



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
VIII-OKTOBERFORUM – PPGEQ



20, 21, 22 E 23 DE OUTUBRO DE 2009

**SIMULAÇÃO DO PREENCHIMENTO DE MOLDES DE INJEÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE
OPENFOAM**

Oliveira, J.A.P.¹, Favero, J.², Secchi, A.R.², Cardozo, N.S.M.¹

¹ Laboratórios de Simulação e de Tecnologia e Processamento de Polímeros

² Programa de Engenharia Química – COPPE/UFRJ

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,

E-MAIL: nilo@enq.ufrgs.br

Resumo: Foi verificada a possibilidade de utilização do solver *interFoam*, do pacote *OpenFOAM*, na simulação tridimensional do preenchimento isotérmico e incompressível de cavidades, utilizando malhas estruturadas. O *interFoam* possibilita captar a interface entre dois fluidos incompressíveis utilizando o método VOF. Foi verificada a influência da topologia e das dimensões da malha sobre a definição da frente de fluxo. Também foram comparados os resultados da simulação obtidos com o *interFoam*, em termos de pressão de preenchimento no ponto de injeção, com resultados apresentados na literatura. Observou-se que o solver utilizado é adequado para simular o preenchimento tridimensional de cavidades em processos isotérmicos de fluidos incompressíveis. Entretanto, a descrição adequada do deslocamento da frente de fluxo depende do modelo reológico utilizado, da topologia e do tamanho da malha.

Palavras-chave: moldagem, injeção, polímero, preenchimento, frente de fluxo, simulação, tridimensional, VOF, isotérmico, incompressível, *OpenFOAM*, *interFoam*

1. Introdução

O processo de moldagem por injeção de peças plásticas (poliméricas) é um dos mais importantes da indústria de processamento de polímeros. Este processo pode ser separado em três etapas: preenchimento do molde, recalque e resfriamento. Os moldes de injeção são ferramentas de geometria complexa e de custo muito elevado. Assim, softwares para simulação da etapa de preenchimento do molde constituem ferramentas imprescindíveis tanto para o projeto como para a otimização das condições de operação de moldes. Deste modo se procura evitar que estas atividades sejam efetuadas por tentativa e erro, com as óbvias conseqüências negativas em termos de qualidade e custo. A simulação do processo também ajuda a determinar parâmetros críticos para o processamento como, por exemplo, a pressão e a velocidade necessárias para injetar a peça. Estas informações são importantes para definir qual máquina pode ser utilizada para um determinado molde.

Em termos de otimização e análise detalhada do processo, são muitos os exemplos de aplicação de simuladores de escoamento em moldagem por injeção. Pode-se querer estudar a influência das temperaturas de injeção e do molde sobre a velocidade de preenchimento da cavidade para uma determinada pressão máxima de injeção, ou definir como se desloca a frente de fluxo

dentro da cavidade a partir da escolha da localização do ponto de injeção. Assim, pode-se analisar a formação de linhas de solda, homogeneidade da compactação da peça e localização de pontos de retenção de ar. Por isso, espera-se que a frente de fluxo seja definida da melhor maneira possível nas simulações realizadas. Para obtenção de uma interface bem definida é necessário utilizar células suficientemente pequenas e com menor razão de aspecto possível em todas as direções.

Outro resultado importante esperado destas simulações é a previsão de tensões residuais em função dos parâmetros de processamento (CAO et al., 2008, WANG & YANG, 2005). Os métodos existentes para a determinação experimental destas tensões são muito trabalhosos, limitados para peças planas e de pouca acurácia.

A maneira tradicional de simular o processo de injeção, muito comum em pacotes comerciais de CAE, é a utilização de modelos 2,5 D baseados na aproximação Hele-Shaw (ARAÚJO et al., 2008, CHANG & YANG, 2001, HIEBER & SHEN, 1980, KENNEDY, 1995, SHEN et al., 2001, ZHOU et al., 2008). Nestes modelos, a velocidade e a variação da pressão na direção da espessura (direção *z*) são desprezadas, resultando em um problema bidimensional, no plano de escoamento, de escoamento e fluxo de calor, acoplado a um problema adicional 1D de condução de calor, na direção da espessura.

Na maioria dos casos, os modelos 2,5D funcionam bem quando a peça tem paredes finas. Entretanto, com o desenvolvimento do processo de moldagem por injeção, as peças apresentam formas cada vez mais complexas e as variações de espessura são cada vez mais significativas. Como resultado, tanto a velocidade como a variação de pressão na direção da espessura devem ser considerados, e a aproximação Hele-Shaw deixa de ser válida. Nestes casos, faz-se necessária uma modelagem 3D para simulação da moldagem por injeção (CHANG & YANG, 2001, ZHOU & ZHANG, 2008).

Alguns estudos têm sido realizados visando a simulação tridimensional do processo de injeção, utilizando diferentes métodos numéricos. ZHOU & ZHANG (2008) e HETU et al. (1998) utilizaram o método de elementos finitos (FEM), enquanto MALISKA et al. (2000), CHANG & YANG (2001), YANG et al. (sítio da Moldex3D) e ARAÚJO et al. (2008) trabalharam com volumes finitos (FVM). O FEM apresenta boa estabilidade e precisão para problemas dominados pela difusão mesmo quando são utilizadas malhas altamente não ortogonais. O FVM, por outro lado, assegura fluxos conservativos, que são essenciais para problemas dominados por convecção. O método FVM pode ser aplicado tanto para malhas estruturadas como para não – estruturadas (ARAÚJO et al., 2008). O FVM pode usar de maneira mais eficiente os recursos computacionais (tempo e memória) e é computacionalmente mais estável do que o FEM na modelagem do processamento de polímeros (CHANG & YANG, 2001). Entretanto, as duas técnicas são adequadas para o problema. A qualidade dos resultados vai depender mais da eficiência da implementação do solver.

Neste trabalho foi utilizado o *solver interFoam* do pacote *OpenFOAM* versão 1.5. Este pacote é uma ferramenta de fluidodinâmica computacional (CFD), escrita em linguagem C++, e de código aberto, que permite ao usuário criar novas aplicações ou modificar as existentes. No *interFoam*, a discretização das equações governantes do escoamento é baseada no método de volumes finitos formulado com arranjo co-localizado de variáveis onde pressão e velocidade são resolvidas com métodos segregados. Para o acoplamento pressão – velocidade são utilizados os algoritmos SIMPLE (*Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations*) ou PISO (*Pressure Implicit Splitting of Operators*). O PISO é uma escolha adequada para escoamentos transientes onde soluções intermediárias mais precisas são requeridas. O SIMPLE é mais adequado para escoamentos em estado estacionário (FAVERO et al. 2009). Uma descrição mais detalhada da metodologia empregada no *OpenFOAM* pode ser encontrada em JASAK (1996).

O *interFoam* foi desenvolvido para calcular o escoamento transiente e isotérmico de dois fluidos incompressíveis separados por uma interface definida. O algoritmo utilizado no *interFoam*, para capturar a interface entre os dois fluidos, é baseado no método volume de fluido (VOF). Neste método a interface em movimento é capturada pela solução da equação de transporte hiperbólica para a função fração volumétrica (CHANG & YANG, 2001; UBBINK, 1997). A interface entre as espécies não é calculada explicitamente. Ela surge como uma propriedade do campo de fração de fase f . Como a

fração de fase pode ter qualquer valor entre 0 e 1, a interface não é definida nitidamente, mas ocupa um volume ao redor da região onde uma interface nítida deveria existir.

O objetivo deste trabalho é realizar a simulação 3D do preenchimento isotérmico da cavidade de um molde de injeção. Apesar de os efeitos térmicos e de compressibilidade do material exercerem um papel fundamental nas características finais de uma peça moldada por injeção, eles não foram considerados nesta etapa do trabalho, tendo-se centrado a atenção somente na análise do potencial do *interFoam* para o estudo das características complexas do escoamento no preenchimento de moldes, o qual envolve fluido de elevada viscosidade e superfícies livres.

2. Metodologia

2.1 Equações governantes

Assumindo que o polímero e o ar comportam-se como fluidos incompressíveis as equações diferenciais parciais para a conservação da quantidade de movimento e da massa são:

$$\frac{\partial \rho \underline{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{u} \underline{u}) - \nabla \cdot (\underline{\underline{\sigma}}) = \rho \underline{g} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica, \underline{u} é o vetor velocidade, t é o tempo e $\underline{\underline{\sigma}}$ é o tensor das tensões totais.

A equação usada para representar a advecção do escalar f (método VOF) é:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla f = 0 \quad (3)$$

Um valor nulo de f indica que a célula é totalmente ocupada pelo ar enquanto um valor 1 indica que a célula é totalmente ocupada pelo polímero. Um valor de f entre 0 e 1 indica a presença da interface que é considerada como sendo localizada em $f = 0,5$.

É necessário utilizar uma equação constitutiva para o tensor das tensões totais.

Para um fluido Newtoniano incompressível o tensor das tensões totais é definido como:

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{I}} + 2\mu \underline{\underline{D}} \quad (4)$$

onde p é a pressão, $\underline{\underline{I}}$ é o tensor unitário e $\underline{\underline{D}}$ é o tensor taxa de deformação $\underline{\underline{D}} = \frac{1}{2}(\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T)$. μ é a viscosidade que, neste caso, independe da taxa de cisalhamento.

Para um fluido Newtoniano Generalizado a viscosidade passa a depender da taxa de cisalhamento e, então, devemos usar um modelo adequado como, por exemplo, o modelo de Bird – Carreau para avaliar a viscosidade:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (5)$$

Nesta equação η_0 é a viscosidade com taxa de cisalhamento nula, η_{∞} é a viscosidade com taxa de

cisalhamento infinita, λ é uma constante do tempo, n é o índice da lei das potências adimensional e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (shear rate) (MACOSKO, 1994).

Como está sendo estudado um escoamento com fluido de viscosidade elevada, foi desconsiderada a contribuição da força da gravidade (aceleração da gravidade nula).

2.2 Condições iniciais e de contorno

Ao domínio (interior da cavidade) são atribuídas as seguintes condições iniciais:

$$\underline{u} = 0, p = 0, f = 0. \quad (6)$$

Durante o preenchimento assumiu-se velocidade constante na entrada de polímero, velocidade nula nas paredes (não escorregamento) e gradiente de velocidade nulo na saída. Considerou-se gradiente de pressão nulo na entrada, e nas paredes, e pressão nula na saída. Considerou-se fração volumétrica igual a 1 na entrada e gradiente nulo nas paredes e na saída.

Com o uso do método VOF, não só o deslocamento do polímero é calculado: calcula-se também o deslocamento do ar. Portanto, os campos resultantes são apresentados em toda a cavidade como se houvesse apenas um fluido cujas propriedades físicas são calculadas como médias ponderadas baseadas na fração volumétrica do fluido da fase 1 em cada célula (volume de controle). Por exemplo, a massa específica é obtida com a equação:

$$\rho = f\rho_1 + (1 - f)\rho_2 \quad (7)$$

Os índices 1 e 2 representam, respectivamente, a fase 1 (polímero) e a fase 2 (ar).

Uma questão importante que deve ser levada em consideração é que, como o sistema é incompressível, o ar deve sair da cavidade, para que o polímero ocupe o espaço. Entretanto, o polímero não deve sair da cavidade.

Alguns autores assumem que o ar passa através das paredes da cavidade enquanto o polímero não (condição de contorno mista: parede / saída), mas, desta maneira, a formação de linhas de solda (união de frentes de fluxo) não é afetada pelo ar existente na cavidade (ARAÚJO et al, 2008). Além disso, não se pode verificar a localização de pontos de retenção de ar. Esta informação é importante para o projeto do molde (localização de ponto de injeção e de canais de degasagem). Canais de degasagem (ou de ventagem) são canais usinados no molde com a finalidade de permitir que o ar saia da cavidade. Neste trabalho optou-se por simular preenchimento de cavidades contendo canais de degasagem. A localização dos canais não foi otimizada.

Esta solução leva em consideração que o ar é um gás que pode sair por canais de pequenas dimensões enquanto o polímero plastificado é um fluido que, sob ação do resfriamento, tem sua viscosidade elevada e solidifica. Isto impede sua passagem pelos canais e, por isso, ele se mantém dentro da cavidade. Isto é o que ocorre em processos de injeção utilizados na indústria. Este procedimento poderá ser testado em simulações não isotérmicas, com a viscosidade variando em função da temperatura, a serem realizadas na continuação deste trabalho.

Na prática, o ar pode sair através de espaços situados ao redor de pinos extratores ou da junção das duas

placas que formam a cavidade. Entretanto, quando necessário, principalmente em processos de paredes finas, são introduzidos canais que permitem a saída de ar em pontos críticos da cavidade onde ocorreria sua retenção. Este acúmulo de ar pode ser significativo a ponto de dificultar o preenchimento da cavidade.

2.3 Implementação numérica

Os esquemas de discretização utilizados para os diversos membros das equações governantes e constitutivas são apresentados na Tabela 1. Detalhes sobre as características destes esquemas podem ser encontrados em JASAK (1996).

Tabela 1. Esquemas de discretização para os membros das equações governantes e constitutivas nas simulações isotérmicas

Termos das equações governantes		Esquema de discretização
gradientes	grad(U)	Interpolação linear (diferenças centrais)
	grad (f)	Interpolação linear (diferenças centrais)
divergentes	div(rho*phi,U)	limitedLinearV 1
	div(phi, f)	vanLeer
	div(phi*rb, f)	interfaceCompression
laplaciano		linear corrected
Interpolação de valores entre pontos		linear
Componente do gradiente normal à face de uma célula		corrected
Derivadas em relação ao tempo		Euler

As equações discretizadas foram resolvidas utilizando os *solvers* e pré-condicionadores apresentados na Tabela 2.

Para o cálculo dos campos de pressão e velocidade o *interFoam* utiliza o algoritmo PISO (*pressure – implicit split-operator*). O PISO consiste de um preditor implícito de quantidade de movimento seguido por uma série de soluções de pressão e correções explícitas de velocidade (JASAK, 1996). O PISO requer 1 a 4 correções normalmente. O número de correções utilizadas neste trabalho foi de 3.

Tabela 2. *Solvers* utilizados na resolução das equações discretizadas

Variável calculada	<i>Solver</i>	Pré – condicionador
pcorr	PCG (gradiente conjugado pré-condicionado)	DIC (Diagonal incomplete – Choleski)
Pd	PCG	DIC
pdFinal	PCG	DIC
U	PBiCG (gradiente bi-conjugado pré-condicionado)	-

O equipamento utilizado nas simulações foi um computador com quatro processadores Intel® Core™2 Quad CPU Q6600 @ 2,40 GHz com sistema operacional Linux, Kernel Linux 2.6.24 – 19 – generic, distribuição Ubuntu 8.04, com ambiente de trabalho Gnome 2.22.2.

Neste trabalho foram utilizadas apenas malhas ortogonais com células hexaédricas elaboradas pelo gerador de malhas do *OpenFOAM*, o *blockMesh*. São malhas estruturadas.

2.4 Geometrias estudadas

2.4.1 Canal retangular de geometria simples

As simulações de preenchimento isotérmico foram inicialmente realizadas na cavidade correspondente a uma placa plana de paredes finas com dimensões: 140 x 40 x 0,9 mm (razão caminho de fluxo / espessura = 155,5). Trata-se de uma geometria simples sem desvios nem variações das áreas de fluxo. Esta placa apresenta três canais de degasagem para a saída do ar conforme mostrado na Figura 1. O objetivo de trabalhar com esta geometria simples foi testar o *interFoam* minimizando, ao máximo, problemas relacionados com a geometria.

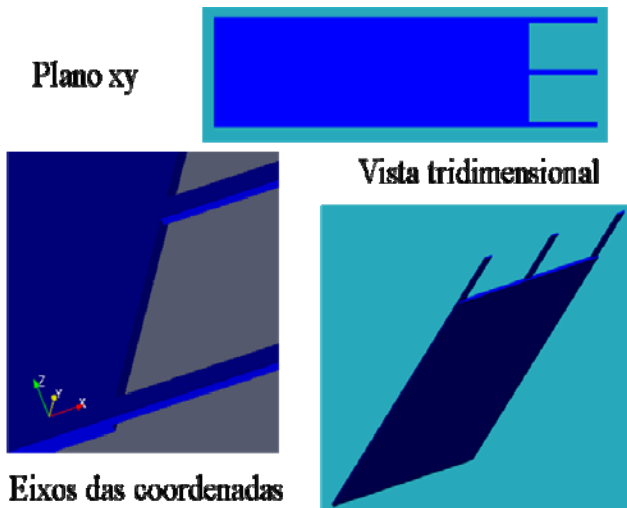


Figura 1. Geometria da peça de paredes finas

Foram realizadas simulações com quatro tamanhos diferentes de malha para observar a influência do refinamento da malha sobre os resultados e sobre a definição da frente de fluxo (interface entre os fluidos).

As malhas e tipos de *solver* utilizados para a pressão, no método PISO, são apresentados na Tabela 3. Para a velocidade foram utilizados, em todos os casos, o *solver* PBiCG com o pré-condicionador DILU. O *solver* para o cálculo de f não é elegível pelo usuário.

Tabela 3. Malhas utilizadas nas simulações

Teste	Número de células hexaédricas	<i>Solver</i> para a pressão*
twall_1	13.880	PCG e pré-condicionador DIC
twall_5	27.760	PCG e pré-condicionador DIC
twall_6	111.040	PCG e pré-condicionador DIC
twall_8	194.494	Técnicas <i>multi-grid</i> (ver tabela 4)

Foram utilizadas técnicas *multi-grid* para a pressão, no teste twall_8, pois, com o aumento do número de volumes de controle, a simulação ficou muito lenta com o PCG DIC. Na Tabela 4 são apresentados os *solvers* utilizados no teste twall_8.

Tabela 4. *Solvers* utilizados no cálculo da pressão no teste twall_8

Variável calculada	<i>Solver</i>	Pré – condicionador de matrizes	Smoother
p _{corr}	PCG	GAMG	DICGaussSeidel
p _d	GAMG	-	DIC
p _d Final	PCG	GAMG	DICGaussSeidel

PCG = gradiente conjugado pré-condicionado; GAMG = geometric-algebraic multi-grid; DICGaussSeidel = Diagonal incomplete – Choleski with Gauss-Seidel – symmetric

Os métodos iterativos são indicados para a solução de grandes sistemas de equações, resultantes da utilização de malhas altamente refinadas, devido à menor quantidade de memória utilizada em relação aos métodos diretos. Infelizmente, a velocidade de convergência de métodos iterativos reduz rapidamente à medida que a malha é refinada. Os métodos *multi-grid* proporcionam maior velocidade de convergência através da exploração das diferenças de comportamento do erro em malhas de diferentes tamanhos. (Versteeg & Malalasekera, 2007).

As propriedades dos fluidos utilizados nos testes com esta geometria são apresentadas na Tabela 5, tendo-se utilizado o modelo de Bird-Carreau para modelar a variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais

Material	Propriedades	Unidades	Valor	
PS	Massa específica (a 503K)*	(Kg/m ³)	892	
	Tensão superficial (PS com ar)**	N/m (Kg/s ²)	0,0271	
	Parâmetros do modelo Bird-Carreau*	η_0	m ² /s	4,22
		η_∞	m ² /s	0
k		s	0,15	
	n	-	0,23	
Ar	Massa específica	(Kg/m ³)	1	
	Viscosidade Newtoniana	m ² /s	1,48e ⁻⁵	

* NGUYEN-CHUNG (2004) ** BRANDRUP et al. (1998)

2.4.2 Canal retangular com geometria complexa

Também foram realizadas simulações cujos resultados foram comparados com dados fornecidos em CHANG & YANG (2001). Neste trabalho os autores desenvolveram um método de cálculo 3D utilizando volumes finitos e compararam seus resultados com outro método que utiliza a aproximação Hele – Shaw.

A geometria e a malha estudadas para comparação de valores de pressão e deslocamento da frente de fluxo (refinada) são apresentadas na Figura 2.

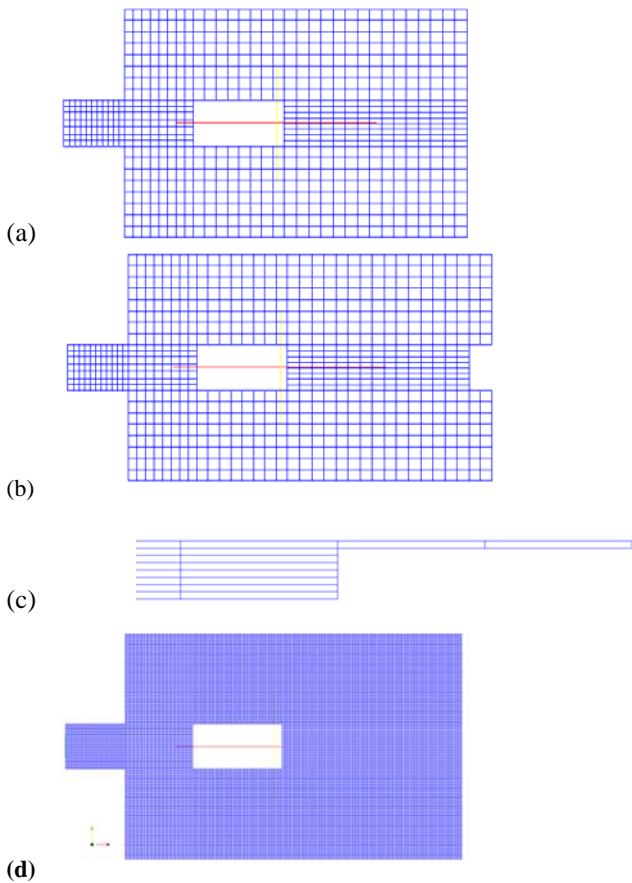


Figura 2. Geometria e malha para estudada da pressão de preenchimento; (a) sem mostrar canais de degasagem; (b) com canais de degasagem; (c) detalhe dos canais; (d) malha para estudo da frente de fluxo (teste_204)

Nesta geometria o fluxo é mais complexo: a frente de fluxo sofre aumento da área de fluxo (fluxo radial), desvio, separação, diminuição da área de fluxo, e encontro com outra frente de fluxo (formação de linhas de solda). A malha utilizada nas simulações para estudo da variação da pressão de preenchimento tem oito volumes de controle na direção z (ver Figura 2c). Como a espessura é muito pequena, resultam células com elevadas razões de aspecto. O que causa perda de definição da interface.

Detalhe do ponto de injeção utilizado neste trabalho é mostrado na figura 3.

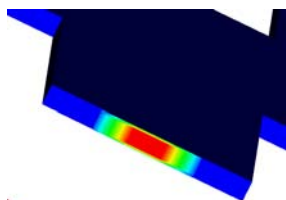


Figura 3. Posicionamento do ponto de injeção

Foram utilizadas técnicas *multi-grid*, para a pressão, nos testes com malha mais refinada.

Foi considerado o mesmo modelo reológico, e as mesmas propriedades dos materiais, utilizados no artigo de CHANG & YANG (2001). As propriedades consideradas para o polímero e para o ar são apresentadas na Tabela 6. O modelo reológico empregado no artigo foi o Newtoniano.

Tabela 6. Propriedades dos fluidos utilizados nas simulações

Material	Viscosidade (Pa.s)	Massa específica (kg/m ³)
PS	200	1000
ar	0,1	1,23

3. Resultados e Discussões

3.1 Resultados obtidos com geometria mais simples

3.1.1 Relação entre os tipos de malhas utilizadas e a definição da interface

Na figura 4 se observa a influência do grau de refinamento e da razão de aspecto, no plano xz, sobre a definição da interface. O aumento do número de células na direção z (espessura) causa aumento da razão de aspecto dos volumes. Isto pode ser visto comparando as interfaces dos testes twall_1 com twall_5 na figura 4. Comparando-se os testes twall_6 e twall_8, com o twall_5, observa-se redução da razão de aspecto devido ao refinamento na direção x. Entretanto, este refinamento na direção x torna a malha muito grande. Vemos que a qualidade dos resultados melhora com o refinamento da malha e com a redução da razão de aspecto dos volumes de controle.

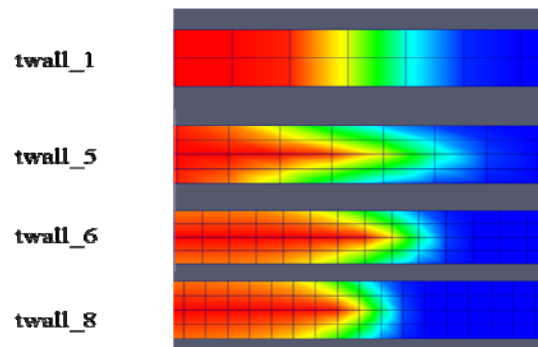


Figura 4. Influência do refinamento e da razão de aspecto da malha sobre a definição da interface (plano xz).

A interface apresenta uma largura que se espalha ao longo de um determinado número de células. Portanto, se as células se alongam em determinada direção, a interface acaba se alongando nesta direção.

Na Figura 5, que mostra o preenchimento no tempo 1,2 s, no plano xy, se observa que a definição da interface melhora com o refinamento da malha neste plano também.

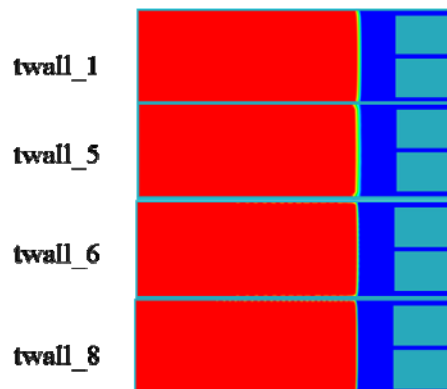


Figura 5. Posição da frente de fluxo no tempo 1,2 s (plano xy)

Devido às dimensões muito reduzidas na espessura da placa (direção z), em relação às dimensões nas direções x e y, o aumento do número de células na direção z causa um aumento muito grande do número de células total, da malha, para que se mantenham valores baixos das razões de aspecto em todas as direções. Isto tem limitado o número de células na direção z causando uma baixa definição da interface no plano xz. Fica inviável a simulação com número de células elevadas na direção z, nestas malhas tridimensionais de paredes finas, pois o tamanho total da malha fica muito grande: o tempo de processamento se torna muito elevado.

Duas abordagens serão utilizadas posteriormente visando reduzir os tempos de processamento: (1) otimização dos solvers utilizados na resolução do sistema de equações algébricas resultante da discretização das equações governantes; e (2) verificação da redução dos tempos de processamento através da utilização de dois a quatro processadores em paralelo.

3.1.2 Resultados do teste de convergência

Um método numérico é dito convergente se a solução das equações discretizadas tende a uma solução exata da equação diferencial à medida que o espaçamento da malha tende a zero. Normalmente a convergência é avaliada realizando experimentos numéricos em uma série de malhas sucessivamente refinadas. Se o método é estável, e se todas as aproximações usadas no processo de discretização são consistentes, normalmente a solução converge para uma solução independente da malha. (FERZIGER & PERIC, 2002).

Foram realizadas comparações dos valores de pressão na entrada da cavidade, nas diversas simulações, e os resultados são apresentados na Figura 6.

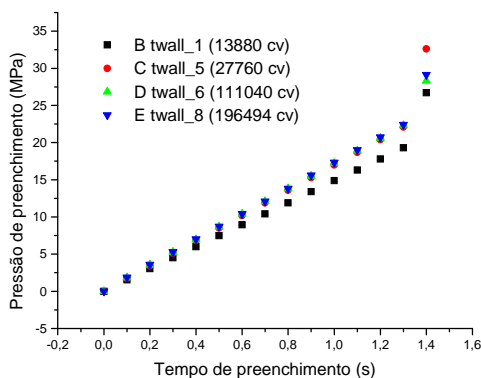


Figura 6. Resultados do teste de convergência

Observou-se que, para os testes com número de volumes de controle maiores (testes twall_5, twall_6 e twall_8), os resultados não variaram significativamente.

No final do preenchimento observou-se uma elevação significativa da pressão devido ao fluxo do polímero nos canais de degasagem.

3.1.3 Influência da viscosidade sobre o comportamento da simulação

Quando o polímero entra na cavidade, que está a temperaturas muito mais baixas (diferenças em torno de

180°C), ele é resfriado rapidamente. O resfriamento do polímero causa elevação significativa de sua viscosidade principalmente em camadas próximas às paredes. Como nesta etapa do trabalho não foram considerados efeitos de troca térmica, conforme explicado anteriormente, foi realizada uma comparação entre simulações com materiais com comportamento Newtoniano Generalizado (Bird Carreau) com viscosidades mais elevadas, a fim de verificar como o solver se comporta nestas condições e assim facilitar etapas posteriores do trabalho, nas quais os efeitos térmicos serão inseridos.

Duas simulações com diferentes comportamentos reológicos são apresentadas na Tabela 7. Os resultados de comparação das pressões de preenchimento são apresentados na Figura 7.

Tabela 7. Comportamentos reológicos utilizados nas simulações

Parâmetro		Unidades	twall_1*	twallVisc_3
Parâmetros do modelo	ν_{0}	m^2/s	4,22	42.152,5
	ν_{inf}	m^2/s	0	0
Bird-Carreau	k	s	0,15	0,15
	n	-	0,23	0,23
rho		kg/m^3	892	892

* NGUYEN-CHUNG (2004)

Não ficou evidenciado nenhum problema de convergência nestes testes. Entretanto, não foi realizado um teste de convergência de malha para o caso com maior viscosidade. Além disso, não foi verificado o efeito da variação brusca de viscosidade de célula para célula sobre a convergência. Estes testes serão realizados na próxima etapa deste trabalho.

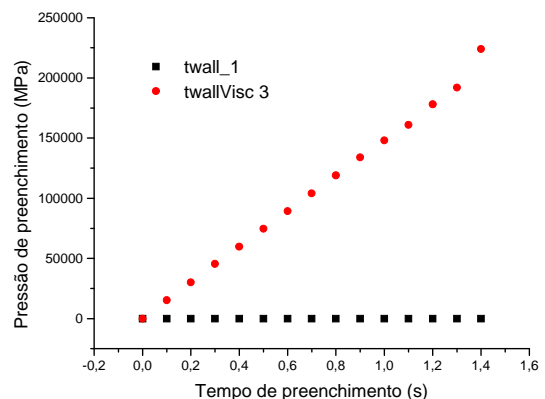


Figura 7. Resultados de pressão de preenchimento em função do tempo de preenchimento para dois polímeros: twall_1, baixa viscosidade e twallVisc 3, alta viscosidade.

3.2. Resultados obtidos com a geometria mais complexa

Os resultados de deslocamento da frente de fluxo, obtidos por CHANG & YANG (2001), são apresentados na Figura 8.

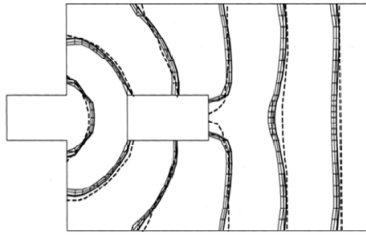


Figura 8. Deslocamento da frente de fluxo (Chang & Yang, 2001)

Os resultados obtidos neste trabalho, para malhas refinadas, são representados na Figura 9. (observar a linha de solda formada pelo encontro das frentes de fluxo).

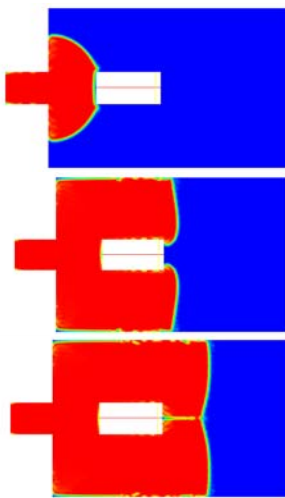


Figura 9. Evolução da frente de fluxo (Teste_204)

Observa-se que a evolução da frente de fluxo é semelhante nos dois trabalhos.

Também foram comparados valores de pressão na entrada da cavidade (no ponto de injeção). Neste caso utilizou-se a malha apresentada na Figura 2 (igual a do artigo de referência).

A pressão de injeção depende do comportamento reológico do material, do tempo de preenchimento (velocidade de injeção), das temperaturas do fluido e da cavidade, da geometria da cavidade e do ponto de injeção. Além disso, na prática, a pressão no interior da cavidade é limitada pela capacidade da máquina injetora. Isto não está sendo levado em consideração.

O tempo de preenchimento foi fixado em 2s. A qualidade da comparação dos resultados fica prejudicada devido a que a geometria do ponto de injeção influencia os valores de pressão obtidos na simulação. A única informação sobre o ponto de injeção é que se trata de um “point gate”. Foi considerado um ponto de injeção com área igual a $2,0 \times 10^{-5} \text{m}^2$.

A variação da pressão, no ponto de injeção, em função do tempo de preenchimento, é mostrada na Figura 10.

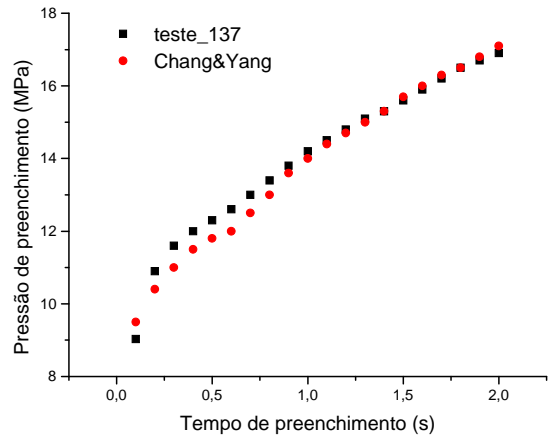


Figura 10. Variação da pressão no ponto de injeção em função do tempo de preenchimento.

Foram, novamente, observados problemas com a definição da frente de fluxo relacionados com tipos de malhas (tamanho e forma dos volumes de controle) e com o tipo de modelo reológico utilizado para o fluido que preenche a cavidade (fase 1).

O problema fica maior na interface com as paredes internas da cavidade como pode ser verificado na Figura 11.

Conforme visto anteriormente, simulação com malha mais refinada, e com menor razão de aspecto, favorece a qualidade dos resultados.

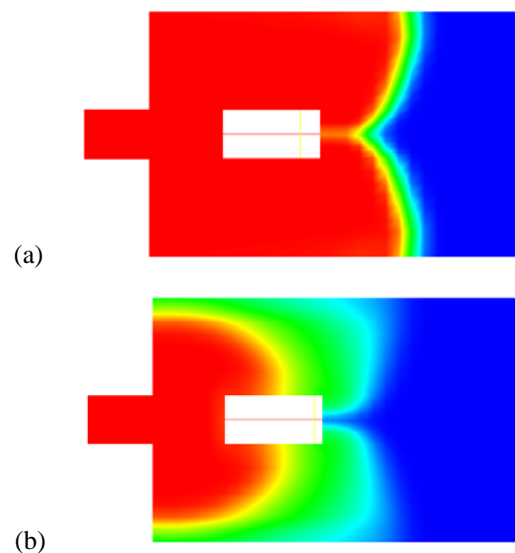


Figura 11. Frente de fluxo (Teste_137). (a) Plano central; (b) Plano da parede.

Os resultados das simulações utilizando diferentes modelos da viscosidade são mostrados na Figura 12 para imagens dos planos superficiais das peças.

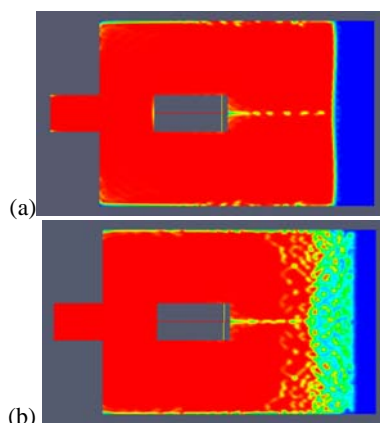


Figura 12 Comparação da interface: (a) com modelo Bird – Carreau, teste_204 (b) com modelo Newtoniano.

Verificou-se que a utilização de uma malha suficientemente refinada, com pequena razão de aspecto, em simulação com o modelo de Bird – Carreau, proporcionou a obtenção de uma interface com melhor definição (Figura 12a) se comparada com a obtida utilizando o modelo Newtoniano (Figura 12b).

4. Conclusão

Foi verificada a possibilidade de utilização do *solver interFoam*, do pacote *OpenFOAM*, na simulação tridimensional do preenchimento de cavidades em processos isotérmicos de fluidos incompressíveis em malhas estruturadas. As simulações apresentaram resultados satisfatórios com relação ao deslocamento da frente de fluxo, principalmente para o modelo Bird-Carreau. As simulações com modelo Newtoniano não apresentaram boa definição da frente de fluxo, mas isto não constitui um problema para a continuidade do trabalho, visto que este modelo não é adequado para escoamento de polímeros. É necessário controlar a razão de aspecto da malha e trabalhar com malhas refinadas. Infelizmente, o aumento do número de volumes de controle, em simulações tridimensionais, torna a simulação muito lenta. A variação da pressão de preenchimento da cavidade apresentou-se semelhante aos resultados da literatura. Em trabalhos futuros será introduzido o cálculo dos campos de temperatura e também será considerada a sua influência sobre o escoamento.

5. Referências

- ARAÚJO, B. J.; TEIXEIRA, J.C.F.; CUNHA, A.M.; GROTH, C.P.T.. Parallel three-dimensional simulation of the injection molding process. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 59, p.801 – 815, 2008.
- BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E.H.; GRULKE, E.A.. *Polymer Handbook*. 4a. ed, 1998.
- CHANG, R.; YANG, W. Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three-dimensional finite volume approach. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 37, p. 125 – 148, 2001.
- CAO, W.; SHEN, C.; ZHANG, C.; WANG, L. Computing flow-induced stresses of injection molding based on the Phan-Thien-

Tanner model. *Archive of Applied Mechanics*, v. 78, p. 363 – 377, 2008.

FAVERO, J.L.; SECCHI, A. R.; CARDOZO, N. S. M.; JASAK, H. Viscoelastic flow analysis using the software OpenFOAM and differential constitutive equations. Artigo a ser publicado.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.; *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3a ed, Springer, Berlin, 2002.

HIEBER, C.A.; SHEN, S.F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 7, p. 1 – 32, 1980.

HETU, J.-F.; GAO, D.M.; GARCIA-REJON, A.; SALLOUM, G. 3D finite element method for the simulation of the filling stage in injection molding. *Polymer Engineering and Science*, v. 38, p. 223 – 236, 1998.

JASAK, H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. Tese de doutorado, Imperial College of Science, Technology & Medicine, University of London, Londres, Inglaterra, 1996.

KENNEDY, P. *Flow analysis of injection molds*. Hanser Publishers, Munique, 1995.

MACOSKO, C. W. *Rheology – Principles, measurements and applications*. Wiley – VCH, New York, 1994.

MALISKA, C.R.; VASCONCELLOS, J.F.V. An unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 182, p. 401 – 420, 2000.

NGUYEN-CHUNG, T. Flow analysis of the weld line formation during injection mold filling of thermoplastics. *Rheological Acta*, v. 43, p. 240–245, 2004.

SHEN, Y.K.; YEH, P.H.; WU, J.S. Numerical simulation for thin wall injection molding of fiber-reinforced thermoplastics. *International Communications in heat and mass transfer*, vol. 28, p. 1035 – 1042, 2001.

UBBINK, O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. Tese de doutorado, Imperial College of Science, Technology & Medicine, University of London, Londres, Inglaterra, 1997.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2^a ed, Pearson Education Limited, Essex, 2007.

WANG, T.; YOUNG, W. Study on residual stresses of thin-walled injection molding. *European Polymer Journal*, v. 41, p. 2511 – 2517, 2005.

YANG, W.; PENG, A.; LIU, L.; HSU, D.C.; CHANG, R. Integrated numerical simulation of injection molding using true 3D approach. (<http://www.moldex3d.com/download/papers/0402.pdf>)

ZHOU, H.; YAN, B.; ZHANG, Y. 3D filling simulation of injection molding based on the PG method. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, p. 475 – 480, 2008.