

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS: COMPARAÇÃO DE FERRAMENTAS CAE

Diego Alves de Miranda, diegoalves_klx@hotmail.com¹

André Lourenço Nogueira, nogueira.a.l@hotmail.com¹

Carlos Maurício Sacchelli, carlos.sacchelli@gmail.com²

Maikol Funk Drechsler, maikoldrechsler@gmail.com²

¹ Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Campus Bom Retiro, Joinville – SC

² Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus Joinville, Joinville – SC

Resumo: A utilização de materiais poliméricos por diferentes segmentos da indústria tem crescido a cada ano devido a inúmeras vantagens, sendo a injeção de termoplásticos um dos processos mais empregados para viabilizar esta aplicação. Para que este processo seja eficiente e gere produtos de qualidade, é necessário que o material polimérico seja processado em um molde e máquina injetora adequada. O molde de injeção deve ser desenvolvido para cada produto injetado, o que o torna uma ferramenta de alto valor agregado, onde erros de projeto e fabricação devem ser evitados, pois afetam diretamente a qualidade e o custo do produto final. Neste sentido, nos últimos anos, ferramentas computacionais do tipo CAE (Computer Aided Engineering) voltados para a simulação do processo de injeção têm sido disponibilizados para os projetistas de moldes e de produtos. Desta maneira, este trabalho tem como objetivo realizar uma comparação entre dois sistemas CAE (SolidWorks Plastics e Moldflow Synergy), correlacionando os resultados simulados com os experimentais obtidos no processo de transformação de um produto injetado. O material utilizado foi o Poliestireno Cristal (GPPS), sendo processado em diferentes condições para fins de comparação dos valores das massas injetadas previstas pelas simulações, e avaliação dos desvios mássicos gerados. Os resultados alcançados demonstraram que ambos os softwares foram capazes de simular com precisão o processo de injeção estudado, apesar das pequenas diferenças nas massas injetadas previstas pelos softwares. Ambos os softwares testados foram incapazes de gerar resultados confiáveis em condições operacionais com baixas pressões de injeção devido às limitações dos modelos matemáticos em simular os fenômenos viscoelásticos do polímero.

Palavras-chave: Processo de Injeção, Simulação Numérica, Ferramentas CAE.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o consumo de termoplásticos vem crescendo conforme as demandas de produtos inovadores, e com o aumento do desenvolvimento de produtos e componentes em setores como o de eletrodomésticos, moveleiro e automobilístico.

Em inúmeros casos nos quais empresas fabricantes de moldes de injeção de termoplásticos não utilizam ferramentas CAE na fase de projeto, possíveis falhas no produto injetado somente são identificadas na fase de teste do molde. Essas falhas podem ser devido a um preenchimento incompleto das cavidades, ponto de alimentação ou canais de injeção mal localizados, bolhas de ar, defeitos causados por refrigeração inadequada das cavidades ou degradação do material injetado (Manrich, 2013).

Isso implica que o molde deve ser reprojetado e retrabalhado até que o mesmo seja capaz de injetar produtos sem falhas. O projeto de moldes de injeção de termoplásticos pode ainda estar inadequado para a máquina injetora, ou até mesmo ao material polimérico. Estes casos específicos ocorrem usualmente por falhas de comunicação e pela falta de avaliação adequada antes do processo de fabricação (Daré, 2001).

As empresas envolvidas na fabricação de moldes de injeção de termoplásticos buscam métodos para manterem-se competitivas atendendo as demandas e exigências dos clientes que compram seus produtos (moldes). Um projeto bem cuidadoso e detalhado de moldes de injeção acarreta em um alto nível de produção com baixo custo de manutenção. Para que isso ocorra, todos os fatores técnicos envolvidos no processo de desenvolvimento do projeto devem ser cuidadosamente avaliados, com intuito de minimizar quaisquer possibilidades de falhas no processo de injeção (Harada, 2004).

Atualmente, a engenharia de projetos de moldes de injeção tem garantido grande precisão na fabricação dos mesmos, tendo em vista que existem ferramentas CAE capazes de simular o processo de injeção de termoplásticos, o que tem gerado resultados muito significativos para auxiliar a execução destes moldes (Zhuang *et al.*, 2016).

Este tipo de análise computacional por meio de *softwares* de simulação de processos de injeção de termoplásticos é uma ferramenta cada vez mais aceita pelas indústrias transformadoras de plástico. Estes *softwares* são empregados principalmente no que se refere à otimização do projeto do molde, como também dos parâmetros empregados no processo de injeção do material no molde, permitindo aos projetistas desenvolver novas formas de fabricação de moldes com maior precisão (Nestle *et al.*, 2007). Graças ao avanço na tecnologia CAE, pode-se com relativa facilidade realizar

alterações de projeto nos moldes antes da fabricação, reduzindo assim o risco e custos associados ao trabalho do molde. Desta forma, é possível, desenvolver produtos e processos de melhor qualidade (Gomez-López *et al.*, 2013).

Contudo, será que as ferramentas CAE disponíveis apresentam resultados compatíveis? Assim, este trabalho tem como objetivo geral realizar a comparação dos resultados entre duas ferramentas CAE, nas quais as simulações são confrontadas com as médias de resultados experimentais de injeção.

2. ESTUDO DE CASO

Para a realização deste estudo foi utilizado o poliestireno cristal (GPPS), sendo comparados os resultados das massas de preenchimento das simulações confrontando com as massas de preenchimento das amostras de injeção. Os *softwares* utilizados foram o *Solidworks Plastics 2016* e *Moldflow Synergy 2016*, que possuem modelos matemáticos diferentes. Para a solução das simulações de injeção de termoplásticos nas cavidades dos moldes, os *softwares* calculam simultaneamente as equações da conservação de massa, energia e de movimento. Para calcular a pressão no preenchimento do polímero é utilizado o método dos elementos finitos, enquanto que para calcular a temperatura é utilizado o método das diferenças finitas. Para o cálculo do avanço da frente de fluxo, os *softwares* utilizam o método de volume de controle. (Solidworks, 2016; Moldflow, 2016).

A máquina injetora utilizada neste trabalho é do modelo HAITIAN – PL 860/270 C.

2.1. Geometria e Complexidade do Produto

A geometria do produto utilizado como caso de estudo neste trabalho foi a de um copo. Este produto pertence a uma empresa de bebidas da região de Joinville. O projeto deste copo foi realizado no *software CAD (Computer Aided Design) SolidWorks*. Na Figura (1) são apresentadas algumas imagens do produto estudado neste trabalho.



Figura 1 – Produto do estudo de caso realizado no Solidworks 2016.

Este copo é um produto considerado simples, sem geometrias complexas que influenciam diretamente na necessidade de estruturas mais detalhadas do molde de injeção, como por exemplo, insertos, postigos ou gavetas. Este modelo, de acordo com as geometrias do CAD, tem o volume de 66,56 cm³.

2.1. Material do Produto Injetado

O GPPS foi o material selecionado para confeccionar os copos, pois tem como principais características sua excelente processabilidade e transparência, além de boa fluidez mesmo quando submetido a ciclos rápidos. Na Tabela (1) são apresentados alguns parâmetros físicos e de processamento do GPPS, sendo estas informações importantes para o início do projeto do molde.

Tabela 1 – Propriedades Físicas e de Processamento do GPPS, Braskem (2015).

Parâmetros de Processamento		Propriedades Físicas	
Índice de Fluidez	14 – 18 g/10 min	Densidade	1,078 g / cm ³
Temperatura de Injeção	190 – 240 °C	Calor específico	2050 J / Kg . K
Pressão de Injeção	5 – 60 MPa	Cond Térmica	0,146 W / m . K
Pressão de Recalque	30 – 60 MPa	Módulo de Elástica	3.200 MPa
Temperatura do Molde	20 – 50 °C	Máxima Tensão de Cisalhamento	0,25 MPa
Contração	0,3 - 0,6 %		

De acordo com a Tabela 1, o polímero injetado possui a densidade de 1,078 g/cm³. Como o modelo do produto tem o volume de 66,56 cm³, a massa do modelo projetado e estudado neste trabalho é de 71,75 g.

2.2. Número de Cavidades do Molde

Como o molde possui duas cavidades, o volume de injeção será de $133,12 \text{ cm}^3$. Considerando que a máquina tem capacidade para um volume de injeção de 181 cm^3 , ela deve suportar a injeção deste molde com duas cavidades.

As cavidades do molde do copo foram executadas em aço AISI P20, que ainda passou por tratamento térmico de têmpera e revenido. Outro parâmetro que deve ser levado em conta é a massa de injeção. Como já foi calculada anteriormente, a massa de uma unidade de copo pesa em torno de 71,75 g e, portanto, duas unidades terão uma massa em torno de 143,50 g. Como o peso de injeção máximo da máquina é de 165 g, a mesma deverá suportar a injeção do molde com duas cavidades de copos.

2.3. Simulação Numérica

Para evitar problemas de injeção ainda na fase inicial de desenvolvimento do molde (fase de projeto), foi simulada a injeção do termoplástico nas cavidades do mesmo. Desta forma, para comparar as duas ferramentas CAE, um estudo de simulação do processo de injeção do molde do copo foi realizado utilizando o módulo *SolidWorks Plastics*, contido no próprio *software SolidWorks* e outro estudo utilizando o *software Moldflow Synergy*.

Para simular o modelo do produto injetado nas cavidades, deve-se desenvolver um domínio (casca) por onde o termoplástico irá fluir durante o processo de injeção. Com a casca da cavidade estabelecida, o domínio da simulação deve ser discretizado em pequenos subdomínios, chamados de elementos, o que leva à geração da malha de simulação do processo da injeção do termoplástico. As malhas possuem dois fatores: os elementos (*element*) e os nós (*node*). Cada triângulo da malha formada é conhecido como elemento, e cada ponto de ligação entre os triângulos, localizado nos vértices dos mesmos, é conhecido como nó. A Figura (2) demonstra como os elementos são criados a partir de nós.

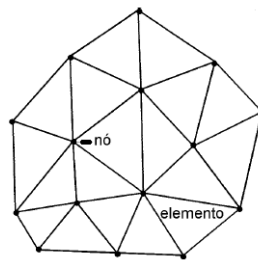


Figura 2 – Malha de elementos finitos. Adaptada de Maliska, 2004.

Existem dois tipos de malhas que podem ser geradas no *software*: as malhas sólidas e as malhas triangulares com casca. De acordo com Maliska (2004), a malha mais recomendada para ser aplicada é a malha triangular, sendo a mesma utilizada no presente trabalho. O tamanho dos elementos utilizados nas simulações deste estudo foi de 0,5 mm, o que gerou 1.174.846 elementos e 9.055.256 nós para o *software SolidWorks Plastics*, e 1.184.351 elementos e 9.167.302 nós para o *software Moldflow Synergy*.

O ponto de injeção de injeção ficou definido na parte inferior da cavidade fêmea, exatamente no centro do produto, para que não houvesse um desbalanceamento de massa. Porém, é necessário que os *softwares* reconheçam o local no qual o ponto de injeção foi posicionado, e qual o diâmetro (ϕ 1mm) de entrada ou alimentação (*gate*) por onde o termoplástico irá entrar nas cavidades. Estas informações são apresentadas na Figura (3).

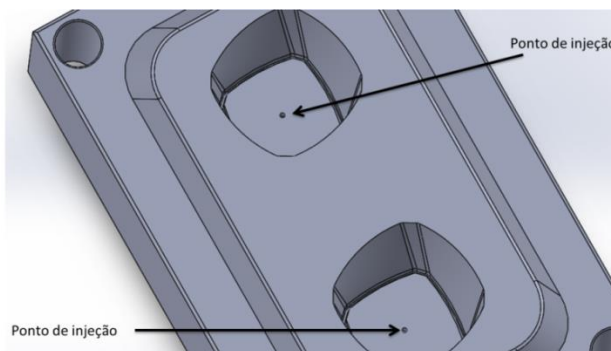


Figura 3 – Definição da localização do ponto de injeção.

A localização errada do ponto de injeção pode acarretar no desbalanceamento das cavidades, podendo comprometer a injeção do produto e causar deficiências de injeção do mesmo. A definição do local e do diâmetro do ponto de injeção é a última etapa a ser executada antes de se iniciar a simulação.

Outras informações que devem ser inseridas nas simulações são a fase de preenchimento (*fill*), empacotamento (*pack*) e eficiência de refrigeração (*cool*). Estes algoritmos podem ser simulados individualmente e combinados. O algoritmo utilizado neste trabalho foi determinado somente na fase de preenchimento (*fill*), para ambos os *softwares*. A Figura 4) representa o preenchimento de ambos os *softwares*.

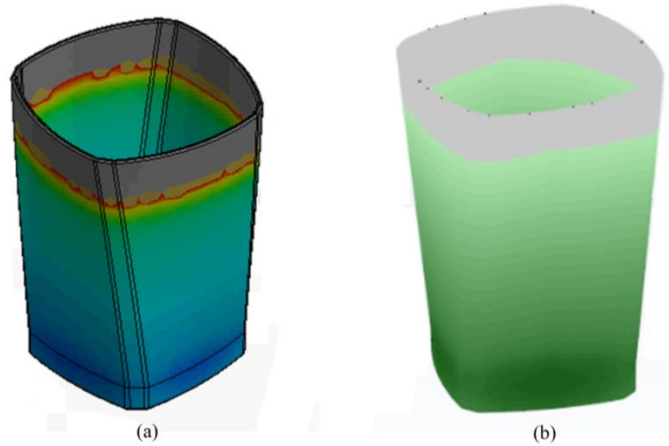


Figura 4 – Simulação de injeção de termoplásticos em *software* CAE. a) Preenchimento do copo no *Solidworks Plastics*, b) Preenchimento do copo no *Moldflow Synergy*.

2.4. Modelo Matemático de Escoamento

Para executar estes cálculos na fase de preenchimento das cavidades, é preciso assumir um fluxo não-isotérmico de um fluido não-Newtoniano, tendo como base as equações de conservação numa forma geral. As Eq. (1), (2) e (3), representam a conservação da massa, quantidade de movimento e conservação de energia, respectivamente:

Equação da conservação de massa;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Equação da quantidade de movimento;

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{u} = -[\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u}^2] - \vec{\nabla} P + [\vec{\nabla} \cdot \tau] + \rho \vec{g} \quad (2)$$

Equação da conservação de energia;

$$\rho C_v \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right] = -(\vec{\nabla} \cdot \vec{q}) - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \left(\frac{\tau}{\vec{v} \cdot \vec{u}} \right) \quad (3)$$

Em que ρ é a densidade (kg/m^3), u é a velocidade (m/s), t é o tempo (s), P é a pressão (Pa), τ é a tensão de cisalhamento (Pa), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), C_v é o calor específico em volume constante (J/kg.K), T é a temperatura (K) e q é o fluxo de calor (W).

As Eq. (1) e (3) são introduzidas nas simulações ainda com as seguintes condições:

- O escoamento é laminar;
- As forças gravitacionais são desprezíveis;
- O fluxo de calor é expresso pela lei de Fourier conforme demonstra a Eq. (4):

$$\vec{q} = -k \vec{\nabla} T \quad (4)$$

em que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura, e k é a condutividade térmica (W/m.K);

- A densidade, o calor específico e a condutividade térmica podem ser considerados constantes;
- O escoamento é considerado *quasi*-estacionário, pois o número de *Reynolds* característico do processo de injeção é muito baixo, permitindo que os efeitos convectivos provenientes da equação de quantidade de movimento possam ser desprezados.

Baseando-se nessas hipóteses, podemos fazer as seguintes ponderações para cada equação inicial, na qual as Eq. (5), (6) e (7) representam novamente a conservação de massa, quantidade de movimento e conservação de energia respectivamente (*Solidworks*, 2016; *Moldflow*, 2016):

Equação da conservação de massa;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (5)$$

Equação da quantidade de movimento;

$$-\vec{\nabla}P + [\vec{\nabla} \cdot \tau] = 0 \quad (6)$$

Equação da quantidade de energia;

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -k \nabla^2 T + \frac{\tau}{\vec{\nabla} \cdot \vec{u}} \quad (7)$$

Na equação da quantidade de energia (Eq. 7), o calor específico à pressão constante (C_p) substitui o calor específico a volume constante (C_v) pelo fato destes valores serem iguais em casos de fluidos incompressíveis.

2.4.1. Modelo Viscoelástico dos softwares

Consideram-se também as equações de estado reológico, que relacionem a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de deformação. De acordo com os softwares *Solidworks Plastics* e *Moldflow Synergy* como o escoamento no processo de injeção um escoamento cisalhante, a propriedade reológica relevante é a viscosidade em regime permanente de cisalhamento (η), desprezando as tensões normais e os efeitos elásticos. Pode-se calcular a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de acordo com a Eq. (8):

$$\dot{\gamma}^2 = \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^2 \quad (8)$$

Porém, os softwares calculam a viscosidade do polímero fundido com modelos matemáticos diferentes. Como a viscosidade é dependente da temperatura do polímero, para representar o comportamento viscoelástico dos polímeros, o Solidworks Plastics utiliza o modelo mecânico de Maxwell Generalizado Eq. (9), que é imposto para calcular a tensão de cisalhamento:

$$\frac{\tau_{xy}}{dt} = G \cdot \frac{d\dot{\gamma}_{xy}}{dt} - \frac{\tau_{xy}}{\lambda} \quad (9)$$

Em que G é a tensão de relaxamento de cada polímero e λ é o tempo de relaxação. Considerando que a equação do tempo de relaxação é dada pela Eq. (10):

$$\lambda = \frac{G}{\eta} \quad (10)$$

Substituindo a Eq. 9 na Eq. 10 tem-se a equação da viscosidade em função do tempo e da temperatura, dada pela Eq. (11).

$$\eta = \left[\frac{\tau_{xy} \cdot \alpha_t}{\dot{\gamma} - \left(\frac{\tau_{xy}}{G} \right)} \right] \quad (11)$$

Em que η é a viscosidade do polímero (Pa.s) e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento exercida pela tensão de cisalhamento (s^{-1}). Onde o α_t é a variável de tempo reduzida, e pode ser expressa pela aproximação de Williams Landel-Ferry Eq. (12). Em que:

$$\log(\alpha_t) = \frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{(C_2 + T - T_0)} \quad (12)$$

Em que T (K) é a temperatura de ensaio, T_0 (K) é uma temperatura de referência ou em alguns casos utiliza-se a temperatura de transição vítrea T_g , C_1 (adm) e C_2 (K) são constantes que dependem do tipo de cada material utilizado:

Considera-se que o escoamento *quasi*-estacionário ocorre por paredes estreitas. A principal desvantagem deste modelo está nas baixas tensões de cisalhamento. Apesar desta desvantagem, o modelo tem sido amplamente usado para modelagem de fluxo em moldagem por injeção.

Já no modelo viscoelástico utilizado pelo software *Moldflow Synergy*, a viscosidade em regime permanente não despreza as tensões normais e perda de carga por atrito. O modelo matemático de lei das potências é representado pela Eq. (13):

$$\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \cdot e^{c \cdot T} \quad (13)$$

Em que m é a consistência (adm), e c é uma constante dependente da temperatura, n é o índice de lei das potências, e quando $n < 1$, o polímero apresenta comportamento pseudoplástico, ou seja, quanto menor o valor de n maior será sua pseudoplasticidade.

Desta forma, as equações inseridas nos modelos de forma simplificada para o preenchimento das cavidades acabam

sendo representadas pelas Eq. (14), (15) e (14) (Solidworks, 2016; Moldflow, 2016):

Equação da conservação da massa;

$$Q = \rho w \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u_x dz + \rho L \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u_y dz \quad (14)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento;

$$\frac{\partial}{\partial z} \eta \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (15)$$

Equação da conservação de energia;

$$\rho \cdot Cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \cdot \gamma^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (16)$$

2.5 Parâmetros de Processamento para Validação

Para validar as simulações executadas com as amostras de produtos injetados, os seguintes parâmetros de injeção foram levados em consideração: pressão de injeção (P_{inject}), temperatura de injeção (T_{inject}) e temperatura do molde (T_{wall}). A pressão de recalque ($P_{holding}$) não foi alterada porque nos testes iniciais para escolha dos parâmetros, não houve alterações significativas do produto quando esta foi modificada. A pressão de recalque só apresentou mudanças no produto quando foi mantida em valores considerados baixos (0,1 a 5 MPa). Portanto, por ela não ter influência neste processo específico, e como o fabricante do material termoplástico recomenda a utilização de uma pressão de recalque entre 30 e 60% (Tabela 1), foi utilizado um valor médio correspondente de 45% da pressão de injeção para cada uma das condições de injeção.

Para controlar a temperatura do molde, foram instalados dois sensores de temperatura. Os dois termopares do tipo J foram inseridos em lugares diferentes da cavidade, com intuito de controlar a temperatura durante o processo de injeção.

Outra variável que foi mantida fixa no processo de injeção é a velocidade de injeção de 80 cm³/s, que seguindo a mesma justificativa da pressão de recalque, não apresentou diferenças significativas de alteração do produto durante os testes iniciais de injeção. Os valores para o restante das variáveis do modelo foram estipulados com base nos parâmetros relacionados na Tab. (1). Os parâmetros executados nas simulações e nos testes de injeção podem ser visualizados na Tab. (2).

Tabela 2 – Parâmetros de injeção utilizados para validação.

Parâmetros Variáveis			Parâmetros Fixos	
T_{wall} (°C)	T_{inject} (°C)	P_{inject} (MPa)	$P_{holding}$ (%)	$\dot{V}$ (cm ³ /s)
20, 30 e 40	190, 210 e 230	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60	45	80

Os resultados obtidos experimentalmente e através das simulações usando as condições operacionais apresentadas na Tab. (1), foram utilizados para comparar os valores mássicos resultantes dos dois softwares. No total, foram realizadas 216 simulações ($3T_{wall} \cdot 3T_{inject} \cdot 12P_{inject} \cdot 2S_{solidworks+moldflow}$) numéricas do processo considerando todas as combinações dos parâmetros operacionais apresentados na Tab (2). Com relação aos ensaios experimentais, cada condição operacional foi utilizada em 10 ciclos de injeção ($3T_{wall} \cdot 3T_{inject} \cdot 12P_{inject} \cdot 10_{ciclos}$), o que totalizou 1.080 amostras de copos de GPPS.

A principal grandeza física utilizada na validação do modelo matemático usado nas simulações foi a massa injetada dos copos. Desta forma, as massas simuladas foram confrontadas com os valores das massas reais obtidas nos experimentos de injeção, extraíndo assim o desvio de simulação. Os dados de massa de injeção foram usados para validar as simulações realizadas. Porém, para isso, os chamados desvios de simulação, foram calculados conforme a Eq. (17):

Desvio de simulação δ_s):

$$\delta_s = \left[\left(\frac{M_{sim}}{\bar{M}_{inj}} \right) - 1 \right] \cdot 100 = \% \quad (17)$$

Em que M_{sim} é a massa simulada pelo *software* (g), e $\bar{M}_{inj}$ é a média das massas injetadas (g). Estes cálculos foram utilizados para validar as simulações das amostras de copos de GPPS produzidas

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As simulações numéricas foram realizadas conforme os parâmetros de injeção apresentados na Tab. (2). Como a principal grandeza estudada no trabalho foi a massa, selecionou-se a massa de polímero injetada como parâmetro de qualidade do processo. A avaliação da influência dos parâmetros de processo foi realizada da seguinte maneira: para cada temperatura do molde, tanto a pressão de injeção quanto a temperatura de injeção foram alteradas, e as massas injetadas foram registradas. As Figuras (5), (6), e (7) apresentam os resultados das massas simuladas nas distintas condições operacionais (pressão e temperatura de injeção) para as temperaturas de molde de 20, 30, e 40 °C, respectivamente.

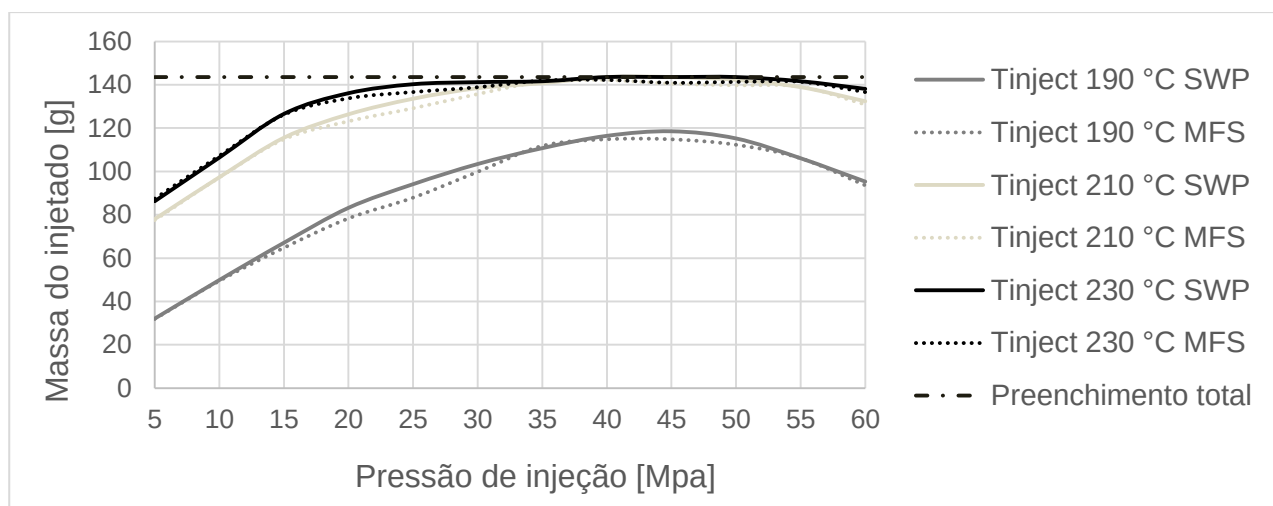


Figura 5 – Resultados das massas nas simulações da injeção do copo nos softwares *Solidworks Plastics* e *Moldflow Synergy*, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 20 °C.

Analisando a Fig. (5), quando as simulações são realizadas considerando a temperatura do molde de 20 °C, percebe-se que em baixas pressões o molde não consegue preencher a bem as cavidades, o que resulta em massas injetadas menores que as definidas para o produto. Outro apontamento é que as temperaturas de injeção de 190 e 210 °C também se mostram menos eficientes que a temperatura de 230 °C. Contudo, os resultados das massas das simulações tanto no *Solidworks Plastics* quanto no *Moldflow Synergy* ficaram bem próximas umas das outras. Na Figura (6) são apresentados os resultados das massas das simulações aumentando a temperatura do molde de 20 para 30 °C.

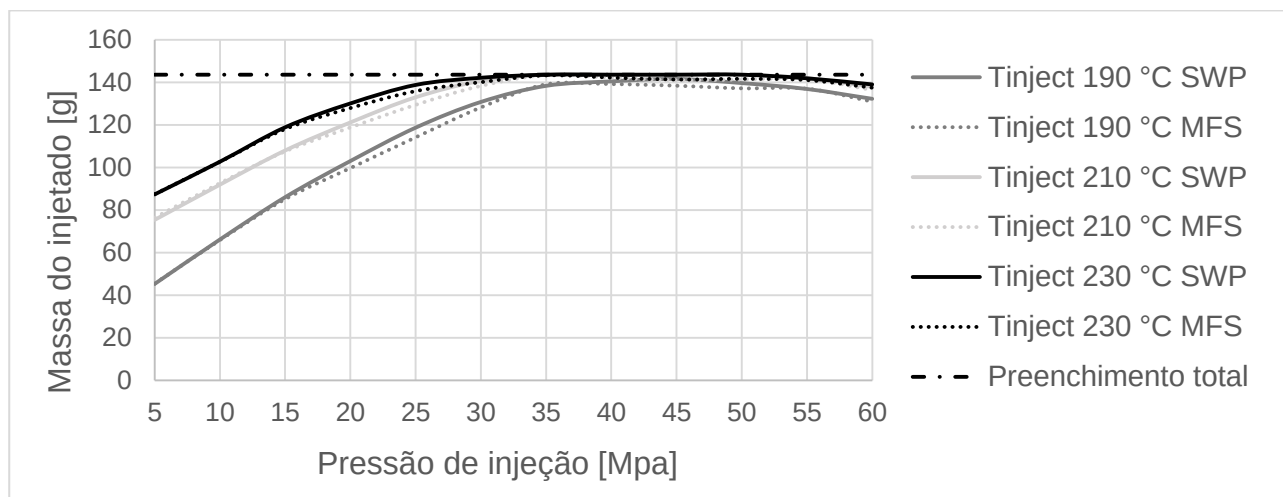


Figura 6 – Resultados das massas nas simulações da injeção nos softwares Solidworks Plastics (SWP) e Moldflow Synergy (MFS), variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 30 °C.

Novamente as pressões injeção baixas se mostram pouco eficientes no preenchimento total das cavidades. Entende-se que, segundo as simulações, as baixas tensões de cisalhamento não são suficientes para vencer a velocidade de escoamento do polímero, o que solidifica material sem terminar o preenchimento do molde. Em contrapartida, os dados mostram que há uma melhora significativa se comparados com os resultados da Fig. (5). Isto ocorre por que com o aumento da temperatura do molde, diminui-se a troca térmica entre a parede da cavidade e o polímero quente, melhorando o deslocamento das moléculas de GPPS. Outro ponto importante é que novamente as massas simuladas pelos dois softwares se mostram bastante semelhantes. Na Figura (7) são mostrados os resultados obtidos para a simulação com a temperatura do molde a 40 °C.

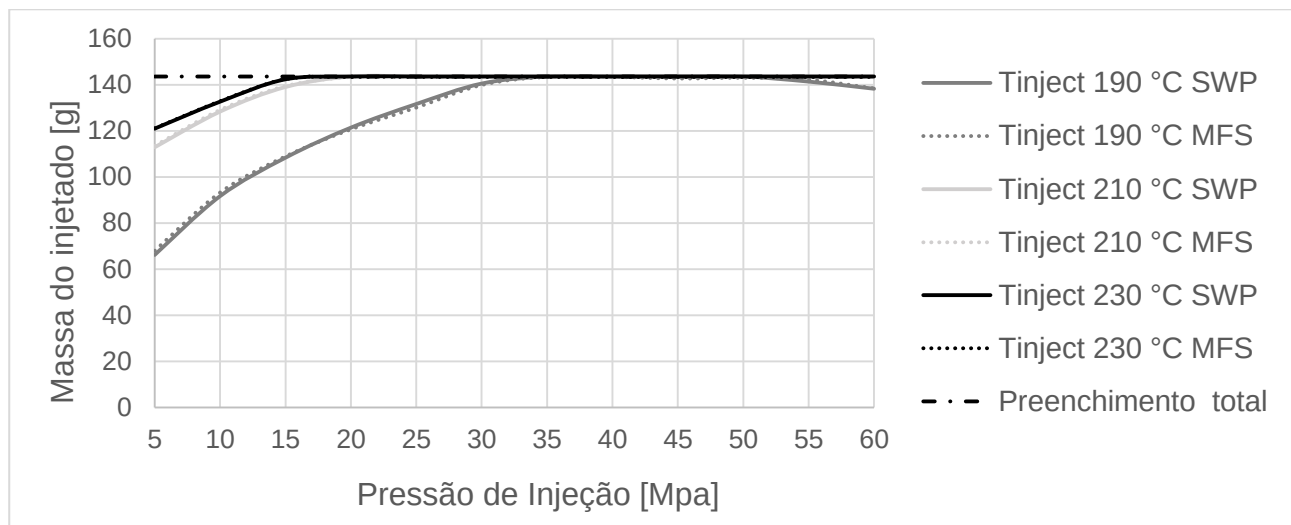


Figura 7 – Resultados das massas nas simulações da injeção nos softwares Solidworks Plastics (SWP) e Moldflow Synergy (MFS), variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C.

Analisando a Fig. (7), novamente nota-se que quanto menor for a troca térmica entre o polímero e as paredes das cavidades do molde, mais aquecido permanecerá o polímero nas regiões próximas às paredes do molde e, consequentemente, menores serão os valores de viscosidade da massa polimérica fundida. Como resultado, tem-se um melhor escoamento do polímero para dentro do molde e, com isso, uma maior eficiência de preenchimento do molde.

Observando as Figuras (5), (6) e (7), foi possível perceber uma semelhança entre os resultados gerados pelos dois softwares, uma vez que os métodos utilizados para a resolução dos modelos matemáticos são praticamente os mesmos. A única diferença é com relação ao modelo viscoelástico, no qual a perda de carga por atrito dos polímeros é levada em conta no Moldflow Synergy.

3.1 Desvio de Simulação

Para validar quantitativamente os resultados das simulações executadas nos *softwares Solidworks Plastics* e *Moldflow Synergy*, injeções nos copos em GPPS foram realizadas em uma máquina injetora da marca HAITIAN, modelo PL 860/270 C.

Para obter um melhor resultado experimental e garantir uma maior confiabilidade no processo de validação do modelo matemático, foram realizados 10 ciclos de injeção para cada condição operacional simulada. A cada ciclo, dois copos foram produzidos e pesados. Os valores das massas obtidas foram usados na Eq. (17) para calcular os desvios de simulação dos *softwares* comerciais. Desta forma, utilizando as médias das massas de injeção, pôde-se avaliar a capacidade de predição dos distintos modelos matemáticos viscoelásticos simulados nos *softwares Solidworks Plastics* e *Moldflow Synergy*.

Assim como nas simulações, os ensaios experimentais foram subdivididos em conjuntos de experimentos, onde cada um foi conduzido com uma temperatura específica de molde. Desta forma, foi possível avaliar se os modelos simulados estavam superestimando ou subestimando as massas injetadas, e mensurar o erro de predição dos modelos para as distintas condições operacionais testadas. Nas Figuras (8), (9) e (10) são apresentados os comportamentos dos desvios das simulações, em função dos parâmetros de processamento (temperatura e pressão de injeção), considerando as temperaturas do molde de 20, 30 e 40 °C.

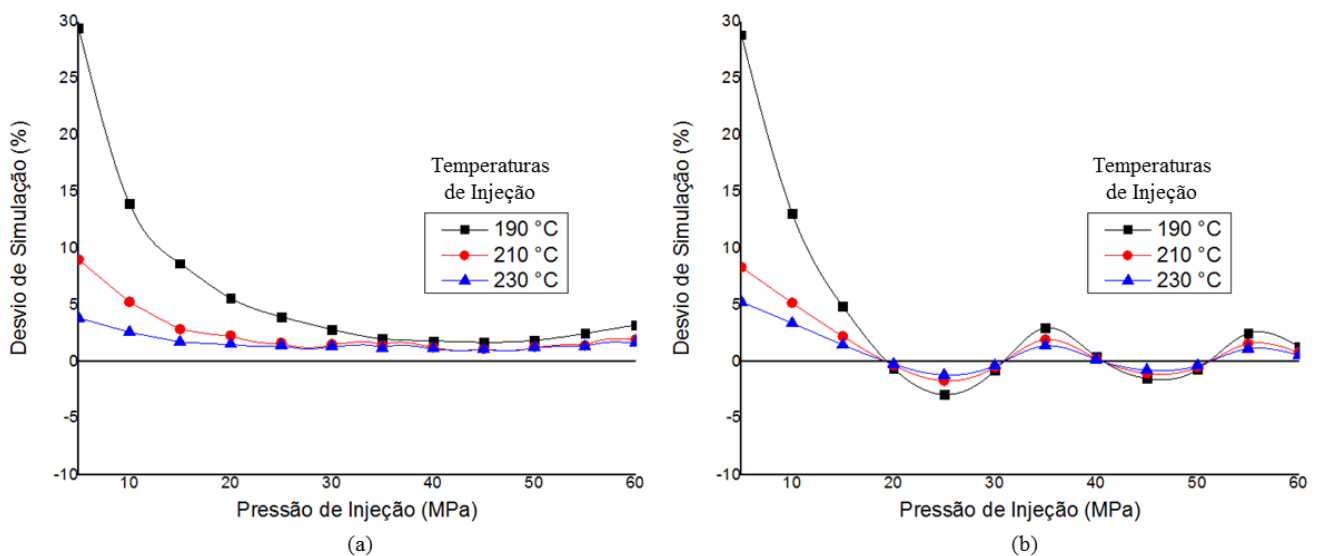


Figura 8 – Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção, considerando a temperatura do molde de 20 °C. a) Resultado no *Solidworks Plastics*, b) Resultado no *Moldflow Synergy*.

Observando os resultados apresentados na Fig. (8a), que representa somente o desvio de simulação no software *Solidworks Plastics*, percebe-se que o modelo matemático superestimou as massas simuladas em todas as situações testadas. Apesar disso, o modelo conseguiu reproduzir os comportamentos do processo de injeção real, no qual em baixas pressões a eficiência de injeção é menor. Contudo, o desvio de simulação diminui com o aumento da pressão e temperatura de injeção. Nestes casos, o percentual de preenchimento do molde aumenta e, conseqüentemente, tende a diminuir os desvios de simulação. Nas situações de pressões de injeção muito altas, nota-se um leve acréscimo nos desvios das simulações. Isso ocorre por que o modelo matemático não leva em consideração alguns fenômenos viscoelásticos como perda de carga por atrito. Em contrapartida, o *Moldflow Synergy* demonstrou ter um modelo matemático que mantém uma certa compensação de desvio de simulação, como mostram os resultados apresentados na Fig. (8b). Isto pode ser verificado, pois hora o modelo superestima as médias das massas injetadas, e hora o modelo sobrestima as mesmas, variando e aproximando os fenômenos de viscoelasticidade.

Na Figura (9) são apresentados os desvios de simulação dos *softwares*, considerando a temperatura do molde de 30 °C.

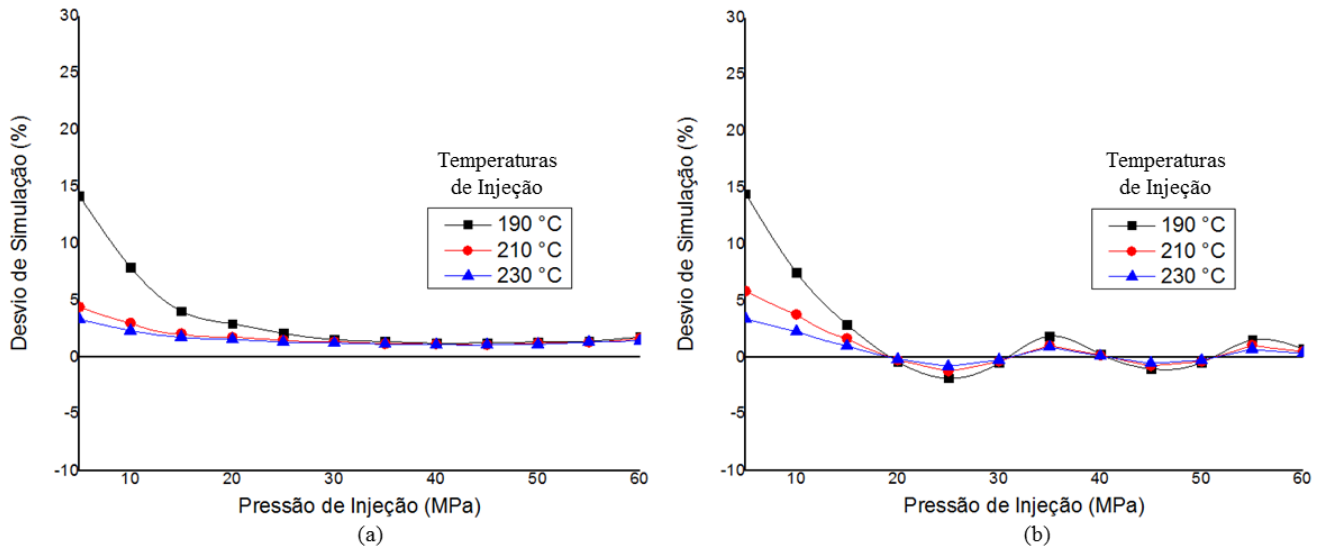


Figura 9 – Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção, considerando a temperatura do molde de 30 °C. a) Resultado no Solidworks Plastics, b) Resultado no Moldflow Synergy.

Apesar dos comportamentos observados na Fig. (9) apresentarem certa semelhança com aqueles verificados na Fig. (8), nota-se que o modelo matemático utilizado pelo software *Solidworks Plastics*, Fig. (9a), continua gerando resultados para as massas injetadas maiores do que as obtidas nos ensaios experimentais. A justificativa para esta superestimativa das massas injetadas recai na incapacidade do modelo matemático em lidar adequadamente com os fenômenos viscoelásticos, mesmo apresentando uma significativa melhora de predição nas condições de baixas pressões de injeção. O mesmo problema ocorre com as simulações executadas no *Moldflow Synergy* nas pressões iniciais de injeção, Fig. (9b). Apesar do software identificar o problema demonstrando os altos pontos de cisalhamento na cavidade, ele não é capaz de tratá-lo adequadamente do ponto de vista matemático, utilizando uma compensação que ora superestima e ora sobrestima o modelo.

Na Figura (10) são apresentados os desvios de simulação dos softwares, considerando a temperatura do molde de 40 °C.

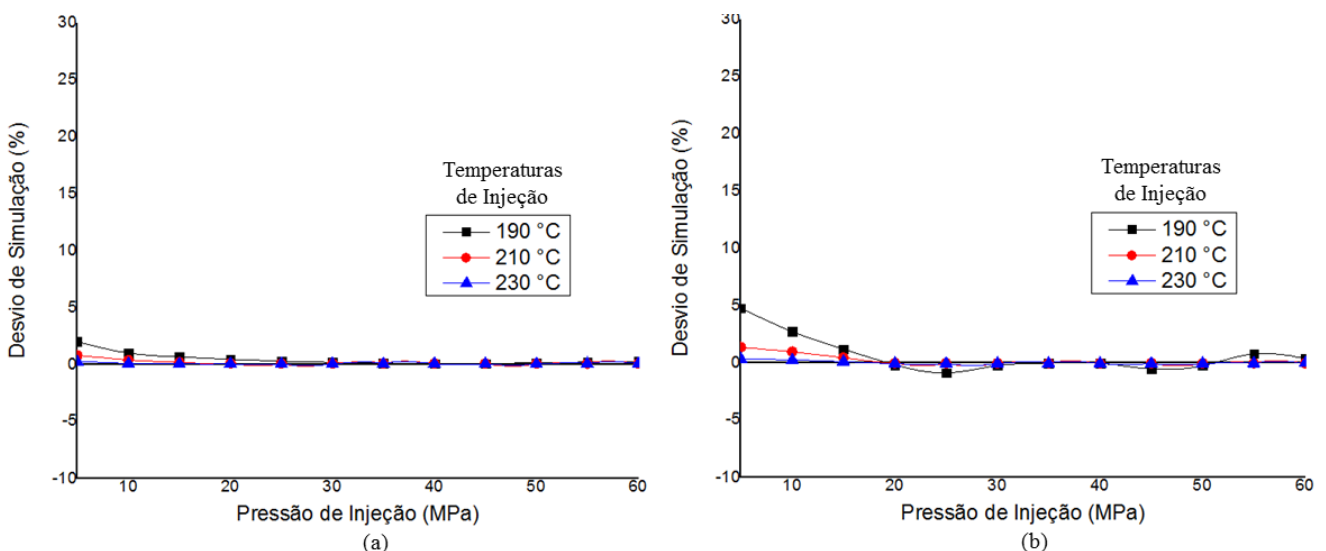


Figura 10 – Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C. a) Resultado do Solidworks Plastics, b) Resultado do Moldflow Synergy.

Comparando-se os desvios de simulação do software *Solidworks Plastics*, apresentados na Fig. (10a), com os resultados anteriores Fig. (8a) e (9a), percebe-se mais uma vez que o modelo superestimou as massas simuladas, mesmo que minimamente, devido sua deficiência em tratar adequadamente os fenômenos viscoelásticos. Porém, teve melhor desempenho que o *Moldflow Synergy*, conforme demonstram os resultados apresentados na Fig. (10b), principalmente na temperatura de 190 °C. Isso demonstra que em melhores condições de processamento, onde os fenômenos viscoelásticos estão afastados dos limites (taxa de cisalhamento elevada), os modelos conseguem representar de maneira mais adequada e confiável o processo de injeção, fornecendo informações com boa precisão das massas

injetadas. Desta forma, o modelo que obtém o melhor comportamento nessas condições é o *Solidworks Plastics*, não somente pelo fato de não oscilar o seu desvio de simulação, mas pelo fato de demonstrar pontos de seu desvio muito próximos de zero. Apesar disso, assim como para os casos anteriores, os dois modelos foram capazes de reproduzir o comportamento do processo de injeção variando-se a pressão e temperatura de injeção.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram observar como os parâmetros de injeção podem afetar a eficiência de um processo de injeção de termoplástico e afastar a realidade da idealidade de simulações indiferente do *software* utilizado. Em baixas temperaturas de injeção, o polímero perde suas características de líquido viscoso e começa a escoar como um semi-sólido, precisando de maiores pressões para vencer as tensões cisalhantes de movimento. Neste momento das simulações, o *Solidworks Plastics* utiliza um modelo matemático que superestima o processo de injeção, enquanto que o *Moldflow Synergy* dispõe de um modelo que compensa isso variando os fenômenos viscoelásticos.

Com relação às simulações com o molde do copo injetado em GPPS, os modelos apresentaram boas capacidades de predição do comportamento do processo tanto do ponto de vista qualitativo, quanto do ponto de vista quantitativo. Apesar do bom desempenho dos modelos, com resultados das massas injetadas que hora se encontram um pouco superiores e hora se encontram variando entre as médias obtidas experimentalmente, este comportamento pode ser considerado uma limitação dos modelos, mas não inviabiliza os seus respectivos uso como ferramenta de tomada de decisões.

A relativa boa proximidade nas simulações (baixo desvio de simulação) na condição de temperatura de molde de 40°C é resultado de um escoamento mais fácil do polímero fundido através das cavidades do molde pelo fato deste material estar adequadamente aquecido ao longo de toda a seção transversal da cavidade do molde. Quando a troca térmica entre a parede da cavidade e o polímero fundido diminui, aumenta-se a área da camada congelada e, consequentemente, facilita o escoamento do GPPS, aproximando assim os resultados experimentais com as simulações executadas pelos dois *softwares*.

Pelos resultados apresentados, vale a pena usar o módulo *Solidworks Plastics* única e precisamente por ter seu custo reduzido em relação ao *Moldflow Synergy*. Contudo, os valores de custo de cada *softwares* com seus respectivos pacotes adicionais, são questões que devem ser discutidas e negociadas de acordo com a necessidade de cada empresa.

5. REFERÊNCIAS

- Braskem. Ficha Técnica do Poliestireno Cristal (GPPS – 500), 2015.
- Daré, G., 2001, “Proposta de um Modelo de Referência para o Desenvolvimento Integrado de Componentes de Plásticos”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – UFSC, Florianópolis.
- Gomez-López, L. M.; Miguel, V.; Martinez, A.; Coelho, J.; Calatayud, A., 2013, “Simulation and Modeling of Single Point Incremental Forming Processes within a Solidworks Environment”, *Procedia Eng.*, n. 63, p632-641.
- Harada, J., 2004, *Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos*. São Paulo: Artliber.
- Maliska, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- Manrich, S. 2013, *Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes*. São Paulo: Artliber.
- Moldflow On Line Help. Autodesk Corporation, 2016.
- Nestle, K.; Hckmann, W.; Steininger, H. Knoll, K., 2007, “Towards quantification of butadiene content in styrene-butadiene block copolymers and their blends with general purpose polystyrene (GPPS) and the relation between mechanical properties and NMR relaxation times”, *Analytica Chimica Acta*, n. 604, p 54–61.
- Solidworks Instructor Guide. Solidworks plastics Handbook: Introduction to Solidworksplastics using simulation. 2016.
- Zhuang, X.; Ouyang, J.; Jiang, C.; Liu, Q., 2016, “New approach to develop a 3D non-isothermal computational framework for injection molding process based on level set method”, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, n. 30.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

COMPUTATIONAL SIMULATION OF THERMOPLASTIC INJECTION: COMPARISON OF CAE TOOLS

Diego Alves de Miranda, diegoalves_klx@hotmail.com¹

André Lourenço Nogueira, nogueira.a.l@hotmail.com¹

Carlos Maurício Sacchelli, carlos.sacchelli@gmail.com²

Maikol Funk Drechsler, maikoldrechsler@gmail.com²

¹ Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Campus Bom Retiro, Joinville – SC

² Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus Santo Antônio, Joinville – SC

Abstract: *The use of polymer materials by different segments of the industry has grown every year due to numerous advantages, being the injection of thermoplastics one of the processes most used to make this application viable. In order for this process to be efficient and generate quality products, it is necessary that the polymeric material is processed into a suitable mold and injection molding machine. The injection mold should be developed for each injected product, which makes it a high value-added tool where design and manufacturing errors should be avoided as they directly affect the quality and cost of the final product. In this sense, CAE (Computer Aided Engineering) computational tools for the simulation of the injection process have been made available to mold and product designers in recent years. In this way, this work aims to compare two CAE systems (SolidWorks Plastics and Moldflow Synergy), correlating the simulated results with the experimental results obtained in the process of transformation of an injected product. The material used was the Crystal Polystyrene (GPPS), being processed in different conditions for purposes of comparison of the mass values of the simulations and the mass deviations. The results shown that both softwares were capable to accurately simulate the injection process studied, despite of the small differences in the injected mass forecasted by the softwares. Both softwares were not able to produce reliable results in operational conditions considering low injection pressures due to the limitations of the mathematical models in simulating the polymer's viscoelastic phenomena.*

Key-words: *Injection Process, Numerical Simulation, CAE Tools, Simulation Deviation.*