F.; OBERACKER, R. **An Introduction to Powder Metallurgy**. London, UK. Institute of Materials: 1993. 332p.

WENDHAUSEN, et al. **Industrial Plasma Reactor for Processing MIM Parts**. European Congress On Powder Metallurgy 2001. Nice, France, 2001.

WHOLERS, Terry. **Advances in Rapid Technologies Worldwide: Rapid Tooling's Strategic Benefits & Risks**. A Special Euromold '99 Conference; Euromold, Frankfurt, Germany, December 1999.

WHOLERS, Terry. **Wholers Report 2001**. Wholers Associates, Inc. USA, 2001.

7 - Bibliografia

BOX, George E. P., et al. **Statistics for Experimenters**. New York. NY, USA. John Wiley & Sons Inc.: 1978.

COLTON, J.; BLAIR, B. **Experimental study of post-build cure of stereolithography polymers for injection molds**. Rapid Prototyping Journal; Volume 5, Number 2 – 1999 – pp. 72-81; MBC University Press; UK.

DICKENS, Phill M.; et al. **Conversion of RP models to investment castings**. Rapid Prototyping Journal; Volume 1, Number 4 – 1995 – pp. 4-11; MBC University Press; UK;

DUSEL, K. -H.; ESCHL, J. ; EYERER, P. ; LÜCK, T. **Rapid Tooling Simulation and Applications of the Injection Moulding Process**. Stuttgart, Germany. IKP – University of Stuttgart: 1998.

EBENHÖCH, J. S.; KRUEGER, D. C. **Typical Defects in PIM-Parts – and how they can be avoided**. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials –1996; Vol. 5, Part 19, pg. 19-213,19-223.

GERMAN, Randall M.; et al. **Processing Conditions and Tooling for Powder Injection Molding**. The International Journal of Powder Metallurgy; Vol. 27, No.2; APMI, 1991.

INCROPERA, Frank P.; Witt, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor de Massa**. 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.: 1992.

KARAPATIS, N. P.; van GRIETHUYSEN, J. -P.S.; GLARDON, R. **Direct Rapid Tooling: a review of current research**. Rapid Prototyping Journal; Volume 4, Number 2 – 1998 – pp. 77-89; MBC University Press; UK.

PICCIRILLO, Nicola; LEE, Daeyong. **Jetting phenomenon in powder injection molding**. The International Journal of Powder Metallurgy – American Powder Metallurgy Institute. Volume 28, No.1 – 1992.

RAHMATI, S.; DICKENS, P. **Stereolithography for injection mould tooling**. Rapid Prototyping Journal; Volume 3, Number 2 – 1997 – pp. 53-60; MBC University Press; UK.

WONSILD, B.; et al. **Test and Development of Manufacturing Processes for Injection Moulding Tools from RPT Models**. Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing; Nottingham, UK, pp 193-209, July 1999.