

## **DIMENSIONAMENTO DE CANAIS DE REFRIGERAÇÃO NO PROJETO DE MOLDES DE INJEÇÃO: AVALIAÇÃO COMPARATIVA ATRAVÉS DE SISTEMAS CAE VISANDO APLICAÇÃO EM PROCESSOS DE FABRICAÇÃO RÁPIDA DE MOLDES-PROTÓTIPOS**

**Carlos H. Ahrens<sup>1</sup>, chahrens@emc.ufsc.br<sup>1</sup>**  
**Everson J. Fernandes<sup>1</sup>, everson@cimject.ufsc.br<sup>1</sup>**  
**Gean Vitor Salmoria<sup>1</sup>, gsalmoria@emc.ufsc.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), CIMJECT – Dep. Eng. Mecânica, 88040-900, Florianópolis, SC, Brazil

**Resumo:** No processo de moldagem por injeção um material plástico é aquecido à alta temperatura e injetado nas cavidades de um molde metálico, responsável por dar a forma geométrica à peça a ser moldada. Ao entrar em contato com as paredes da cavidade do molde, o plástico vai sendo solidificado em decorrência da transferência de calor para o molde. Para que o molde se mantenha na temperatura correta durante a moldagem, este é dotado normalmente de um sistema de canais de refrigeração, para circulação de água, responsável por extrair o calor do molde. O dimensionamento correto do sistema de refrigeração é considerado como de fundamental importância pelo fato de que a etapa de refrigeração é a que consome maior tempo no ciclo de injeção e uma refrigeração inadequada pode causar defeitos na peça como, empenamento e tensões internas. Vários autores sugerem o uso de equações ou tabelas de valores de referência para estabelecer a disposição e as dimensões dos canais de refrigeração. Contudo, a prática do setor consiste em dimensionar fundamentalmente de forma empírica. Este trabalho buscou avaliar a possibilidade de aplicar, no projeto e fabricação rápida de moldes-protótipos não-metálicos, uma metodologia proposta para determinar o dimensionamento de canais para o sistema de refrigeração de moldes metálicos para injeção de termoplásticos. Para avaliar a metodologia dois corpos-de-prova, um de geometria complexa e outro mais simples, e os respectivos sistemas de refrigeração sugeridos pela metodologia foram modelados em sistema CAD/CAE e comparados para moldes metálicos e moldes vazados em resina epoxidica. Os resultados comprovaram a validade da metodologia quando empregada em moldes metálicos de geometria simples e mostraram que esta também pode ser utilizada para auxiliar no projeto dos canais de refrigeração para moldes-protótipos fabricados em materiais não-metálicos, sem desconsiderar a necessidade de otimizar o projeto através de softwares de CAE.

**Palavras-chave:** Moldagem por Injeção, Sistema de Canais de Refrigeração, CAE.

### **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente com o desenvolvimento de novos materiais as indústrias transformadoras de plásticos vêm ganhando maior espaço na produção industrial, bem como os produtos fabricados neste material tem grande aceitação de mercado. O processo mais utilizado para fabricação de componentes termoplásticos é a moldagem por injeção. Este processo é composto basicamente de uma máquina, denominada injetora, e um molde que da forma aos variados produtos. A injetora é responsável por elevar a temperatura do material plástico até a temperatura na qual este possa ser introduzido sob pressão nas cavidades do molde. Além de dar a forma ao produto, o molde possui a função de retirar o calor da massa fundida até que o produto solidifique e possa ser extraído. Este procedimento é válido tanto para a moldagem em moldes metálicos quanto em moldes não-metálicos utilizados na fabricação de pequenas quantidades de peças-protótipos moldadas, por exemplo, em moldes fabricados rapidamente por vazamento de resinas epoxídicas a partir de modelos de produtos fabricados por técnicas de prototipagem rápida, como descrito em AHRENS e VOLPATO (2007).

Para a retirada de calor os moldes normalmente são dotados de furos que formam um circuito de canais por onde deve circular um fluido refrigerante. Para o dimensionamento dos canais de refrigeração existem várias sugestões obtidas da prática ou da literatura especializada. SORS *et al*(sem data), por exemplo, sugerem que o diâmetro do canal de refrigeração deve ser de 8 a 25 mm e apresenta equações para calcular a eficiência do circuito em função do número de Reynolds. Já HARADA (2004) sugere que os furos devem manter uma distância mínima de 25 mm da parede do molde e a distância entre canais deve ser de 50 a 75 mm, sem indicar valores para o diâmetro dos canais. Já para FERREIRA (2004) o diâmetro dos canais deve ser de 6 a 18 mm. Este mesmo autor sugere que a distribuição dos canais de refrigeração deve obedecer a relação esquematizada na Fig. (1), onde para uma espessura S, a distância A dos canais até a superfície da cavidade deve estar entre 0,8 e 2,5 vezes o diâmetro D dos canais enquanto que a distância B

entre os canais deve estar entre 2,5 e 3,5 vezes o diâmetro D. Recomendações de valores para o comprimento dos canais são praticamente inexistentes.

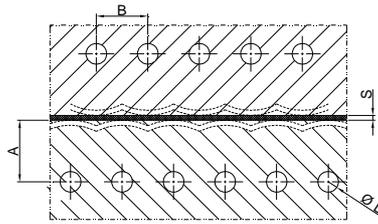


Figura 1. Distribuição dos canais de refrigeração

### 1.1. Metodologia Proposta por MYLLA

Em busca de uma alternativa para orientar o projeto e dimensionamento de canais de refrigeração em moldes metálicos, MYLLA (1998) propõe uma metodologia de cálculo, com base em recomendações da literatura. Esta metodologia propõe que sejam seguidas as seis etapas descritas a seguir.

#### Etapa 1 – Cálculo do tempo de resfriamento:

O autor considera que este deve ser o menor possível, visto que o tempo de resfriamento é a maior parcela dentre os tempos existentes em um ciclo completo de moldagem. Para calcular sugere utilizar a equação

$$t_c = \frac{s^2}{\alpha_{ef}\pi^2} \ln\left(\frac{8}{\pi^2} \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W}\right) \quad (1)$$

Onde:

$t_c$  = tempo de resfriamento [s]

$s$  = espessura [mm]

$T_M$  = temperatura de injeção [°C]

$T_W$  = temperatura do molde [°C]

$T_E$  = temperatura de extração [°C]

$\alpha_{ef}$  = difusividade térmica efetiva [mm<sup>2</sup>/s]

#### Etapa 2 – Cálculo do calor gerado pelo termoplástico:

Mylla (1989) considera uma situação ideal em que todo o calor gerado pelo plástico injetado deve ser retirado pelo sistema de resfriamento, de modo a desprezar qualquer outro tipo de perda ou fornecimento de calor. Para calcular sugere utilizar a equação:

$$q_{ks} = \Delta h \frac{m_{ks}}{t_c} \quad (2)$$

Onde:

$q_{ks}$  = calor gerado pelo termoplástico [W]

$\Delta h$  = diferença de entalpia [KJ/Kg]

$m_{ks}$  = massa injetada no molde [Kg]

#### Etapa 3 – Cálculo da vazão do fluido de resfriamento:

Uma vez calculado o calor gerado pelo termoplástico a metodologia propõe que a vazão do fluido necessária para extrair todo este calor pode ser calculada pela equação:

$$m = \frac{q_{ks}}{c(T_{c\ out} - T_{c\ in})} \quad (3)$$

Onde:

$m$  = vazão mássica de fluido refrigerante [m<sup>3</sup>/s]

$c$  = calor específico do fluido refrigerante [KJ/Kg°C]

$T_{c\ out}$  = temperatura de saída do fluido [°C]

$T_{c\ in}$  = temperatura de entrada do fluido [°C]

#### Etapa 4 – Cálculo do diâmetro dos canais de resfriamento:

Estabelecido o valor da vazão mássica de fluido, o autor propõe determinar o diâmetro dos canais com a equação

$$D = \frac{4m}{\pi Re_D \mu} \quad (4)$$

Onde:

D = diâmetro do canal [m]

Re<sub>D</sub> = número de Reynolds (coeficiente representativo do tipo de fluxo do fluido refrigerante)

μ = viscosidade do fluido refrigerante [m<sup>2</sup>/s]

m = vazão mássica de fluido refrigerante [m<sup>3</sup>/s]

Etapa 5 – Cálculo do comprimento mínimo dos canais de resfriamento:

Para estimar o comprimento mínimo dos canais, a metodologia propõe que seja considerado um regime permanente de troca de calor, sugerindo o cálculo mediante a equação:

$$L = \frac{T_{Wmax} - T_{FR}}{q_{ks} \left( \frac{1}{k_M \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{4A}{D}\right)}} + \frac{1}{h\pi D} \right)} \quad (5)$$

Onde:

L = comprimento dos canais [m]

T<sub>Wmax</sub> = temperatura máxima das paredes do molde [°C]

T<sub>FR</sub> = temperatura do fluido refrigerante [°C]

q<sub>ks</sub> = calor gerado pelo termoplástico e fornecido ao molde [W]

k<sub>M</sub> = condutividade térmica do material do molde [W/m°C]

A = distância entre a superfície do molde e o canal de resfriamento [m]

D = diâmetro do canal [m]

h = coeficiente de troca por convecção [W/m<sup>2</sup>°C]

O coeficiente h deve ser calculado a partir da equação

$$h = \frac{Nu_D \cdot k_F}{D} \quad (6)$$

Onde:

Nu<sub>D</sub> = número de Nusselt (coeficiente representativo da transmissão de calor por convecção forçada)

k<sub>F</sub> = condutividade térmica do fluido de resfriamento [W/m°C]

D = diâmetro do canal [m]

Para determinar o número de Nusselt (Nu<sub>D</sub>) o autor sugere a equação

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (7)$$

Onde:

Pr = Número de Prandtl (para fluxo turbulento é considerado como sendo 1) e

$$f = [0,79 \cdot (\ln Re_D) - 1,64]^{-2} \quad (8)$$

Etapa 6 – Cálculo da eficiência do circuito dimensionado (diâmetro e comprimento mínimo dos canais)

Para avaliar a eficiência do circuito de canais calculado Mylla (1998) propõe calcular um percentual de eficiência. Para tanto, considera que este deve estar entre 2,5% e 5% para termoplásticos semi-cristalinos e entre 5% e 10% para termoplásticos amorfos. Em seu trabalho, sugere apenas o uso da equação 2.9 atribuída ao caso de geometrias consideradas predominantemente planas, sendo

$$j = 2,4 \cdot Bi^{0,22} \left( \frac{B}{A} \right)^{2,8} \left| \ln \left( \frac{B}{A} \right) \right| \quad (9)$$

Onde:

j = eficiência do circuito de canais (%)

Bi = número de Biot (coeficiente representativo de sistemas de troca de calor que combinam condução e convecção)

B = distância entre os canais [m]

A = distância entre o canal e a parede do molde [m]

Para determinar o “Bi” sugere a equação

$$Bi = \frac{h \cdot D}{k_M} \quad (10)$$

Onde:

h = coeficiente de troca de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>°C]

D = diâmetro do canal [m]

k<sub>M</sub> = condutividade térmica do material do molde [W/m°°C]

Para correlacionar a eficiência em termos de variação de temperatura é apresentada a equação:

$$\Delta T_W = T_W \frac{j}{100\%} \quad (11)$$

Onde:

T<sub>W</sub> = temperatura do molde [°C]

Embora a proposta de uma metodologia seja um passo para o projeto de canais de refrigeração, em seu trabalho, Mylla (1998) não apresentou proposta para peças mais complexas ou para moldes fabricados em materiais não-metálicos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Definição dos corpos-de-prova

Para avaliar a possibilidade de aplicação da metodologia proposta por MYLLA(1998) na fabricação rápida de moldes-protótipos, foram modelados em CAD dois corpos-de-prova, um com geometria complexa similar a um *mouse* e o outro com uma geometria mais simples, similar a uma tampa Fig. (2), ambos de espessura constante e igual a 2 mm e de mesma massa.

O material selecionado para a peça foi o Polipropileno (PP) PX0532 da empresa OPP Petroquímica S.A. Optou-se por este material, por ser bastante utilizado na indústria, ser um material de fácil processamento e fazer parte da base de dados do software de simulação.

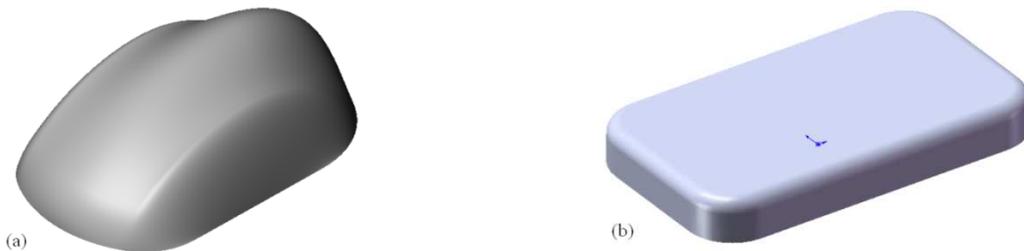


Figura 2. Corpos-de-prova: (a) *mouse* e (b) tampa.

### 2.2. Definição dos canais de refrigeração

Para ambos os corpos-de-prova foram dimensionados os canais de refrigeração com base nas equações da metodologia sugerida considerando a moldagem em moldes metálicos (aço P20) e em moldes fabricados por vazamento de resina epoxídica (.RenCast 436). Estes materiais foram selecionados em função de sua larga utilização na indústria de moldes e de fabricação rápida de moldes-protótipos..

Os valores de parâmetros de processamento do PP utilizados nos cálculos foram baseados nas recomendações existentes na base de dados do software *Moldflow* e apresentados na Tab. (1). Os resultados dos cálculos efetuados estão descritos na Tab. (2).

**Tabela 1 – Parâmetros de processamento do PP**

<i>Parâmetro</i>	<i>Recomendação</i>
Temperatura de injeção	225 °C
Temperatura de extração	120 °C
Temperatura do molde	35 °C
Temperatura do fluido refrigerante	20 °C

**Tabela 2 – Resultado dos cálculos - Metodologia proposta por MYLLA(1998)**

<i>Etapa</i>	<i>Equação</i>	<i>Mouse em P20</i>	<i>Mouse em epóxi</i>	<i>Tampa em P20</i>	<i>Tampa em epóxi</i>
Tempo de Resfriamento	2.1	6 segundos	6 segundos	6 segundos	6 segundos
Balanco de Energia	2.2	814 W	814 W	814 W	814 W
Vazão mássica de refrigeração	2.3	$3,9 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$			
Diâmetro do Canal	2.4	0,005 m	0,005 m	0,005 m	0,005 m
Comprimento dos Canais	2.5	0,354 m	0,415 m	0,354 m	0,415 m
Eficiência do Circuito ou Variação máxima da temperatura do molde	2.9	$j = 5,3 \% \text{ ou } \Delta T = 1,86^\circ\text{C}$	$j = 7,8 \% \text{ ou } \Delta T = 2,73^\circ\text{C}$	$j = 5,3 \% \text{ ou } \Delta T = 1,86^\circ\text{C}$	$j = 7,8 \% \text{ ou } \Delta T = 2,73^\circ\text{C}$

Nota-se na Tab. (2) que os resultados calculados para os moldes epoxídicos indicam que o sistema proposto não é eficiente, já que o material injetado é um termoplástico semi-cristalino e o valor  $j$  ultrapassa a faixa de valores recomendada que é de 2,5 a 5%. Também verifica-se que as dimensões do diâmetro para ambos os moldes é a mesma enquanto que o comprimento dos canais é ligeiramente maior para os moldes epoxídicos em decorrência da equação 2.5 considerar a condutividade térmica do material do molde.

### 2.3. Simulação de injeção

Visando comparar com resultados de simulação de injeção em software de CAE o circuito de refrigeração calculado (diâmetro, comprimento) foi incorporado ao modelamento das peças. Para a definição do *lay-out* do circuito foi utilizada a recomendação de FERREIRA (2004), descrita na Fig. (1), considerando neste caso a distância do canal até a cavidade (A) como sendo 2 vezes o valor do diâmetro (D) e a distância entre canais (B) como sendo 3 vezes o diâmetro (D). Os parâmetros de processamento foram os mesmos mostrados na Tab. (1) mantendo a mesma vazão mássica de fluido de refrigeração. Os dados de propriedade dos materiais empregados pelo software para desenvolver as simulações constam da Tab. (3).

**Tabela 3 – Propriedades dos materiais dos moldes para a simulação em CAE**

<i>Propriedades</i>	<i>Epóxi</i>	<i>Aço P20</i>	<i>Unidades</i>
Densidade	1,7	7,8	g/cm <sup>3</sup>
Calor específico	1000	460	J/(Kg.°C)
Condutividade térmica	0,8	29	W/(m.°C)
Módulo de elasticidade	6850	205000	MPa
Coefficiente de poisson	0,33	0,29	Adimensional
Coefficiente de dilatação térmica	$4 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	1/°C

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras (3) e (4) mostram a distribuição de temperatura nas paredes do molde para as quatro situações simuladas evidenciando as diferenças entre os valores.

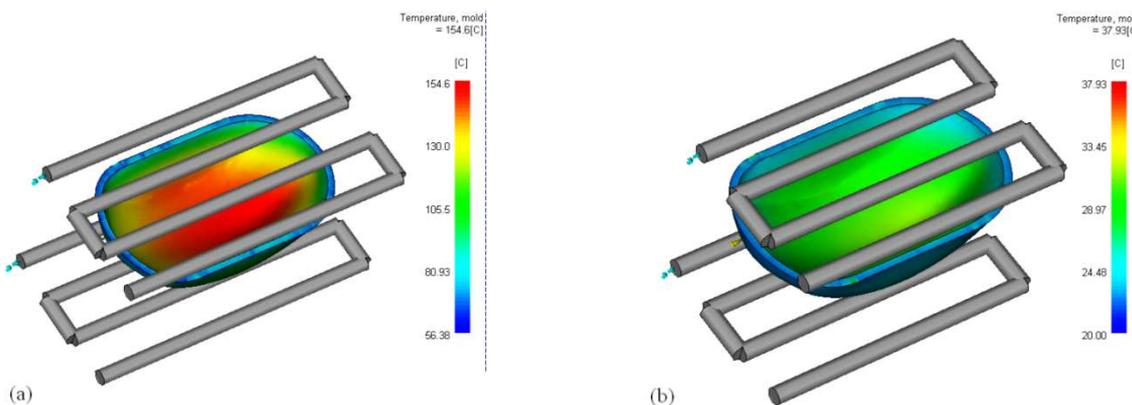


Figura 3. Comparação da variação de temperatura: (a) Mouse/epóxi, (b) Mouse/P20

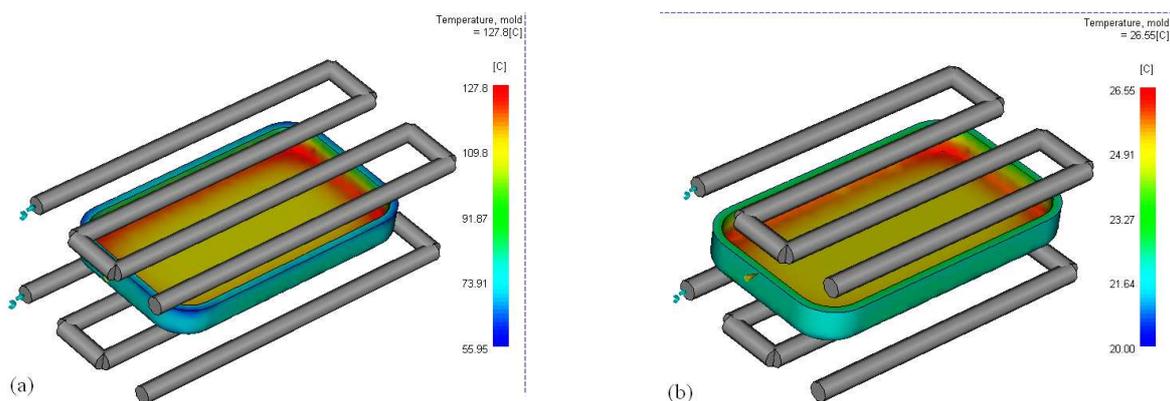


Figura 4. Comparação da variação de temperatura: (a) Tampa/epóxi, (b) Tampa/P20

A Tabela (4) apresenta uma comparação dos tempos de resfriamento e da eficiência dos circuitos (expressa em termos de variação máxima da temperatura do molde) para os valores calculados pela metodologia e os obtidos por simulação pelo software de CAE. Os resultados das simulações mostram que para os moldes metálicos os tempos de resfriamento se aproximaram dos calculados pela metodologia de MYLLA(1998). Entretanto, os valores mais elevados de eficiência do circuito obtidos pela simulação se justificam em função da metodologia considerar válido este cálculo apenas para peças de geometria predominantemente planas com os canais equidistantes de todas as paredes da peça. Observa-se que a geometria mouse apresenta valores de variação máxima de temperatura superiores quando comparada a geometria tampa, em função de maiores distâncias dos canais de refrigeração.

Tabela 4. Comparação dos resultados

Simulações	Tempo de Resfriamento Calculado (s)	Tempo de Resfriamento Simulado (s)	Variação máx. da temperatura do molde calculado (°C)	Variação máx. da temperatura do molde simulado (°C)
Mouse/P20	6	5,92	1,86	17,93
Mouse/epóxi	6	41,48	2,73	97,62
Tampa/P20	6	5,3	1,86	6,55
Tampa/epóxi	6	21,42	2,73	71,85

Em se tratando de moldes vazados em resina epoxídica tanto os resultados das simulações de tempos de resfriamento quanto os de eficiência do circuito apresentaram valores bastante diferentes dos calculados. Esta diferença significativa pode ser justificada em função do software de simulação considerar as propriedades do material do molde, que neste caso trata-se de uma resina de baixa condutividade térmica, como mostra a Tab. (3).

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar uma metodologia para o dimensionamento de canais de refrigeração visando sua aplicação na fabricação de moldes-protótipos obtidos por vazamento de resinas epoxídicas. Confrontando os resultados calculados com os provenientes de simulação em software de CAE, para dois tipos de geometria, foi possível concluir que a metodologia pode ser utilizada para estimar valores iniciais de diâmetro e comprimento dos canais de refrigeração em moldes não-metálicos. Contudo, ficou evidente a necessidade de otimizar o circuito de refrigeração, mediante o emprego de softwares de CAE, especialmente em geometrias com formas geométricas mais complexas. Estudos

complementares já estão em andamento no sentido de avaliar a metodologia buscando outros tipos de layouts dos canais, com soluções que permitam manter a distância dos canais de todo o circuito o mais equidistante possível das paredes da cavidade do molde.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

## 6. REFERÊNCIAS

- AHRENS, C.H.; VOLPATO, N. Ferramental Rápido. In: VOLPATO, N. Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: Edgar Blücher, 2007
- FERREIRA, E. C. Manual projectista: para moldes de injeção de plástico. Departamento de Engenharia de Polímero Universidade do Minho, 2004
- HARADA, J. Moldes para injeção de termoplástico: projetos e princípios básicos. Editora Artliber, 2004
- PEREIRA, L. E. C. Análise por sistemas CAE de pontos de injeção de seção retangular para moldes fabricados em resina termofixa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis- SC, Brasil, 2007.
- MILLA, A. Y. F. Influência do resfriamento na qualidade de peças termoplásticas moldadas por injeção, com estudo de caso em sistema CAE. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis- SC, Brasil, 1998.
- SORS, L. BARDÓCZ, L. RADNÓTL, I. Plásticos: moldes e matrizes. Editora Hermus (sem data)

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# **DIMENSION OF COOLING CHANNELS TO DESIGN OF INJECTION MOULD: AVALIATION COMPARATIVE UNDER CAE SYSTEMS AIMING APPLICATION UNDER PROCESS RAPID FABRICATION OF PROTOTYPE-MOULDS**

**Abstract:** *In the process of injection molding a plastic is heated to high temperature and injected into cavities of a metal mold, responsible for giving the geometric shape to the part. When contacting the mould cavity walls, the plastic solidifies as a result of the heat transfer to the mould. To extract the heat during the moulding process usually a channel cooling system with circulation of water is used. The correct sizing of the cooling system is considered to be of fundamental importance for the fact that the cooling step consumes more time in the hole injection moulding cycle and an inadequate cooling system can cause defects in the piece as warping and internal tensions. Several authors suggest the use of equations or tables of benchmarks to establish the arrangement and size of the cooling channels and the industry practice is namely on empirical basis. This work evaluates the possibility to apply a methodology proposed to determine the size of channels for the cooling system of injection moulding metal molds for thermoplastic in the design and fabrication of non-metallic rapid tooling Two geometries were investigated. The cooling system solution proposed by the methodology were modeled in CAD / CAE to comparison for metallic and non-metallic molds. The results confirmed the validity of the methodology when used in metal molds of simple geometry and showed that this can also be used to assist in designing the channels for the non-metallic rapid tooling applications, without disregarding the need to optimize the project through software CAE.*

**Key-words:** *Injection moulding, Cooling Channels, CAE.*