

# **SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE INJEÇÃO PLÁSTICA DE POLÍMEROS ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS**

1. Bruno Felipe Silva

CEFET-RJ, [bfelippe@bol.com.br](mailto:bfelippe@bol.com.br)

2. Hector Reynaldo Meneses Costa

CEFETRJ,[hectorey@ig.com.br](mailto:hectorey@ig.com.br)

3. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

CEFET-RJ. [raaguiar@cefet-rj.br](mailto:raaguiar@cefet-rj.br)

**Resumo.** O objetivo deste trabalho é avaliar um projeto de um molde para injeção de polímeros termoplásticos com o uso das ferramentas de desenho e engenharia auxiliados por computador. Será feita uma comparação de um objeto simples estudado com modelos analíticos de reologia e transferência de calor com os resultados encontrados no pacote computacional de simulação para a mesma peça. Posteriormente será mostrado o artefato que será produzido a partir do molde e conduzida a análise de algumas variáveis de interesse no projeto do molde. Os resultados mostram que é válida a utilização de pacotes computacionais para a concepção e dimensionamento de moldes de injeção de termoplásticos.

**Palavras chave:** Termoplástico, injeção plástica, simulação numérica

## **1. INTRODUÇÃO**

O processo de injeção consiste em aquecer o material plástico, junto com os seus aditivos de pigmentação, até à sua temperatura de fusão. Então, o material é injetado sob pressão em um molde com a forma do produto final. Finalmente, a peça é resfriada e retirada da cavidade. O estudo de seu comportamento, ao longo do processo, é importante para se determinar vários fatores como: o tempo de injeção, tempo de resfriamentos tensões no molde e por toda a máquina injetora, temperatura do molde, formação de bolhas .

O polímero apresenta dois comportamentos extremos. Para temperaturas elevadas, ele se comporta essencialmente como um fluido, enquanto para temperaturas baixas, ele se comporta como um sólido. No entanto, para temperaturas intermediárias apresenta um comportamento combinado. A reologia lidava inicialmente apenas com o estudo de fluidos, porém, atualmente a reologia de polímeros trata de estabelecer relações entre a cinética e a dinâmica de materiais que apresentam características intermediárias entre corpos elásticos e fluidos viscosos.

## **2. METODOLOGIA E RESULTADOS**

### **2.1. Estudo analítico do escoamento de um modelo simples**

As condições existentes no processo de injeção representam diversos problemas reológicos. A maior parte dos problemas encontrados no processo de injeção são muito complexos para ser solucionado com modelos analíticos. Deve-se considerar as dificuldades de se modelar matematicamente um fluido não-newtoniano incompressível com elevada temperatura fluindo por um canal de geometria complexa, cujas paredes possuem uma temperatura muito menor que aquela do material. Embora obter soluções exatas para muitos problemas de injeção não seja prático, pode-se conhecer melhor o processo de injeção por meio de aproximações e idealizações que concordam apenas em determinados casos com a experiência real.

Para se utilizar as ferramentas de simulação de injeção é necessário conhecer os fenômenos físicos envolvidos e ter algum conhecimento de modelos matemáticos, mesmo que simplificados para que seja possível a comparação com os resultados das simulações. Sendo o modelo de estudo complexo para estudos analíticos, será estudado um modelo simples de escoamento por um método analítico e os resultados serão comparados com a simulação da mesma geometria e as mesmas condições de processamento.

Os termoplásticos apresentam um comportamento reológico diferente dos fluidos ideais (newtonianos) que apresentam a viscosidade independente da taxa de deformação por cisalhamento. Os fluidos não-newtonianos não apresentam relação de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação por cisalhamento, sendo que o material estudado (polipropileno) reduz sua viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento.

A viscosidade é obtida de forma experimental e é mostrada sob forma de um gráfico em função da taxa de cisalhamento, conforme Figura 1. Esse gráfico mostra a viscosidade em função da taxa de cisalhamento para diferentes temperaturas do polipropileno encontrado comercialmente, sendo possível perceber que o material reduz sua viscosidade com o aumento da temperatura, porque seu escoamento é facilitado pelo aumento da mobilidade das cadeias poliméricas durante o processamento.

No gráfico a viscosidade apresenta uma região, de baixas taxas de cisalhamento, onde a viscosidade varia pouco com a variação da taxa de cisalhamento, esta região é chamada “patamar newtoniano” porque este comportamento é característico de fluidos newtonianos. Esta região pode ser modelada e estudada pelas equações de fluidos newtonianos.

Em seguida no mesmo gráfico existe uma região intermediária e a seguir observa-se uma região de acentuada redução da viscosidade com pequenas variações de taxa de cisalhamento, esta região é melhor modelada segundo a lei da potência ( Power Law).

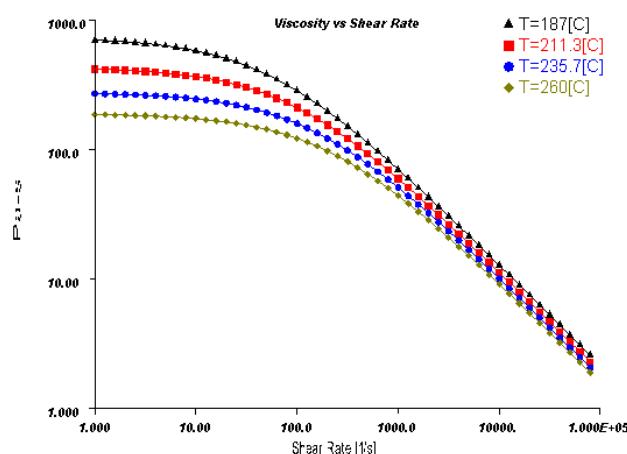


Figura 1. Gráfico de viscosidade (Pa.s) x taxa de cisalhamento (1/s).

Para modelos sólidos perfeitamente elásticos a relação entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ) é dada pela seguinte equação linear :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

onde  $E$  representa o módulo de elasticidade do material.

No modelo de fluidos viscosos perfeitos (newtonianos) em um escoamento isotérmico, a relação entre a taxa de cisalhamento ( $\dot{\tau}$ ) e a taxa de deformação por cisalhamento ( $\dot{\gamma} = dv/dy$ ):

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do material,  $v$  é a velocidade do fluxo e  $dv/dy$  é o gradiente de velocidade. A pressão de injeção é dada por:

$$P = 2L \tau / R \quad (3)$$

sendo  $P$  a pressão no canal,  $L$  o comprimento do canal e  $R$  o seu raio.

As taxas de deformação de cisalhamento nos canais de seção circular podem ser dadas pela seguinte equação :

$$\dot{\gamma} = 4Q / \pi R^3 \quad (4)$$

sendo  $Q$  a vazão e  $R$  o raio dos canais.

Existe um segundo modelo para fluidos viscosos que apresenta uma relação não-linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação por cisalhamento. Os fluidos que apresentam este tipo de comportamento são chamados fluidos não-newtonianos, para os quais a seguinte relação se aplica :

$$\tau = \tau_0 \cdot \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Embora o modelo de fluidos não-newtonianos esteja mais próximo do comportamento real dos polímeros, o modelo newtoniano apresenta, para alguns casos, uma aproximação satisfatória do comportamento destes materiais.

A combinação das características dos modelos perfeitamente elásticos e os fluidos newtonianos resulta em um material denominado viscoelástico. Este tipo de material é utilizado normalmente para representar o comportamento dos polímeros, neste modelo a tensão é uma função dada por:

$$\sigma = (\varepsilon, t) \quad (6)$$

sendo este comportamento denominado viscosidade não-linear.

Para o modelo estudado considerou-se um cilindro de raio igual a 0,005 m e comprimento de 0,4 m e um tempo de preenchimento de 20s a uma temperatura de 235,7°C em um escoamento isotérmico. Sendo o volume dado por:

$$V = \pi R^2 \quad (7)$$

encontra-se um volume total  $V = 3,1416e-5 \text{ m}^3$ , e a vazão  $Q$  é dada pela equação:

$$Q = V/t \quad (8)$$

chegando-se a  $Q = 1,5708e-6 \text{ m}^3/\text{s}$ . A taxa de cisalhamento, dada pela eq.4 é igual a:

$$\dot{\gamma} = 4x1,5708e-6/\pi*(0,005)^3, \dot{\gamma} = 16/\text{s}$$

Da Figura 1, verifica-se que esse valor encontra-se no patamar newtoniano, sendo possível a utilização da equação 4, o valor da viscosidade para a temperatura do estudo apresenta o valor de 233,5 Pa.s. Calcula-se então a tensão de cisalhamento pela equação:

$$\tau = 233,5 \times 16 = 3736 \text{ Pa} = 0,003736 \text{ MPa},$$

chegando-se finalmente ao valor da pressão de injeção a partir da equação 3:

$$P = 3736 \times 2 \times 0,4 / 0,005, P = 597760 \text{ Pa} = 0,59776 \text{ MPa}.$$

A simulação numérica para o modelo correspondente foi realizada no pacote computacional MPI 4.0 com elementos unidimensionais e mesmas dimensões geométricas, temperaturas e tempo do estudo analítico, chegando-se aos seguintes resultados:

A Figura 2 mostra o tempo de preenchimento em s. A escala lateral mostra o tempo para o preenchimento de cada ponto do modelo e as regiões vermelhas na peça mostram região de maior tempo de preenchimento e as azuis as regiões de menor tempo de preenchimento.

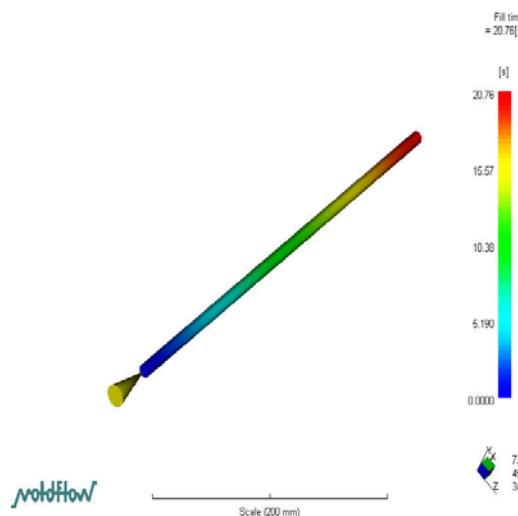


Figura 2. Tempo de preenchimento em s.

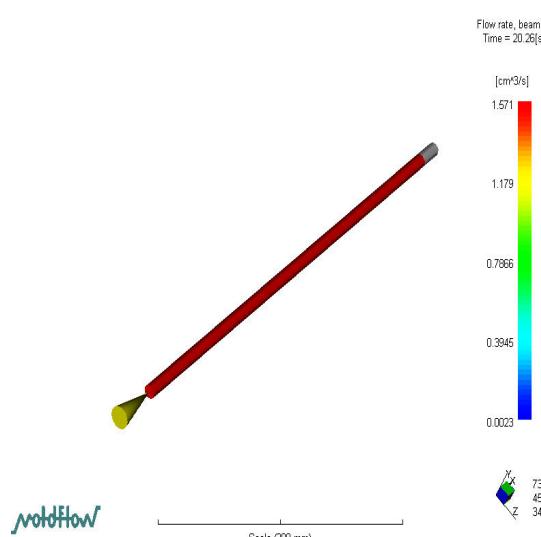


Figura 3. Vazão dada em  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

A vazão mostrada na Figura 3, é o volume de material por unidade de tempo. A escala lateral mostra os valores de maior vazão em vermelho e de menor valor em azul.

Na Figura 4 os resultados indicam a taxa de cisalhamento em 1/s, a escala lateral mostra as regiões vermelhas com maior valor e as azuis com os menores valores de taxa de cisalhamento.

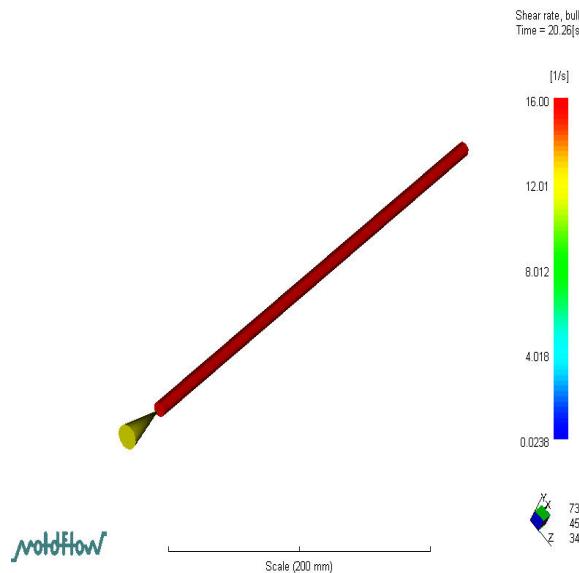


Figura 4. Taxa de cisalhamento em 1/s.

A seguir, na Figura 5, temos o resultado da simulação da tensão de cisalhamento em MPa, no momento máximo. A escala à direita mostra a escala de valores com o máximo em vermelho e mínimos em azuis.

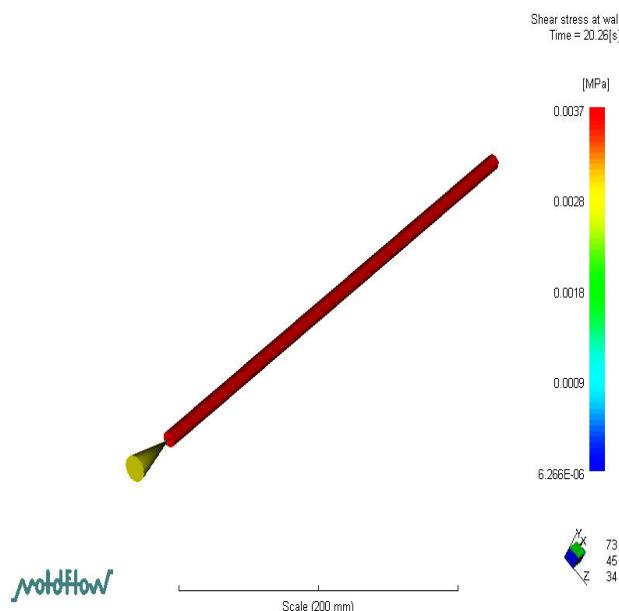


Figura 5. Tensão de cisalhamento em Mpa.

A Figura 6 mostra o resultado de pressão de injeção em MPa no final do preenchimento. O valor máximo é mostrado na escala lateral em vermelho, e o mínimo em azul.

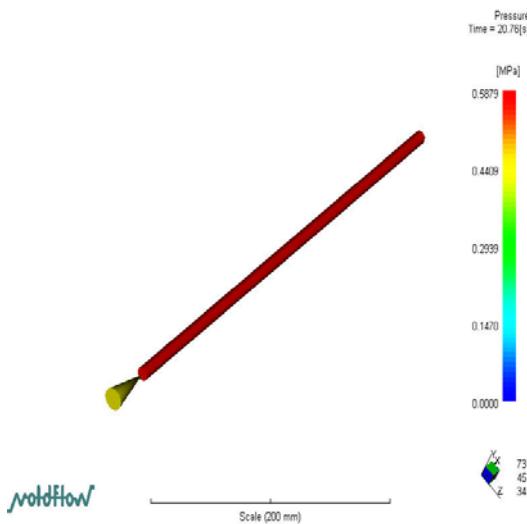


Figura 6. Pressão de injeção em MPa no final do preenchimento.

A Figura 7 mostra a pressão no ponto de injeção (eixo vertical) em função do tempo (eixo horizontal) com a pressão dada em MPa e o tempo em s.

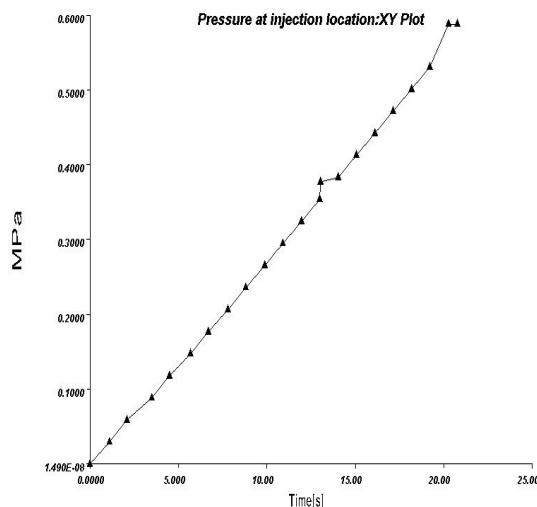


Figura 7. Pressão no ponto de injeção (MPa) em função do tempo (s).

Os resultados dos dois métodos de análise se mostraram bastante próximos com as seguintes diferenças: próximos de 0% para vazão, taxa e tensão de cisalhamento e 1,66% para a pressão de injeção.

## 2.2. Estudo analítico da perda de calor de um modelo simples e comparação com resultados numéricos.

Para este estudo será considerado um cilindro de raio 5 mm, comprimento de 400 mm e tempo de 20 s. No inicio da distribuição de temperatura na peça seja dada por  $T_f$  e a temperatura  $T_s$  no

ponto de injeção seja constante. Seja  $k > 0$  a condutividade térmica, finita do material, deve-se determinar a distribuição não estacionária de temperatura como função do comprimento  $x$  da peça e do tempo  $t$  e comparar com o resultado da simulação realizada no MPI 4.0 com a temperatura do molde (ambiente)  $T_s = 30^\circ\text{C} = 303,15^\circ\text{K}$  e temperatura do material  $T_f = 230^\circ\text{C} = 503,15^\circ\text{K}$ .

Pode-se simplificar o modelo para um unidimensional e considerar  $T = T(x, t)$  como função das variáveis  $x$  e  $t$ . Sabe-se que a distribuição de temperatura  $T = T(x, t)$  é a solução da equação de calor de Fourier :

$$a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

onde se considera  $a^2 = k$ . Tenta-se achar a solução da equação de calor na forma da função  $V(u)$  de uma variável  $u$ .

A solução da equação é dada pela função de erro de Gauss definida como:

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-p^2} dp \quad (10)$$

Para determinar as constantes  $C_1$  e  $C_2$  são usadas as condições iniciais de contorno:

$T(0, t) = \lim_{x \rightarrow 0^+}, T(x, t) = T_s$  e a condição inicial  $T(x, 0) = \lim_{t \rightarrow 0^+}, T(x, t) = T_f$ . Isto é, para  $t=0$  a temperatura da peça é toda constante igual a  $T_f$ , supondo-se  $a > 0$  e  $x > 0$

Reescrevendo sob a forma final :

$$T(x, t) = \frac{2(T_f - T_s)}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2a\sqrt{t}}} e^{-p^2} dp + T_s \quad (11)$$

Usando-se o pacote computacional MAPLE 5 para gerar as saídas gráficas (Figura 8), tem-se a distribuição das temperaturas em função do tempo e da profundidade. A linha vermelha no ponto de injeção, linha azul a 100 mm do ponto de injeção, linha magenta a 200 mm do ponto de injeção, linha amarela a 300 mm do ponto de injeção e linha verde a 400 mm do ponto de injeção. O eixo vertical é a temperatura em K e o vertical é o tempo em s.

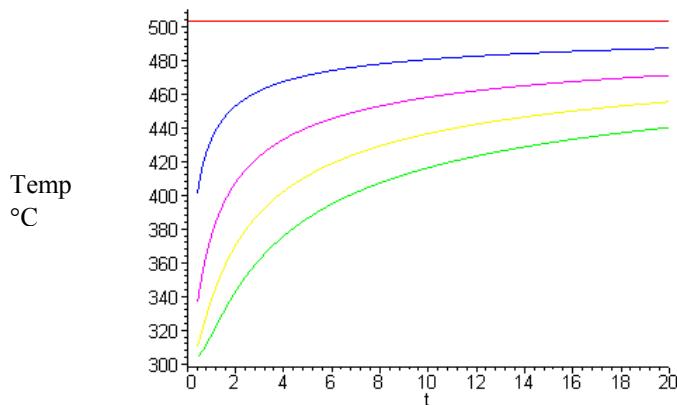


Figura 8. Resultado da distribuição de temperaturas (K) na profundidade da peça em diferentes profundidades em função do tempo (s).

A Figura 9, mostra a saída tridimensional do MAPLE 5 da distribuição de temperaturas na peça. O eixo x é a distância do ponto de injeção em m, t o tempo em s e o eixo vertical a temperatura em K. Na figura 10, temos os resultados final de distribuição de temperatura em função do tempo.

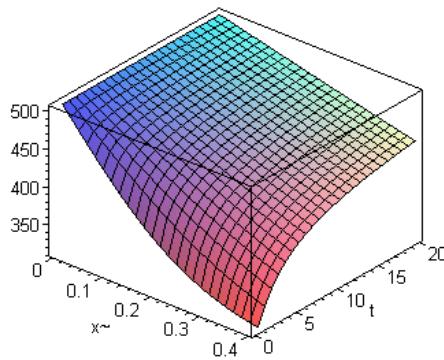


Figura 9. Saída gráfica tridimensional do estudo da distribuição de temperaturas na peça (K) em função da profundidade (m) e do tempo (s) em função da profundidade (m) e do tempo (s).

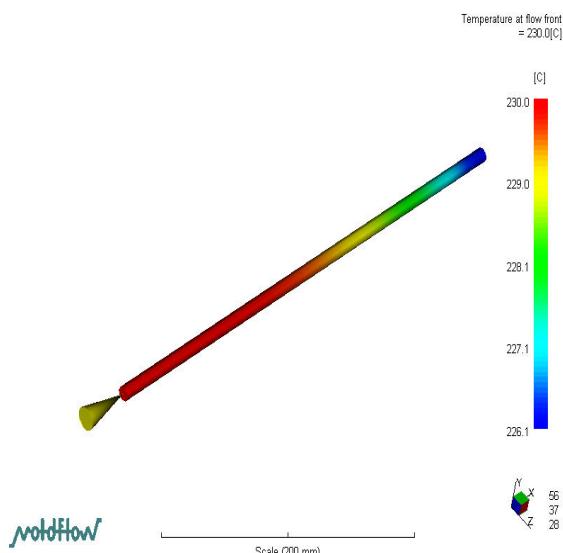


Figura 10. Resultado da distribuição de temperatura (°C) no modelo estudado por simulação numérica.

Segundo os resultados encontrados, no modelo analítico encontrou-se uma temperatura de 166,85 °C ( 440 K ) no final do modelo, e com o uso de análise numérica uma temperatura final de 226,1 °C, o que representa uma diferença aceitável, considerando as aproximações necessárias para o uso de cada método.

### 3. CONCLUSÃO

Os estudos apresentados mostram que as tecnologias de desenho e engenharia auxiliados por computador fornecem recursos úteis a projetistas e empresas de projeto de produtos e moldes para injeção de termoplástico.

A avaliação via métodos numéricos permitiu a obtenção de resultados bastante próximos aos analíticos quando se fazem as mesmas considerações, tornando os estudos numéricos válidos nos casos equivalentes.

É possível utilizar pacotes computacionais para injeção de termoplásticos para prever as condições de moldagem de produto e se reduzir tempo de desenvolvimento do molde.

O domínio do uso do pacote computacional não é suficiente, sendo necessário o conhecimento das variáveis físicas envolvidas para se fazer corretas considerações durante o modelamento.

#### **4. REFERÊNCIAS**

Crawford, R.J., 1998, “Plastic Engineering”, Ed. Butterworth Heinemann.

Cruz, M.S., 2000 “Otimização do Processo de Transferência de Calor na Fabricação de Compostos de Borracha”, Dissertação Tecnológica, Mestrado em Tecnologia, CEFET/RJ

Fox, R.W., McDonald, A.T., 1991, Introdução à Mecânica dos Fluidos, Ed. LTC.

SENAI, 1988; “Curso de Projetista de Moldesplásticos”, SENAI

#### **5. DIREITOS AUTORAIS**

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

### **Simulation of the process of plastic injection of polymers through finite elements**

Bruno Felippe Silva

CEFET-RJ, [bfelippe@bol.com.br](mailto:bfelippe@bol.com.br)

Hector Reynaldo Meneses Costa

CEFETRJ, [hectorey@ig.com.br](mailto:hectorey@ig.com.br)

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

CEFET-RJ, [raaguiar@cefet-rj.br](mailto:raaguiar@cefet-rj.br)

**Abstract.** The main goal of the present study is to evaluate a project of a mold for injection of thermoplastic polymeric with the use of the design and computer aided engineering tools. It will be made a comparison between a simple sample studied with analytical models of rheology and heat transfer by using the results found in the package simulation for the same sample. The object that will be produced starting from the mold and driven the analysis of some varied of interest in the project of the mold. The results show that it is valid the use of computational packages for the designing an injection mold.

**Keywords.** Thermoplastic , plastic injection, numeric simulation