

que ocorrem no interior do molde, sobre a qualidade da peça que está sendo produzida. A questão fundamental de garantir uma baixa temperatura no inserto do molde, em função de sua baixa resistência a temperatura, pode ser melhorada pela adoção do controle de pressão na parte posterior do molde, conforme proposto neste trabalho, substituindo o composto de epóxi e alumínio por um fluido.

Este sistema propõe-se a garantir a refrigeração adequada e a rigidez necessária para suportar as pressões de injeção. Componentes hidráulicos industriais são compatíveis com as condições de pressão, temperaturas, e vazões que ocorrem no processo de injeção de plástico.

Neste trabalho de pesquisa estão sendo desenvolvidos a modelagem, a simulação e especificação dos componentes hidráulicos e do controlador.

Os resultados esperados a partir dos estudos teóricos deverá permitir a viabilização e a construção de um controlador de pressão na parte posterior de um inserto estereolitografado.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3D Systems, 1996, “3D Systems Report 44% Sales Growth in 1995, 52% in Fourth Quarter. Informativo Publicitário”.
- Blass, A., 1988, “Processamento de Polímeros”, 2ª ed., Editora da UFSC.
- Dell’Arciprete, J., Malloy, R., McCarthy, S., 1998 “Cavity pressure studies for stereolithography produced tooling”, Institute for Plastics Innovation, UML, Lowell, MA 01854. Paper 5p.
- Fridolin, F., Meyer U., 1982, “Industrial Applications of Piezoelectric Pressure Measurements”, March.
- Jacobs, P., 1996, “Recent Advance in Rapid Tooling from Stereolithography. 3D Systems, Informativo Técnico. 24 de setembro.
- Kamal, M. Kenig S., 1972, “Polymer Engineering and Science”, Vol. 12, N° 4, p618
- Lafratta, Fernando Humel., 1997, “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 UFSC/EMC/GRUCON/CIMJECT, Florianópolis,
- Plant, H. T., Maher, R., 1975, “SPE ANTEC”, papers 21,74.
- Qin Zou, P.E., & Ari, G., 1995, “Evaluation of the Fill-to-Pack Transfer Method: Position vs Pressure, paper ANTEC’95/637
- Qiu, Wen Jiu., 1993, “Injection Molding Process Monitoring Based on Cavity Pressure”, Abstract of a Thesis Submitted to the Faculty of the Department of Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Plastics Engineering University of Massachusetts of Lowell, 74p, pp 1-5, 13-18.
- Santana, R., R., Injnet.,1998 “Notas do estágio na empresa Molde Matos Ltd”; Marinha Grande – Portugal.
- Saurkar, S., Malloy, R., McCarthy, S.,1995, “Rapid Tooling: A study of cooling techniques for mold inserts used in the Direct AIM (ACES Injection Molding) Process”, BS, University of Pune, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Department of Plastics Engineering University of Massachusetts Lowell.
- Smith, D., 1993, “Inside the mold with process control”, Hunkar Laboratories Inc., Cincinnati, OH.

simula o sistema de controle de pressão consiste de duas câmaras cilíndricas denominadas de câmara 1C1 e câmara 2C1 fixadas uma na outra por meio de parafusos e separadas entre si por meio de uma membrana em forma de disco feita de resina SOMOS 7110 fotocurada.

Os testes serão feitos com discos de espessuras que variam entre 1,25 mm que é o limite mínimo de espessura tolerável para insertos feitos em estereolitografia, até 3,25 mm já que maiores espessuras aumentam a rigidez mas dificultam a transferência de calor da peça de plástico em contato com a resina para a placa do molde onde é feita a refrigeração.

O sistema apresentado esquematicamente na figura 4 é constituído dos seguintes elementos principais: uma válvula eletro-hidráulica proporcional controladora de vazão, uma válvula eletro-hidráulica proporcional de alívio de pressão, uma válvula eletro-hidráulica proporcional redutora de pressão, de duas câmaras cilíndricas de 60 mm de diâmetro separadas por uma membrana feita de inserto de molde estereolitografado em forma de disco, de dois transdutores de pressão instalados nas câmaras 1C1 e 2C1 e de um transdutor de deslocamento instalado na câmara 1C1.

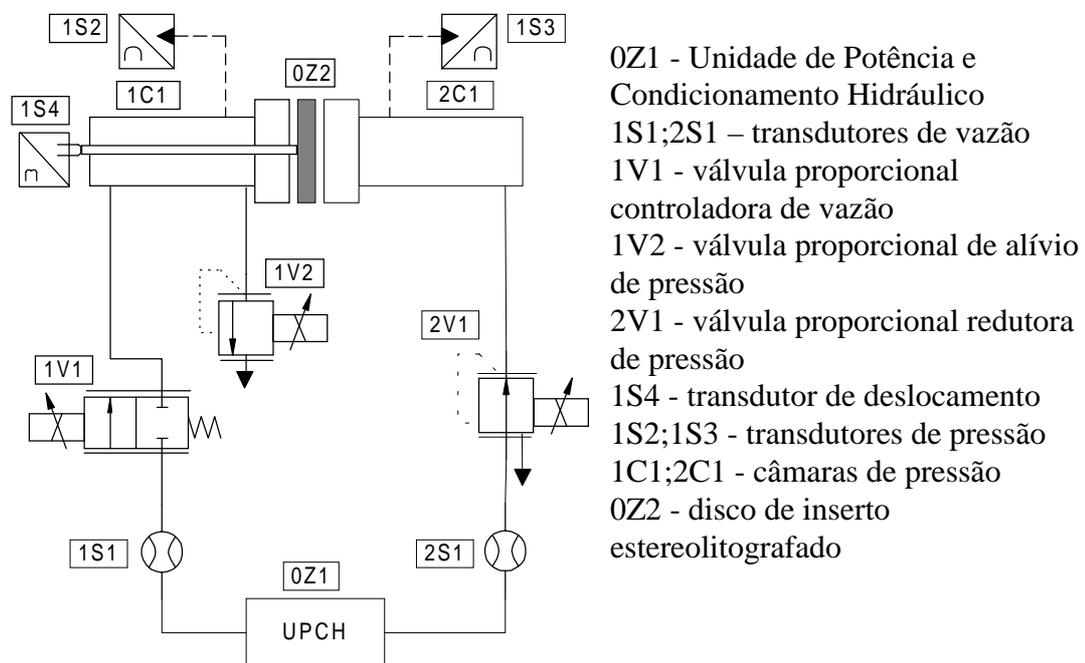


Figura 4 - Sistema de controle de pressão

O fluido hidráulico preenche as duas câmaras por igual. Quando as duas câmaras estão completamente cheias e atingem uma pressão de 100 bar, começa a fase de compressão. As duas câmaras ficam pressurizadas durante um tempo mínimo e, posteriormente, a câmara 2C1 manterá o fluido estagnado e a uma pressão constante de 100 bar quando então o fluido na câmara 1C1 começa a circular ocasionado por uma diferença de pressão que lhe é imposta por uma válvula de alívio de pressão para favorecer a refrigeração do inserto do molde. Portanto o sistema de controle da pressão na câmara 1C1 mantém a pressão nessa câmara o mais próximo possível da pressão na câmara 2C1 e, conseqüentemente, a deformação da membrana será minimizada, preferencialmente com deslocamento do ponto central menor que 1mm.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fundamentando-se nas características do processo de moldagem por injeção descrito nas primeiras seções deste artigo identifica-se a importância das variáveis pressão e temperatura,

Para as peças de ABS (Dow Magnum 9010) foram aplicadas primeiramente pressões na faixa de 350 bar e posteriormente de 260 bar e 300 bar. Para as peças injetadas com PP (Polipropileno) foram aplicadas pressões na faixa de 115 bar, 90,5 bar e 100 bar.

Nesses testes foi observado que com uma redução da pressão na cavidade foram obtidas peças com a mesma qualidade da que tinha sido injetada com uma pressão mais alta ou seja, uma redução na pressão da cavidade nem sempre aumenta a vida da ferramenta.

Para se ter um fator de comparação, uma peça padrão com as dimensões 165,1 mm de comprimento por 12,7 mm de largura e 3,2 mm de espessura consumiu 1,3s entre preenchimento da cavidade e compressão, com o uso do Direct AIM o pico de pressão observado foi de 70 bar (Lafratta, 1997).

Segundo (Santana & Injnet, 1999), em experimentos realizados com peças de dimensões de 150 mm x 20 mm x 1 mm, 150 x 20 mm x 3 mm e 150 mm x 20 mm x 2 mm, as pressões usadas para a injeção foram respectivamente de 445 bar, 85 bar e 190 bar.

Experimentos concluíram que a vida da ferramenta é uma interação complexa entre a pressão na cavidade e a temperatura da ferramenta, onde qualquer redução da pressão na cavidade provoca um aumento subsequente na temperatura da ferramenta. Isto ocorre porque com a redução da pressão o material que está sendo injetado fica mais viscoso (menos fluido), o que aumenta o atrito interno aumentando a geração de calor. Portanto, os benefícios de uma redução da pressão na cavidade podem ser compensados pelo aumento na temperatura da ferramenta.

Os insertos de moldes de Direct AIM confeccionados com a resina SOMOS 7110 tem uma temperatura de transição vítrea de 45 °C a 54 °C enquanto que os plásticos fundidos que são injetados na cavidade desses insertos tem uma temperatura de fundição que variam entre 180 °C e 250 °C. Portanto, para manter-se a rigidez estrutural da superfície de epóxi desses insertos do molde é muito importante esfriar os insertos rapidamente e uniformemente para uma temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea.

As máquinas injetoras utilizam água para a refrigeração do molde a vazões que variam entre 4 l/min e 10 l/min dependendo da peça e do material a ser injetado visando obter um significativo resfriamento do molde entre os ciclos de moldagem.

Ensaio de resistência a solventes com a resina SOMOS 7110 realizados pela Cibatoool comprovaram que ela é resistente a solventes não polares como o óleo da caixa de câmbio Aseol<sup>R</sup> 16-120, gasolina, e TPM que é um solvente usado na limpeza das peças feitas em estereolitografia. Testes empíricos realizados no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos(LASHIP) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina(UFSC), com a imersão de peças estereolitografadas em fluido hidráulico a uma temperatura ambiente média de 25<sup>0</sup>C durante 96 horas revelaram também a resistência da resina ao fluido Mobil DTE 24, utilizado na UPCH 25/1,67. A resina SOMOS 7110 não é higroscópica.

## **4.2 Proposição do Sistema de controle**

Com base nas informações da seção 4.1, propõe-se o controle de pressão na parte posterior dos insertos do molde usando fluido hidráulico em lugar dos tubos de cobre e do composto de epóxi. Deste modo, procurar-se-á garantir a resistência à deformação do inserto ao mesmo tempo em que se procurará que a variação da temperatura do fluido na parte posterior do inserto do molde não ultrapassará a 5 °C entre a entrada e a saída do molde, atingindo no máximo 35 °C.

Prevê-se a construção de um protótipo em que se tem como referência as pressões que ocorrem no interior da cavidade do inserto do molde estereolitografado. Esse protótipo que

a) a vida do inserto está relacionada com a sua resistência física, que não é grande, quando submetido às altas temperaturas comumente encontradas na injeção de termoplásticos.

b) as superfícies do inserto são relativamente macias e apresentam baixa resistência a erosão.

c) o preenchimento da parte posterior dos insertos com o composto de epóxi com alumínio, que melhora a resistência à compressão e auxilia a retirada de calor da peça, torna o processo não tão direto - da máquina de SL à injetora - pois é necessário esperar a cura do composto.

d) é importante a presença de um técnico de bom nível para realizar a mistura e aplicação da resina epóxi com o alumínio, pois esta reação é exotérmica e pode acarretar a degradação dimensional e mecânica do inserto;

e) as texturas que se pode obter para as superfícies internas dos insertos são limitadas.

### 3.4 Processo Direct AIM™ Aprimorado

Pesquisas estão sendo realizados por Lafratta (1997), visando o aprimoramento deste método e avaliando a viabilidade do uso de líquidos refrigerantes sob alta pressão no processo de injeção de termoplásticos utilizando Direct AIM™.

A solução proposta é o aumento do resfriamento dos insertos sem a necessidade de colocação de tubos de cobre e nem do preenchimento da parte posterior dos insertos com o composto de epóxi ou outro qualquer. Para tal, planeja-se a construção de um inserto que contenha os dutos de refrigeração, como ilustrado na figura 3. Estes dutos poderão ter as mais diversas formas.

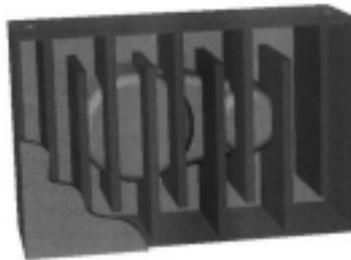


Figura 3 - Exemplo de dutos de refrigeração em resina fotocurável construídos na parte posterior do inserto (Lafratta, 1997).

## 4. SISTEMA DE CONTROLE DE PRESSÃO

### 4.1 Requisitos

Testes iniciais em protótipos de insertos de molde foram realizados por Dell’Arciprete *et al.*, (1998) para avaliar o projeto da peça e dos insertos do molde quanto às variações da pressão, da temperatura e do número de injeções.

A peça usada para este estudo foi projetada com as dimensões básicas de 101 mm x 50 mm x 19 mm com uma espessura de parede de 1,65 mm. Por sua vez, os insertos foram criados para serem preenchidos na sua parte posterior com um composto de epóxi e alumínio, embora pudessem também ser criados insertos sólidos. Os materiais empregados para a injeção das peças nos insertos de moldes foram o ABS (Dow Magnum 9010), e o Polipropileno (PP Union Carbide 7C12 N).

fotopolimerização de resinas à base de epóxi por um feixe de raios laser ultravioleta, cuja movimentação é controlada por um programa computacional (Jacobs, 1996).

O modelo CAD 3D da peça a ser construída, em formato STL (formato padrão para a estereolitografia), é trabalhado no equipamento de forma a analisar sua orientação espacial e o projeto dos suportes necessários para prendê-la à plataforma (Figura 2), bem como sustentar regiões da peça que ficam suspensas na resina líquida.

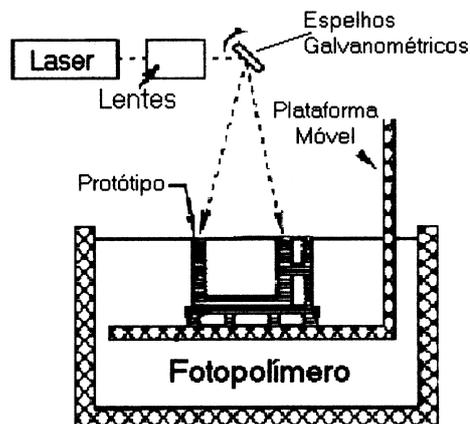


Figura 2 - Esquema de funcionamento do princípio de estereolitografia (Lafratta, 1997)

A fabricação da peça acontece à medida que o equipamento faz a leitura das camadas individualmente e transmite-as ao sistema de controle dos espelhos. Depois que uma camada é traçada, a plataforma é baixada para dentro do reservatório a um nível equivalente à espessura da camada subsequente, permitindo que a resina líquida cubra a última camada recém solidificada. A operação se repete, camada após camada, até que a peça seja finalizada.

### 3.2 Direct AIM™

Desenvolvido pelo Institute for Plastics Innovation - EUA em conjunto com a 3D Systems, o processo baseia-se na construção de insertos para injeção feitos em estereolitografia.

Com o arquivo CAD das cavidades necessárias para injeção da peça fabrica-se, pelo processo de estereolitografia, insertos em forma de casca que são montados em um porta moldes. Tubos de cobre para refrigeração são posicionados na parte posterior dos insertos e recobertos com um composto de epóxi misturado com partículas de alumínio que auxiliarão no resfriamento dos mesmos (Jacobs, 1996).

### 3.3 Aspectos importantes no processo de estereolitografia

A ferramenta produzida por SLA tem durabilidade limitada e, portanto, deve-se tomar cuidado para maximizar a quantidade de peças produzidas pela ferramenta.

Uma das variáveis de processo mais importantes que pode ser usada para determinar rapidamente o ferramental a ser produzido e o estado do processo é a pressão da cavidade (Saurkar *et al.*, 1998).

O processo em questão apresenta algumas limitações e pontos passíveis de aprimoramento que são comentados a seguir:

fundido. O material adicional que entra no molde flui ao longo da linha do canal enquanto as paredes do plástico já estão solidificadas. A pressão na cavidade aumenta com a adição da resistência ao fluxo enquanto preenche o restante da cavidade (Kamal & Kenig, 1972). Quando a frente do fundido alcança o final da cavidade, a fase de enchimento cessa e começa a fase de compressão. Um perfil típico da pressão na cavidade é mostrado na Figura 1b. A forma exata do perfil da pressão na cavidade depende de muitos fatores, tais como material, a forma geométrica do produto, os parâmetros do processo, e a localização do sensor de pressão.

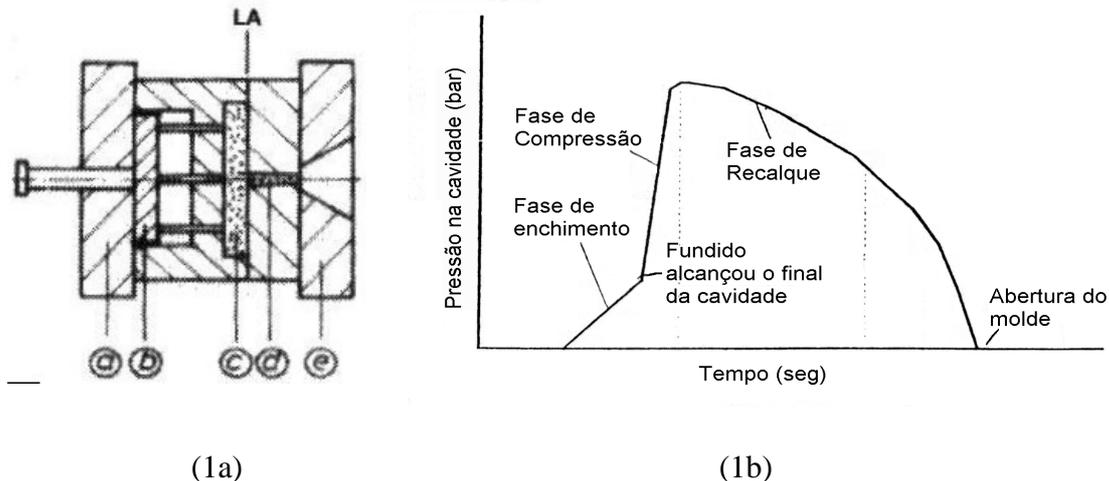


Figura 1 – Molde para injeção: (1a) Partes principais: a) placa móvel; b) sistema de extração; c) cavidade; d) canal de alimentação; e) placa fixa; LA: linha de abertura do molde. (1b) Perfil da pressão na cavidade (Qiu, 1993).

### B) Fase de Compressão

Uma vez que o material alcançou o final da cavidade, a pressão dentro do molde sobe abruptamente. Esta é acompanhada por uma queda repentina da resistência do fluxo na entrada do canal, resultando em uma elevação instantânea da força de abertura no molde (Fridolin & Frech, 1982). A rampa de pressão na cavidade versus a curva de tempo aumenta rapidamente na fase de compressão (Figura 1b).

A pressão de pico na cavidade é a máxima pressão na cavidade que acontece durante um ciclo num local específico dentro do molde. Isto é importante porque ela define a qualidade da peça.

### C) Fase de Recalque

Após a cavidade estar cheia e compactada, inicia a fase de recalque. A pressão é comutada para pressão de recalque, que é geralmente abaixo da pressão de compressão para evitar rebarbas. O nível da pressão de recalque determina quanto material adicional é forçado na cavidade após a cavidade ter sido preenchida com o encolhimento do material (Smith, 1993).

## 3. PROTOTIPAGEM RÁPIDA: Estereolitografia e Processo derivado

### 3.1 Estereolitografia (SL)

A estereolitografia é o processo de fabricação por Prototipagem Rápida mais difundido, permitindo uma confecção rápida de objetos sólidos tridimensionais em resinas, a partir de um modelo em CAD 3D, independente da complexidade geométrica da peça. Ocorre através da

No que diz respeito a produtos injetados, a tecnologia de RP vem sendo empregada para a confecção de insertos de moldes, o que vem sendo chamado de RT (*Rapid Tooling*). Um dos processos de RT obtidos a partir da estereolitografia é o processo Direct AIM (ver item 3.2), contudo, apresenta ainda algumas limitações como reduzida quantidade de peças fabricadas, longo tempo de resfriamento da peça moldada, restrição de materiais que podem ser utilizados para a construção dos protótipos, espessura mínima de 1,25 mm e máxima de 3,25 mm para a casca do inserto.

A pressão na cavidade é uma das variáveis mais importantes no processo de moldagem por injeção, sendo que o gráfico da pressão na cavidade pode ser usado para identificar falhas de máquinas e diagnosticar problemas de moldagem.

Assim, o presente trabalho busca apresentar o estudo dos requisitos básicos para controle da pressão na câmara posterior em insertos de moldes produzidos por estereolitografia e a proposição de soluções para o controle eletro-hidráulico, empregando componentes hidráulicos industriais. Para tal, apresenta-se inicialmente os tipos de máquinas e as fases do processo de moldagem por injeção e, posteriormente, discorre-se sobre a técnica de prototipagem rápida. Por fim propõe-se um sistema de controle de pressão.

## **2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO**

O processo de moldagem por injeção é muito complexo em função do grande número de variáveis que afetam a qualidade da peça moldada. De modo a obter-se um processo de moldagem por injeção estável e produzir peças com repetibilidade e alta qualidade, deve-se assegurar o aquecimento do material no interior do cilindro/parafuso de injeção para um bom enchimento e compactação do material na cavidade do molde (Qin Zou & Ari, 1995).

### **2.1. Tipos de Máquinas de Moldagem por Injeção**

As primeiras máquinas de moldagem desenvolvidas foram as do tipo embolo as quais utilizam um embolo no interior de um cilindro aquecido. Os grãos de plástico são fundidos quando entram em contato com o cilindro aquecido e em seguida o plástico é forçado a passar por um torpedo que ajuda a aquecer o plástico, entrando em seguida no molde (Blass, 1988).

Atualmente o tipo mais comum de máquina de moldagem é a do tipo parafuso. Neste caso o plástico é fundido usando a combinação da condução de calor das bandas de aquecimento envoltas ao cilindro e o aquecimento por atrito criado pela rotação do parafuso no interior do cilindro. Este segundo método de aquecimento pode fundir muito mais plástico do que só pelas bandas de aquecimento.

### **2.2. Processo de Moldagem por Injeção**

A moldagem por injeção é um processo dinâmico e cíclico que pode ser dividido em quatro fases sucessivas: plastificação, injeção, resfriamento e extração da peça. Por sua vez a fase de injeção contém três etapas principais: enchimento, compressão e recalque (Plant & Maher, 1975).

#### **A) Fase de Enchimento**

Durante a fase de enchimento, os plásticos fundidos enchem a bucha de injeção e o sistema de canal e então entram na cavidade (Figura 1a). Quando a camada do plástico entra em contato com a superfície fria da cavidade ela esfria rapidamente enquanto o núcleo central permanece

## **CONTROLE DE PRESSÃO EM MOLDES OBTIDOS A PARTIR DE ESTEREOLITOGRAFIA**

**Edivaldo Feitosa Pereira, Eng.**  
**Victor Juliano De Negri, Dr. Eng. Mec.**  
**Carlos Henrique Ahrens, Dr. Ing.,**

Universidade Federal de Santa Catarina – Depto. de Eng. Mecânica  
LASHIP – Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos  
Florianópolis – SC. Caixa Postal 476 - CEP 88.040-900  
Fone: (48) 331-9396 – Fax: (48) 234-1519  
Florianópolis – SC – E-mail: edivaldo@emc.ufsc.br

Código do tema: T12 - Projeto de Sistemas Mecânicos

### **Resumo**

O presente artigo apresenta o estudo dos requisitos básicos para o controle de pressão na câmara posterior em insertos de moldes produzidos por estereolitografia e propõe a utilização de um sistema de controle eletro-hidráulico. O referencial teórico utilizado é o Direct AIM<sup>TM</sup>, que se baseia na construção de insertos para injeção feitos em estereolitografia, na hidráulica e na termodinâmica. O aprimoramento deste método visa encontrar uma refrigeração melhorada do inserto sem a colocação de tubos de cobre e sem o preenchimento da parte posterior dos insertos com o composto de epóxi e alumínio. No método proposto, o fluido refrigerante circulará na câmara posterior do inserto do molde, diretamente em contato com este. A vazão do fluido refrigerante será controlada a fim de compensar a pressão de injeção da câmara anterior e desta maneira minimizar deformações no inserto. Utilizar-se-á um sistema de controle eletro-hidráulico automatizado para controlar a pressão da câmara posterior através de uma válvula de alívio proporcional. Os resultados esperados a partir dos estudos teóricos apresentados neste artigo permitirão a viabilização e a construção de um inserto estereolitografado com controle da pressão na sua parte posterior.

**Palavras chaves:** controle de pressão, insertos estereolitografados, hidráulica.

### **1. INTRODUÇÃO**

Transformar uma idéia em um produto que possa rapidamente ser lançado no mercado é uma questão, hoje, de importância capital, e a prototipagem rápida é uma das melhores maneiras de fazê-lo.

Criada no final da década de 80, as tecnologias de Prototipagem Rápida (RP, *Rapid Prototyping*) surgiram para reduzir os atrasos de tempo inerentes às reiteraões e otimizações de projetos necessários para criar produtos de alta qualidade.