



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Análise das causas da perda artificial de massa pelos dutos de saída de ar usando o solver viscoelasticThermalFoam

Autor: Douglas Schuster Prodanov

Orientador: Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Coorientador: João Antônio Pinto de Oliveira

Porto Alegre, terça-feira, 15 de janeiro de 2013

“O único lugar onde o sucesso vem antes
do trabalho é no dicionário”
Albert Einstein (1879 – 1956)

Sumário

| | |
|---|------|
| Sumário | iii |
| Agradecimentos | iv |
| Resumo | v |
| Lista de Figuras | vi |
| Lista de Tabelas | vii |
| Lista de Símbolos | viii |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | x |
| 1 Introdução | 1 |
| 2 Conceitos Fundamentais e Revisão Bibliográfica | 3 |
| 2.1 Processamento de polímeros através da moldagem por injeção | 3 |
| 2.2 Simulação do processamento de polímeros na moldagem por injeção | 5 |
| 3 Metodologia | 10 |
| 3.1 Equações governantes para a simulação do processo de preenchimento do molde no processo de injeção | 10 |
| 3.2 Ferramentas computacionais e esquemas numéricos utilizados | 13 |
| 3.3 Geometria utilizada no estudo do refinamento da malha utilizada por GRANADA (2012) | 14 |
| 3.4 Geometria utilizada na análise da Influência da temperatura de <i>No-flow</i> | 15 |
| 3.5 Casos testados na análise da Influência da temperatura de <i>No-flow</i> | 17 |
| 3.6 Valores dos parâmetros das equações governantes empregados nas simulações referentes à análise da Influência da temperatura de <i>No-flow</i> | 17 |
| 4 Resultados e Discussão | 19 |
| 4.1 Refinamento da malha utilizada por Granada (2012) | 19 |
| 4.2 Análise da Influência da temperatura de <i>No-flow</i> | 20 |
| 5 Conclusões e Trabalhos Futuros | 30 |
| 6 Referências | 31 |

Agradecimentos

Gostaria, primeiramente, de agradecer ao Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo por todo apoio dado não só durante a construção deste trabalho, mas também durante muitas etapas vividas durante minha vida acadêmica. O aprendizado na área de engenharia, orientações e conselhos dados ao longo dos anos, bem como a amizade, foram de vital importância para minha formação ética e profissional, servindo como inspiração profissional.

Também gostaria de agradecer ao Prof. Dr. João Antônio Pinto de Oliveira pela oportunidade dada neste trabalho, por todo apoio dado em horas de extrema dificuldade, pela compreensão e dedicação exercida ao longo dos estudos propostos.

Agradeço principalmente a meus pais, Ronei Vieira Prodanov e Silvia Elvina Schuster Prodanov por todo apoio, educação e carinho dados durante minha vida. Tanto nos bons momentos quanto nos de dificuldade. Em todas as minhas conquistas, se não fosse o empenho e carinho deles, nada teria sido possível. MUITÍSSIMO obrigado por tudo! Fico eternamente grato por tê-los sempre ao meu lado! Também não posso esquecer-me da Duda, que sempre esteve ao meu lado nas noites em claro de estudo, nas horas boas e ou más, sempre feliz e alegrando a todos!

A todos os amigos que conheci durante estes anos de engenharia, aos velhos amigos que me apoiaram, aos novos amigos conquistados durante minha vivência profissional, muitíssimo obrigado por tudo. Com certeza, a formação de um bom profissional não depende apenas do empenho acadêmico, mas também das experiências vividas e bons relacionamentos com seus colegas e amigos.

E por último, mas não menos importante, à Thaygra Severo Bernardes por todo carinho, compreensão, companheirismo e apoio dado desde o momento que a conheci e que foi de vital importância para continuar feliz e sem nunca desistir. MUITÍSSIMO Obrigado!

Resumo

O processo de moldagem por injeção é um processo de transformação de plásticos bastante difundido. Este processo requer grandes desenvolvimentos tecnológicos, tanto na parte de equipamentos (injetoras) quanto para a fabricação de moldes (matrizaria). Estas tecnologias são caras, portanto estudos para simulação de processo de injeção são ferramentas extremamente úteis que visam reduzir ao máximo os custos envolvidos no desenvolvimento destas tecnologias. Apesar de existirem diversos softwares comerciais atualmente para esta tarefa, seus custos são elevados e geralmente são utilizados somente para projetos que envolvam grandes investimentos. Além disto, por possuírem códigos fechados e utilização de modelos puramente viscosos para simulação do escoamento do polímero, não trazem boas estimativas do comportamento real do escoamento e nem predição das propriedades finais da peça moldada, tais como tensões residuais existentes. Visando a solução destes problemas e utilizando o pacote OpenFoam, software gratuito e de código aberto para simulação do escoamento de fluidos, foi possível criar o *solver* viscoelasticThermalFoam. Este *solver* trabalha em escoamento não isotérmico e utiliza equações constitutivas para o comportamento viscoelástico do polímero. Resultados obtidos indicam que este *solver* tem potencial para ser utilizado na análise da distribuição das frentes de fluxo no escoamento dentro de moldes, porém o posicionamento e dimensionamento dos dutos de saída de ar em uma malha complexa podem ocasionar perda da massa polimérica para fora da cavidade antes do preenchimento total. Este trabalho tem como objetivo analisar as causas relacionadas às perdas de materiais nos dutos de saída de ar da cavidade. Para isto é feita uma análise qualitativa relativa ao ponto ótimo no qual o polímero para de escoar (temperatura de *no-flow*) em função da sua viscosidade, através da análise de simulações com diferentes temperaturas. As análises feitas indicam que a deve-se trabalhar para encontrar o ponto ótimo relacionado à temperatura de *no-flow* nas simulações envolvendo este *solver*, já que os resultados apresentados variam em função da mesma.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Esquema de uma Injetora convencional (MANRICH, Processamento de Termoplásticos, pg. 286, 2005) | 4 |
| Figura 2.2: Etapas do ciclo do processo de moldagem por injeção (HARADA, Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade, pg. 36, 2012) | 4 |
| Figura 2.3: Gráfico qualitativo da viscosidade de polímeros cristalinos e amorfos em função da temperatura (adaptado de KENNEDY, <i>Flow analysis of injection molds</i> , pg 23, 1995)..... | 9 |
| Figura 3.1: Geometria utilizada para caso de refinamento da malha proposta | 14 |
| Figura 3.2: Geometria criada no software ANSYS 13 ICEM..... | 15 |
| Figura 3.3: Geometria utilizada nas simulações..... | 16 |
| Figura 3.4: Detalhe do refinamento da malha na região de encontro entre cavidade e dutos de saída de ar | 16 |
| Figura 4.1: Detalhes de uma das geometrias criadas (100 mil pontos). Detalhe das distorções que surgiram na malha durante a criação da mesma. | 20 |
| Figura 4.2: Etapas de preenchimento da cavidade para o caso Vent_08 | 20 |
| Figura 4.3: Etapas de preenchimento da cavidade para o caso Vent_09 | 21 |
| Figura 4.4: Etapas de preenchimento da cavidade para o caso Vent_10 | 21 |
| Figura 4.5: Corte transversal normal ao eixo x no ponto 0,00075 para o caso Vent_08.... | 22 |
| Figura 4.6: Corte transversal normal ao eixo x no ponto 0,00075 para o caso Vent_09.... | 22 |
| Figura 4.7: Corte transversal normal ao eixo x no ponto 0,00075 para o caso Vent_10.... | 22 |
| Figura 4.8: Gráfico da pressão no escoamento do polímero no caso Vent_08 | 24 |
| Figura 4.9: Gráfico da pressão no escoamento do polímero no caso Vent_09 | 24 |
| Figura 4.10: Gráfico da pressão no escoamento do polímero no caso Vent_10 | 25 |
| Figura 4.11: Temperatura durante o escoamento para o caso Vent_08 em K..... | 25 |
| Figura 4.12: Temperatura durante o escoamento para o caso Vent_09 em K..... | 26 |
| Figura 4.13: Temperatura durante o escoamento para o caso Vent_10 em K..... | 26 |
| Figura 4.14: Preenchimento de polímero durante a fase de encontro com os dutos de saída de ar para o caso Vent_09 | 27 |
| Figura 4.15: Perfil de pressão do escoamento durante a fase de encontro com os dutos de saída de ar para o caso Vent_09 | 27 |
| Figura 4.16: Preenchimento de polímero durante a fase de encontro com os dutos de saída de ar para o caso Vent_08 | 28 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1: Características da malha | 16 |
| Tabela 3.2: Casos estudados | 17 |
| Tabela 3.3: Parâmetros térmicos para o PS (STYRON 615 APR) | 18 |
| Tabela 3.4: Parâmetros para a equação de Cross-WLF para o PS (STYRON 615 APR)..... | 18 |
| Tabela 3.5: Parâmetros viscoelásticos lineares para o modelo de Leonov para o PS (STYRON 615 APR) | 18 |
| Tabela 3.6: Características das malhas refinadas..... | 19 |

Lista de Símbolos

| | |
|---|---|
| T_{nf} | Temperatura de <i>no-flow</i> |
| T_m | Temperatura de fusão |
| \underline{u} | vetor velocidade |
| ρ | massa específica |
| $\frac{D}{Dt}$ | derivada material (ou substantiva) do tempo |
| t | tempo |
| $\underline{\underline{\pi}}$ | tensor das tensões totais |
| \underline{g} | vetor aceleração da gravidade |
| p | pressão |
| $\underline{\underline{\delta}}$ | tensor unitário |
| $\underline{\underline{\tau}}$ | tensor das tensões viscosas |
| $\underline{\underline{\sigma}}$ | tensor tensão definido por: $\tau \equiv \sigma - G\delta$ |
| c_p | calor específico à pressão constante |
| T | temperatura |
| β | coeficiente de compressibilidade |
| \underline{q} | vetor fluxo de calor |
| k | condutividade térmica |
| $\frac{\nabla}{\underline{\underline{\sigma}}}$ | derivada convectiva superior do tensor $\underline{\underline{\sigma}}$ |
| λ | tempo de relaxação |
| G | constante definida como $G = \eta_0/\lambda$ |
| η | viscosidade do polímero |
| η_0 | viscosidade extrapolada à taxa de cisalhamento nula |
| $tr(\tau)$ | traço do tensor das tensões viscosas τ |
| $\frac{\nabla}{\underline{\underline{\tau}}}$ | derivada convectiva superior do tensor τ |

| | |
|-----------------------------|--|
| $\underline{\underline{D}}$ | tensor taxa de deformação |
| $\dot{\gamma}$ | taxa de cisalhamento |
| n | fator n da lei de potências |
| τ^* | tensor de cisalhamento na transição entre o comportamento Newtoniano e o comportamento representado pela lei das potências |
| D_1, D_2, D_3 | parâmetros que dependem do material para o modelo WLF |
| A_1 e \tilde{A}_2 | parâmetros que dependem do material para o modelo WLF |
| T_0 | temperatura de referência |
| f | fração da fase correspondente, onde a célula cheia de polímero é 0 e a cheia é 1. |
| T_g | Temperatura de Transição Vítrea |
| x, y, z | Coordenadas espaciais da geometria |
| U_x | Velocidade de escoamento na direção x |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|----------|---|
| CAE | <i>Computer Aided Engineering</i> |
| CESUP | Centro Nacional de Supercomputação - UFRGS |
| CFD | <i>Computational fluid dynamics</i> |
| DIC | <i>Diagonal Incomplete Choleski</i> |
| FDM | <i>Finite Difference Method</i> |
| FEM | <i>Finite Element Method</i> |
| FN | Fluido Newtoniano |
| FNG | Fluido Newtoniano Generalizado |
| GLP | <i>Gnu Public Licence</i> |
| OpenFOAM | <i>Open Field Operation and Manipulation</i> |
| PBiCG | <i>Preconditioned Bi-conjugate Gradient</i> |
| PCG | <i>Preconditioned Conjugate Gradient</i> |
| PISO | <i>Pressure Implicit Splitting of Operators</i> |
| PP | Polipropileno |
| PS | Poliestireno |
| SIMPLE | <i>Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations</i> |
| VOF | <i>Volume of Fluid</i> |

1 Introdução

A larga utilização de plásticos no nosso dia-a-dia mostra que o processamento de resinas plásticas está cada vez ganhando maior importância. Um dos tipos de processamento de polímeros mais utilizados hoje em dia é a moldagem por injeção. Isto se deve à alta produtividade deste processo, aliada a sua versatilidade, já que com este obtém-se desde tampas de garrafas até para-choques de carros.

A utilização de métodos que possam descrever o comportamento do polímero durante e após o processamento de moldagem por injeção torna-se de grande importância para o desenvolvimento de novas tecnologias na área. Desde o surgimento deste processo, inúmeros trabalhos envolvendo equações empíricas e modelos matemáticos que tentam descrever o comportamento reológico do polímero na etapa de preenchimento e solucionar problemas de falhas nas peças foram desenvolvidos.

Além disto, a utilização de métodos preditivos da simulação do processo de injeção de polímeros ajuda na redução de custos envolvendo construção de moldes e máquinas para este processo. Assim, métodos de “tentativa e erro” dão lugar a aplicação de conceitos consolidados e com embasamento teórico. Condições de processamento (temperaturas, pressões e velocidades), tempos estimados de injeção, posicionamento das zonas de refrigeração das peças, posicionamento dos dutos de saída de ar contidos na cavidade e dimensionamento de canais de injeção, ajudam substancialmente na hora de projetar e construir um molde. Além da otimização dos recursos envolvidos, o aumento da vida útil do molde e a redução da necessidade de reparos e manutenções também são outros benefícios gerados com estes métodos.

Com base nestes artigos, softwares computacionais foram desenvolvidos, facilitando a resolução numérica destes modelos. Estes softwares computacionais possuem grandes bancos de dados contendo propriedades para diversos dos polímeros usuais. Porém, a maior parte destes softwares considera apenas o comportamento puramente viscoso para o polímero. Devido à falta do uso de equações constitutivas como parte da resolução numérica do escoamento nestes softwares, o comportamento visco-elástico do polímero acaba sendo desconsiderado. Como boa parte destes softwares se trata de códigos fechados a introdução das equações constitutivas nestes softwares acaba sendo inviável.

O OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) teve, em 2004, seu código liberado, tornando-se de domínio público através da licença GPL (*Gnu Public License*). A partir deste momento houve um enorme crescimento de usuários que começariam a trabalhar com este software. Além dos *solvers* contidos nas bibliotecas padrões do software, os usuários tem a possibilidade de criação de novos para resolução de problemas do seu interesse. Com isto, muitos *solvers* relacionados ao escoamento de polímeros foram criados, dentre eles o *solver* viscoelasticThermalFoam. Este *solver* está sendo desenvolvido para simulação da etapa de preenchimento do processo de injeção de polímeros, considerando escoamentos não isotérmicos através do uso de um modelo para o cálculo da viscosidade em função da taxa de cisalhamento e da temperatura, além do cálculo das tensões visco-elásticas utilizando o modelo de Leonov.

Alguns trabalhos desenvolvidos utilizando a aplicação deste *solver* mostraram que há grande potencial para representação do escoamento do polímero durante a injeção (OLIVEIRA, 2012, GRANADA, 2012). Porém, quando se trata de casos com geometrias complexas, e onde há também a presença de dutos de saída de ar alguns problemas referentes à entrada de polímero por estes canais foram observados. Isto faz com que ocorra perda de polímero por estes canais e, conseqüentemente, gerando inconsistência com os dados reais.

Este caso foi mostrado por GRANADA (2012) no qual, utilizando uma geometria complexa e gerando uma malha com refinamento, analisou a estabilidade do *solver* viscoelasticThermalFoam para o processo de simulação de injeção. No seu trabalho, parte do polímero injetado na cavidade escapou pelos dutos de saída de ar, gerando perda da massa polimérica. A proposta inicial do presente trabalho foi analisar o trabalho de Granada (2012), utilizando a mesma geometria, porém com uma malha mais refinada e aplicando uma diminuição dos canais de dutos de saída de ar. Esta redução dos canais e o refinamento proposto da malha têm como objetivo fazer com que o polímero, ao entrar em contato com os canais mais finos, esfrie mais rápido, solidificando-se e, conseqüentemente, interrompendo o escoamento.

Porém, fazendo uma nova análise do processo, uma das possíveis causas desta perda pode estar vinculada a temperatura de *no-flow* (T_{nf}) do polímero utilizada nas simulações. Esta temperatura trata-se de um ponto onde a viscosidade não é mais função da temperatura do polímero, caracterizando pelo não escoamento do polímero. Esta temperatura interfere diretamente nos resultados obtidos para o escoamento do polímero em um molde com espessuras de parede finas (inferior a 1 mm), como será visto neste trabalho.

Este trabalho propõe-se então a analisar a estabilidade do *solver* variando a sua T_{nf} . Três temperaturas diferentes foram estudadas como T_{nf} nas simulações. Assim é feita a análise do comportamento do polímero durante o preenchimento do molde utilizando o *solver* viscoelasticThermalFoam. Este molde possui cavidade única (placa plana com espessura fina), apresentando três dutos de saída de ar opostos ao ponto de injeção. Com os resultados é também feita uma análise da estabilidade e consistência do *solver* para resolução destes problemas.

2 Conceitos Fundamentais e Revisão Bibliográfica

2.1 Processamento de polímeros através da moldagem por injeção

O processo de moldagem por injeção é um dos mais versáteis no campo de transformação e processamento de polímeros. Desde a década de 40, este processo vem sendo utilizado para a confecção de artefatos plásticos.

No início, este processo era utilizado exclusivamente para produção de pequenas peças e de geometrias simples. Com a velocidade com que os avanços tecnológicos nessa área se sucederam, em pouco tempo, a injeção de termoplásticos tornou-se a forma de processamento mais utilizada para produção de peças plásticas. Hoje em dia existem diversas técnicas envolvendo o processamento por injeção. Dentre elas podemos citar: a injeção convencional (objeto de estudo deste trabalho); injeção a gás; a injeção com água; a micro e nano injeção; a injeção por compressão; injeção de espumas estruturais; injeção de peças com núcleos fundidos; entre muitos outros métodos (MANRICH, 2005).

Dentre as suas principais vantagens estão a total automatização do processo, o baixo tempo de ciclo e custos envolvidos (consequente alta produtividade) e a possibilidade de criação de peças complexas. O processo consiste na plastificação do polímero (mudança do estado sólido para um estado de maior fluidez) e posterior preenchimento dele em cavidades de um molde. Assim, quando solidificado, o polímero assumirá o formato das cavidades preenchidas assumindo então a forma das peças desejadas.

A Figura 2.1 (MANRICH, 2005) apresenta um esquema simplificado dos principais componentes de uma injetora. Ela é dividida entre a unidade de injeção (lado direito) e unidade de fechamento (lado esquerdo). Na unidade de injeção, há um canhão cilíndrico que normalmente possui uma monorosca recíproca responsável pela plastificação, dispersão, dosagem e transporte do polímero para a unidade de fechamento. O processo de plastificação do polímero é auxiliado por um conjunto de resistências que ficam dispostos no canhão. O movimento de transporte e plastificação do polímero durante a dosagem é realizado pelo movimento rotacional da rosca. Já o movimento de injeção em si dá-se através do movimento empistonado da rosca de injeção (sem movimento rotacional) acionado por um sistema hidráulico ou elétrico que empurra o polímero pelo bico injetor.

Já a unidade de fechamento é composta pelo molde e um sistema hidráulico e/ou elétrico de fechamento deste molde. Um molde de duas placas pode ser dividido em: placa fixa e placa móvel. A primeira fica presa em um platô fixo da máquina no qual há uma cavidade de entrada para o bico injetor do canhão, por onde entra o polímero plastificado. Já a segunda é presa em um platô móvel que realiza o movimento de abertura e fechamento do molde acionado por um sistema hidráulico e/ou elétrico. A unidade de fechamento também é responsável por manter o molde fechado durante a injeção, já que devido à alta viscosidade do polímero fundido e dos pequenos canais por onde ele passa, são necessárias altas pressões para injeção do polímero no molde. Em processos convencionais, utilizando polipropileno, por exemplo, chega-se a pressões na ordem de 150 bar (HARADA, 2012). Com isto, as máquinas injetoras são classificadas

conforme a sua tonelagem (força de fechamento), que expressa a capacidade máxima suportada durante o processo de injeção.

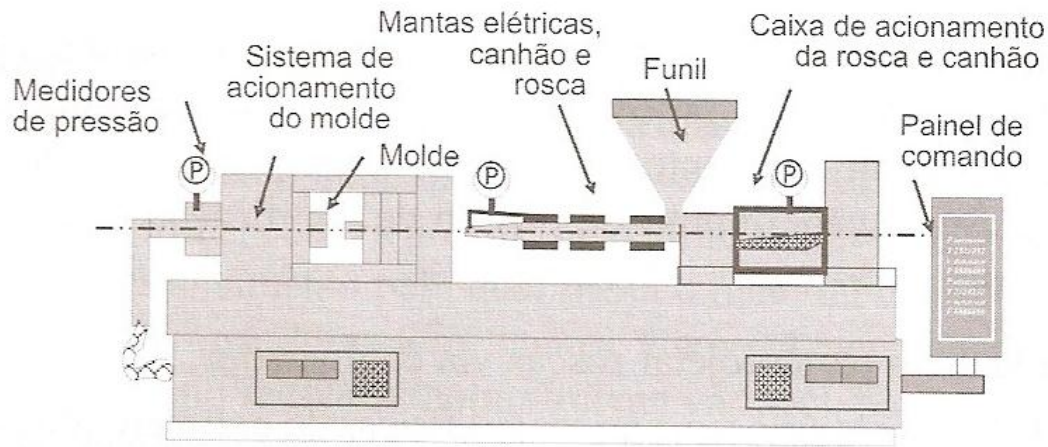


Figura 2.1: Esquema de uma Injetora convencional (MANRICH, Processamento de Termoplásticos, pg. 286, 2005)

O processo de injeção pode ser brevemente resumido conforme a Figura 2.2 (HARADA, 2012). O processo se inicia com o fechamento do molde. Logo então, o bico injetor avança, encostando-se ao canal de entrada do molde. Depois de dosado, o bico injetor avança e daí então a rosca realiza um movimento empistonado que empurra o polímero para dentro do molde de injeção. O polímero percorre os canais do molde e completa totalmente suas cavidades, expulsando o ar de dentro pelos dutos de saída de ar e micro-frestras no molde. Enquanto o polímero é injetado no molde e logo após seu preenchimento, ele começa a se solidificar e contrair. Para que não haja presença de bolhas ou defeito, tais como deformações superficiais, inicia-se a fase de recalque, responsável por enviar mais material para dentro do molde e impedir que a massa fundida volte para dentro do canhão. O polímero então é dosado e plastificado através do movimento rotacional da rosca auxiliado pelo sistema de resistências elétricas. O bico desencosta do molde e, enquanto isto, o polímero entra na fase de resfriamento. As etapas de avanço e recuo do bico de injeção no molde são opcionais e, em boa parte dos processos não são consideradas.

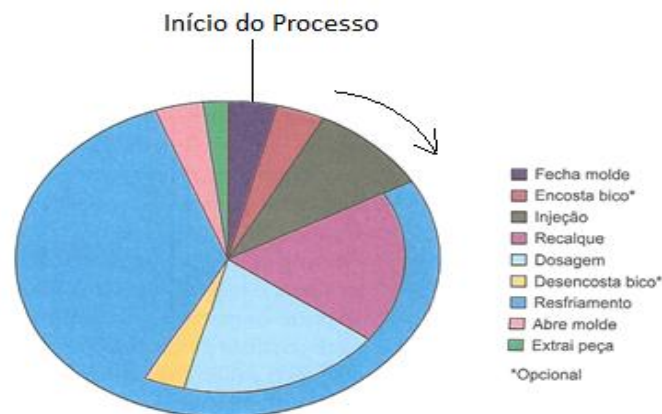


Figura 2.2: Etapas do ciclo do processo de moldagem por injeção (HARADA, Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade, pg. 36, 2012)

As paredes do molde, geralmente, são resfriadas por um sistema externo que bombeia água gelada em dutos projetados no corpo do molde, criando zonas frias, e saem na extremidade carregando o calor. Isto faz com que o resfriamento do polímero no molde seja mais acelerado. Com isto, as camadas com contato direto com as paredes do molde se solidificam rapidamente e a massa de polímero, inclusive o ponto de injeção (*gate*), já não tem força para voltar para o canhão. Inicia-se a etapa de resfriamento da peça. Esta etapa dura até que a peça se solidifique totalmente, ou então, seja capaz de suportar a força dos pinos extratores do molde sem se deformar. O molde então é aberto, a peça é extraída por pinos extratores ou por um sistema de sopro de ar e o ciclo inicia novamente.

Durante o ciclo de injeção, muitas etapas do processo podem ser feitas simultaneamente. A dosagem de material, por exemplo, pode ser feita durante o resfriamento da peça no molde. Isto faz com que os ciclos de injeção sejam bastante rápidos e, dependendo da geometria, não passe de segundos ou, no máximo, poucos minutos.

2.2 Simulação do processamento de polímeros na moldagem por injeção

Desde a utilização do processo de injeção em escala industrial surgiu a necessidade de modelos para representá-lo. Os primeiros trabalhos concentraram-se na predição da fase de preenchimento do molde, com intuito de prever gradientes de pressão e temperatura, bem como a frente de avanço do polímero. No início dos anos cinquenta, SPENCER E GILMORE (1950) publicaram um artigo onde havia a dedução de uma equação empírica para a simulação do tempo de preenchimento para polímeros amorfos. A partir de então, nas décadas seguintes, centenas de outros trabalhos (KENNEDY, 1995) foram publicados aumentando o conhecimento e interesse geral sobre o assunto.

Com o aumento da demanda por produtos mais baratos e leves, o uso do plástico como insumo básico tornou-o cada vez mais viável e interessante. A eficiência do processo de injeção fez com que ele fosse o método mais difundido para a fabricação de peças plásticas. Porém, um dos principais componentes deste processo, o molde, dependia de projetos baseados em experiências na área de projetos anteriores e algumas heurísticas convencionais de projetos. Isto fazia com que o projeto de um molde exigisse muito tempo até conseguir ser finalmente ajustado e produzir peças com a qualidade desejada. Com isto, os estudos para simulação e modelagem de moldes foram então estimulados.

Além disto, moldes mais elaborados tinham alto retrabalho pós-processo, necessitando de muitas horas em matrizaria para ajustes finos, o que elevava potencialmente os custos com este processo. Desde então, vários modelos têm sido propostos para descrever o ciclo de moldagem por injeção, com muitos graus de complexidade (BARROS, 2004). STAUB (1961) e posteriormente BALLMAN et al. (1991) propuseram um modelo para o fluxo a uma dimensão em uma cavidade retangular. HARRY E PARROT (1970) consideraram uma análise de fluxo em uma dimensão acoplada com uma equação de balanço de energia para uma cavidade retangular, em estado quase

estacionário. WILLIAMS E LORD (1975) deram uma contribuição significativa ao considerar todos os componentes de um fluxo não isotérmico em uma dimensão.

Com todos estes estudos desenvolvidos, softwares comerciais foram criados para serem utilizados como uma ferramenta importante no projeto. Os principais pacotes comerciais de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) disponíveis atualmente, geralmente utilizam os chamados modelos 2,5 D, baseados na aproximação Hele-Shaw (HIEBER & SHEN, 1980) para simular o processo de injeção. Nele o esquema híbrido do método de diferenças finitas e do método dos elementos finitos (FEM-FDM) é aplicado para resolver os campos de pressão e temperatura conforme a frente de fluxo (GUSTAFSSON & VASIL'EV, 2006).

Os modelos que utilizam a abordagem 2,5 D funcionam bem quando a peça possui geometria simples e não apresenta variações bruscas na espessura das paredes. Porém, com a grande utilização deste processo e seu desenvolvimento, surgiram peças com geometrias complexas e, principalmente, contendo estas variações bruscas na espessura das paredes. Com isto, muitos fenômenos que ocorrem durante a fase de preenchimento destes moldes complexos não conseguem ser preditos através dos modelos que utilizam a abordagem 2,5 D. Dentre os principais problemas a se destacar, estão: o comportamento do polímero na superfície livre; regiões de encontro entre duas ou mais frentes de fluxo; a cinemática do escoamento em áreas com grandes taxas de cisalhamento e deformações extensionais, onde há uma grande contribuição para o campo das tensões, dentre outros (CHANG & YANG, 2001; CARDOZO, 2008). Para estes casos a aproximação de Hele-Shaw deixa de ser válida, já que tanto a velocidade quanto a diferença de pressão na direção da espessura devem ser considerados.

A fim de solucionar estes problemas, ao longo das duas últimas décadas, muitos trabalhos envolvendo o desenvolvimento de modelos 3D vêm sendo realizados. Estes trabalhos objetivaram representar o preenchimento do molde no processo de injeção de polímeros o mais próximo do real e, além disto, prever o comportamento do polímero pós-moldagem. Assim é considerada a influência da velocidade e diferença de pressão na direção da espessura da parede. HETU (1998) desenvolveu um método utilizando a abordagem de volumes finitos em três dimensões, usando o método de pseudo-concentração (THOMPSON, 1986). PICHELIN E COUPEZ (1999) desenvolveram um modelo completo de elementos finitos 3D pelo método de Galerkin descontínuo para modelagem por injeção.

Um modelo completo de elementos finitos 3D com condição de não deslizamento na superfície foi desenvolvido para o preenchimento transiente do processo de encapsulamento de *microship* (CHAN et al, 1997). CHANG E YANG (2001) desenvolveram um método de volumes finitos 3D implícito utilizando o algoritmo SIMPLE (*Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations*) para resolução numérica em regime estacionário e o algoritmo PISO (*Pressure Implicit Splitting of Operators*) para regimes no estado transiente. Estes algoritmos são utilizados para o acoplamento pressão-velocidade na simulação do processo de injeção. No entanto, a eficiência computacional exigida é ainda um desafio para simulação destes modelos 3D.

Hoje em dia, os principais parâmetros calculados e obtidos utilizando estes softwares de simulação são: peso da peça pós-moldagem, o tempo estimado de injeção (preenchimento das cavidades do molde), balanceamento do escoamento (dimensionamento de canais, posicionamento de cavidades, etc.), pressão de injeção e

pressão de fechamento de molde, posicionamento dos canais de entrada de água gelada, dentre outros. Alguns softwares também calculam um tempo recomendado para o resfriamento da peça durante o ciclo de injeção, bastante útil para determinação do ciclo total de produção. Todas estas previsões geram redução de custos significativos durante o projeto de fabricação de moldes, porém ainda não permitem prever o comportamento real da peça pós-moldada, bem como o comportamento reológico do polímero durante a fase de preenchimento do molde. Atualmente, existem diversas ferramentas computacionais comerciais para simulação do processo de injeção. Estas ferramentas são conhecidas como CAE (*Computer Aided Engineering*). Alguns dos principais softwares disponíveis no mercado são o Moldflow, o CadMould, o Moldex3D e o MAPS-3D.

Apesar de já existirem softwares para simulações tridimensionais no mercado, a maioria destes softwares utiliza a abordagem 2,5D apresentada anteriormente. Outra desvantagem destes softwares é que a maior parte deles utilizam modelos que consideram apenas o comportamento viscoso de polímeros fundidos, sendo representados por equações reológicas para Fluido Newtoniano (FN) e Fluido Newtoniano Generalizado (FNG). Estes modelos desconsideram o comportamento viscoelástico dos polímeros. Assim, características como tensões residuais, contrações da peça, diferença de tensões normais, entre outras, não podem ser previstas com exatidão. Na maior parte das vezes, em geometrias complexas com mudanças bruscas de espessura, estes modelos apresentam dados bem diferentes do comportamento real (HABLA, 2011).

Utilizando o software CAE OpenFoam, FAVERO et al (2010) desenvolveu uma nova ferramenta CFD para o escoamento de fluidos viscoelásticos em regime isotérmico, o *solver* viscoelasticFluidFoam. O OpenFoam é um software gratuito e de código aberto, baseado na linguagem de programação C, portanto com a possibilidade de incluir equações constitutivas que consideram o comportamento viscoelástico do polímero. FAVERO et al (2010) comparou a resolução numérica com resultados experimentais obtidos na literatura para algumas geometrias utilizadas classicamente na avaliação do desempenho de softwares para simulação de escoamentos de fluidos viscoelásticos em condições isotérmicas. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

OLIVEIRA (2011), baseando-se no *solver* viscoelasticFluidFoam desenvolveu uma metodologia numérica não isotérmica para a simulação da etapa de preenchimento de um molde de injeção, utilizando fluidos viscoelásticos. Neste trabalho, além da introdução de um código para o cálculo do balanço de energia, duas modificações principais foram realizadas: a introdução de um modelo paralelo para o cálculo da viscosidade em função da taxa de cisalhamento e da temperatura e o cálculo das tensões viscosas, utilizando e fazendo uma comparação de diferentes modelos constitutivos, dentre eles o modelo de Leonov.

Os resultados apresentados por OLIVEIRA (2011) indicam que o *solver* desenvolvido viscoelasticThermalFoam tem bastante potencial para representar adequadamente a etapa de preenchimento do molde no processo de injeção. Neste *solver*, foram adotadas as premissas desenvolvidas por este autor, bem como a adoção do modelo de Leonov, que representa muito bem polímeros comerciais existentes. No entanto, a confirmação

deste potencial requer ainda alguns estudos adicionais para validação das predições deste *solver*.

GRANADA (2012) utilizou uma geometria tridimensional complexa construindo uma malha hexaédrica refinada (em torno de 30.000 pontos) para simular o escoamento de PS (poliestireno) em um molde de injeção. Foram introduzidos dutos de saída de ar em pontos estratégicos, baseado no molde original da peça, a fim de facilitar a saída de ar. O trabalho fez uma comparação entre a simulação computacional com dados experimentais. Os resultados mostraram que para o início do escoamento o preenchimento do molde foi bem condizente com a realidade. No entanto, ao fluido entrar em contato com os dutos de saída de ar, parte do polímero escoou artificialmente por estes canais. Com isto, as predições de preenchimento não foram satisfatórias, pois parte do material injetado no molde saiu do sistema por estes canais. Portanto, soluções que resolvam este problema precisam ser estudadas, a fim de que problemas envolvendo dutos de saída do ar contido dentro das cavidades possam ser preditos com este *solver*, apresentando resultados contundentes.

O presente trabalho se insere neste contexto. Com base no *solver* viscoelasticThermalFoam foi feita uma análise da influência da viscosidade em função da temperatura quando o polímero entra em contato com estes dutos de saída de ar. Esta análise objetiva determinar qual o ponto ideal que deverá ser considerado para que o polímero pare de escoar (solidificação) e não entre pelos dutos de saída de ar. Este ponto também é chamado na literatura como temperatura de *No-Flow*, T_{nf} (KENNEDY, 1995). Ela é definida como o ponto em que a massa polimérica cessa o escoamento. Esta abordagem é utilizada por uma boa parte de CAE's existentes, pois ajuda a resolver os problemas encontrados com perda de materiais nos dutos de saída.

A dependência da viscosidade com a temperatura não é linear. Para polímeros amorfos e polímeros cristalinos há grandes diferenças entre estas dependências. Para resoluções numéricas, geralmente utiliza-se uma abordagem matemática para extrapolação dos dados existentes. Assim chega-se a valores de viscosidade para qualquer temperatura em que o polímero se encontra (KENNEDY, 1995). Porém estas aproximações muitas vezes podem ser arriscadas, como mostra a Figura 2.3 onde se observa que o modelo extrapolado proposto se afasta do comportamento real dos polímeros, principalmente quando se trata de polímeros cristalinos. Esta extrapolação funciona bem apenas para temperaturas próximas à temperatura de fusão do polímero (T_m).

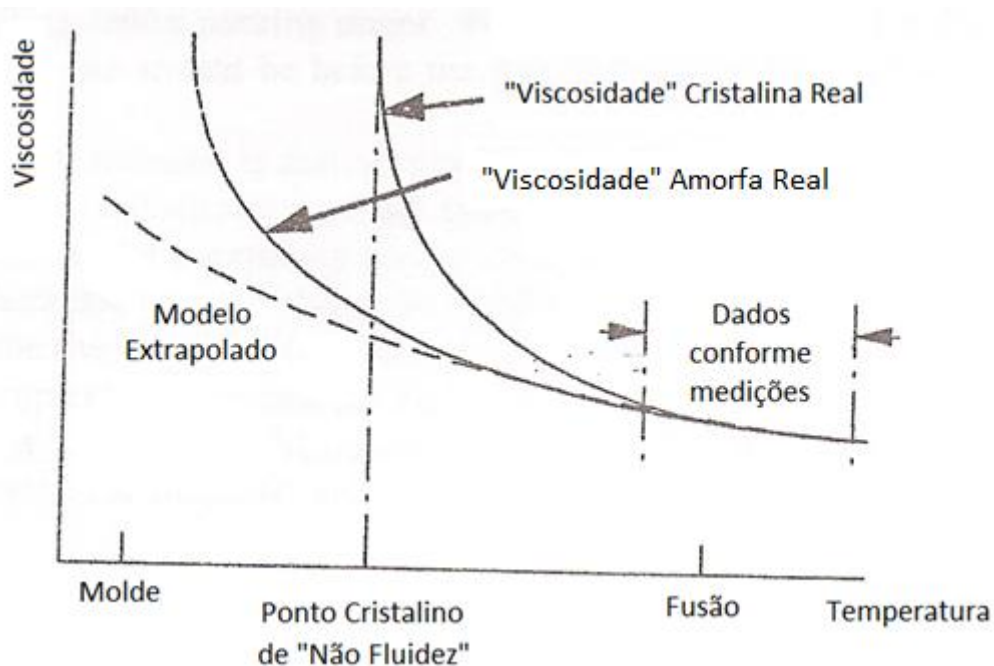


Figura 2.3: Gráfico qualitativo da viscosidade de polímeros cristalinos e amorfos em função da temperatura (adaptado de KENNEDY, *Flow analysis of injection molds*, pg 23, 1995)

Então, a importância da determinação de um ponto ideal para a temperatura T_{nf} é bastante relevante. Com isto, eliminam-se problemas decorrentes pelo escoamento do polímero em regiões onde não deveria escoar. Com isto há também uma redução substancial da carga computacional requerida para resolução dos problemas, já que a partir deste ponto a viscosidade para de depender com a temperatura.

3 Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada neste trabalho. Serão apresentadas: as ferramentas computacionais de simulação utilizadas para resolução do problema, as equações governantes do sistema, descrição dos casos testados, geometrias e malhas utilizadas, os esquemas numéricos aplicados para resolução do sistema de equações, condições de contorno das equações e valores dos parâmetros do modelo reológico adotado, bem como das demais propriedades do material utilizado nas simulações.

3.1 Equações governantes para a simulação do processo de preenchimento do molde no processo de injeção

Conforme discutido previamente, o problema físico em estudo no presente trabalho é a etapa do preenchimento do molde no processo de injeção de materiais poliméricos. A descrição matemática deste problema, para a obtenção dos campos de pressão, velocidade, temperatura e tensão, inclui as equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Para o fluxo de calor existente e o tensor das tensões totais também é necessário a utilização de equações constitutivas. Neste trabalho o escoamento do polímero durante o preenchimento do molde é considerado incompressível.

O balanço de massa para fluidos incompressíveis pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (3.1)$$

onde \underline{u} é o vetor velocidade.

A equação da conservação da quantidade de movimento é apresentada a seguir:

$$\frac{D(\rho \underline{u})}{Dt} - \nabla \cdot \underline{\pi} = \rho \underline{g} \quad (3.2)$$

onde D/Dt é a derivada material (ou substantiva):

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla \quad (3.3)$$

ρ é a massa específica, \underline{g} é o vetor aceleração da gravidade, t é o tempo, $\underline{\pi}$ é o tensor das tensões totais. Este é dado por:

$$\underline{\pi} = -p \underline{\delta} + \underline{\tau} \quad (3.4)$$

sendo $\underline{\tau}$ é o tensor das tensões viscosas, p é a pressão e $\underline{\delta}$ é o tensor unitário.

Substituindo as Equações (3.3) e (3.4) em (3.2), resulta a seguinte forma para a equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \rho \underline{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{u} \underline{u}) - \nabla \cdot \underline{\tau} = -\nabla p + \rho \underline{g} \quad (3.5)$$

Como será considerado sistema incompressível ao longo de todo o trabalho, a massa específica será sempre uma constante. Devido também à elevada contribuição das forças viscosas no escoamento por cisalhamento do polímero, durante o preenchimento da cavidade de um molde de injeção é desconsiderada a contribuição da força da gravidade.

Em condições não isotérmicas, se torna necessário incluir a equação da conservação da energia no conjunto de equações governantes. Esta equação pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla p \right) + p \underline{\nabla} \cdot \underline{u} - \underline{\nabla} \cdot \underline{q} + \underline{\underline{\pi}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) \quad (3.6)$$

onde c_p é o calor específico à pressão constante (assumindo constante neste trabalho), T é a temperatura, β é o coeficiente de compressibilidade e \underline{q} é o vetor fluxo de calor.

Com a consideração de fluido incompressível ($\underline{\nabla} \cdot \underline{u} = 0$), então a equação se resume a:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla p \right) - \underline{\nabla} \cdot \underline{q} + \underline{\underline{\pi}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) \quad (3.7)$$

Também com base na consideração de incompressibilidade, o termo $\underline{\underline{\pi}} : (\underline{\nabla} \underline{u})$ pode ser simplificado utilizando a equação (3.4) (KENNEDY, 1995):

$$\underline{\underline{\pi}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) = \left(-p \underline{\underline{\delta}} + \underline{\underline{\tau}} \right) : (\underline{\nabla} \underline{u}) = \underline{\underline{\tau}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) \quad (3.8)$$

Assim, a equação da conservação da energia fica:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla p \right) - \underline{\nabla} \cdot \underline{q} + \underline{\underline{\tau}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) \quad (3.9)$$

Em processos de injeção, para a etapa de preenchimento, o termo que envolve a variação de energia devido à expansão e compressão do fundido pode ser desconsiderado por apresentar valor insignificante em relação aos demais termos da equação (KENNEDY, 1995). Então a equação da conservação de energia se reduz simplesmente para:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T \right) = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q} + \underline{\underline{\tau}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) \quad (3.10)$$

Considerando-se a predominância da parcela difusiva para o fluxo de calor, o vetor fluxo de calor (\underline{q}) pode ser descrito pela lei de Fourier:

$$\underline{q} = -\kappa \underline{\nabla} T \quad (3.11)$$

onde κ é a condutividade térmica do polímero. Então a equação da conservação de energia fica:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T \right) = \kappa \underline{\nabla}^2 T + \underline{\underline{\tau}} : (\underline{\nabla} \underline{u}) \quad (3.12)$$

sendo que a condutividade térmica pode ser assumida como constante nas faixas de temperatura utilizadas no processamento de polímeros (HASHMABADI & MIRNAJAFIZADEH, 2010).

Para descrever o tensor das tensões viscosas, muitos softwares de CAD utilizam equações constitutivas mecânicas simples como a equação de fluido Newtoniano (FN) ou a equação de fluido Newtoniano Generalizado (FNG). Para este trabalho, foi adotado o modelo viscoelástico de Leonov, que é derivado de uma abordagem termodinâmica. Este modelo reproduz muito bem os dados de cisalhamento estacionários e transientes para polímeros comerciais fundidos. Com ele pode-se descrever razoavelmente bem o processo de moldagem por injeção (BAAIJENS, 1991).

Para os cálculos dos campos de velocidade, temperatura e pressão, em sistemas não isotérmicos, foi utilizado o modelo de Cross-WLF, para representar o comportamento reológico do polímero, com o qual a viscosidade é calculada em função da taxa de cisalhamento e da temperatura. Neste modelo, a viscosidade é expressa como (MACOSKO, 1994):

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (3.18)$$

Onde η é a viscosidade do polímero, η_0 é a viscosidade extrapolada à taxa de cisalhamento nula, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento e τ^* a tensão de cisalhamento na transição entre o comportamento Newtoniano e o comportamento representado pela lei das potências n.

Neste caso, a viscosidade extrapolada a taxa de cisalhamento nula, η_0 , é substituída pela função $\eta_0(T, p)$ calculada da maneira apresentada a seguir:

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp\left(\frac{A_1[T - T^*(p)]}{\tilde{A}_2 + D_3 p + [T - T^*(p)]}\right) \quad (3.19)$$

onde $T^*(p) = D_2 + D_3 p$ e D_1, D_2, D_3, A_1 e \tilde{A}_2 são parâmetros que dependem do material.

O *solver* viscoelasticThermalFoam utiliza o método de volumes finitos para construir a interface. Neste método, o avanço da frente de fluxo em cada uma das células da malha é identificado pela equação:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f \underline{u}) = 0 \quad (3.20)$$

onde f é a fração de uma fase, $f = 0$ corresponde a célula cheia de ar e $f = 1$ a célula cheia com polímero.

Como condições iniciais foram escolhidas os campos nulos para todas as variáveis estudadas, com exceção da temperatura:

$$\begin{cases} \underline{u} = \underline{0} \\ p = 0 \\ f = 0 \\ \underline{\tau} = \underline{0} \end{cases}$$

Para a temperatura, a condição inicial escolhida foi igual à temperatura fixada na parede do molde.

3.2 Ferramentas computacionais e esquemas numéricos utilizados

A base do presente estudo foi a aplicação do *solver* ViscoelasticThermalFoam (OLIVEIRA, 2012), visando dar continuidade aos estudos realizados no grupo para análise do seu potencial de aplicação prática, identificação de suas limitações e de alternativas para melhoria de desempenho.

O *solver* ViscoelasticThermalFoam foi desenvolvido no pacote OpenFOAM, no qual a discretização das equações governantes descritas no tópico anterior são baseadas no método dos volumes finitos (FVM), formulado com arranjo co-localizado de variáveis. No caso específico do ViscoelasticThermalFoam os seguintes esquemas numéricos foram utilizados: integração Gaussiana com interpolação linear (diferenças centrais) para os gradientes, integração Gaussiana com o esquema de interpolação linear *corrected* para o termo Laplaciano, esquema implícito de Euler para os gradientes normais às superfícies e integração de Gauss para os divergentes. Para a velocidade foi utilizada a diferença linear limitada, com o qual o esquema de Van Leer limitado (ou *upwind*) foi utilizado para a fração de fase enquanto que, para o divergente da tensão de cisalhamento, foram utilizados os esquemas linear e *upwind*. Para o termo divergente da temperatura também foi utilizado o esquema *upwind*. Para a resolução do sistema de equações algébrica linear resultante da discretização das equações diferenciais, os seguintes métodos iterativos foram utilizados: gradiente conjugado (PCG) com pré-condicionador Cholesky (DIC) para a pressão e gradiente bi-conjugado (PBiCG) com pré-condicionador LU para a tensão, para a velocidade e para a temperatura.

No estudo do refinamento da malha utilizada por GRANADA (2012) foi utilizado o software ANSYS 13 ICEM CFD, disponível em licença não comercial no laboratório de simulação (LASIM). Para a correta utilização deste software, foi preciso um período de aprendizagem e treinamento do funcionamento deste software (ANSYS ICEM CFD 11.0: Tutorial Manual, 2007). Após a construção da geometria foi necessário a construção de uma malha tridimensional utilizando também este software. A construção da malha foi feita através da aproximação da geometria original em blocos hexaédricos, nos quais cada vértice e aresta dos blocos foram vinculados a pontos e retas da geometria construída.

Com as malhas construídas, foi necessário a importação das mesmas utilizando o software OpenFoam na versão 2.1 (versão mais atual) para posterior simulação. Por ser um software de código aberto, funções como compilação de *solvers* que estão fora de sua biblioteca padrão e a criação e edição do caso estudado precisaram de um tempo de aprendizagem e adaptação (*OpenFOAM Programmer's Guide, version 1.4.1, 2007; OpenFOAM User Guide, version 1.6, 2009*).

As etapas de aprendizagem no ambiente OpenFoam envolveram a compilação de *solvers* disponíveis em sua biblioteca para casos clássicos descritos nos tutoriais do manual OpenFOAM User Guide. O computador utilizado para as etapas de aprendizagem e construção destas malhas mais refinadas foi um Intel® Core™2 Quad CPU Q6600 @ 2.4 GHz com sistemas operacionais Linux, Kernel Linux 2.6.24, Ubuntu 11.10 (utilizado para

rodar o OpenFOAM) e Windows 7 Office Premium (utilizado para rodar o ANSYS 13 ICEM CFD).

No estudo relativo à influência da temperatura de *No-flow*, foi utilizado o software OpenFoam na versão 1.5 dev. A utilização da versão 1.5 dev ao invés da versão 2.1 foi devido ao computador utilizado já possuir o software instalado com o *solver* viscoelasticThermalFoam já adaptado e rodando nesta versão.

Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Simulação (LASIM) do departamento de Engenharia Química (DEQUI). O computador utilizado para as etapas de construção das malhas e simulação dos casos foi um Intel® Core™ i5 cpu 760 @ 2.8 GHz com sistema operacional Linux, Kernel Linux 2.6.32, Ubuntu 11.10.

O software OpenFoam é todo manipulado utilizando o terminal do Linux. Portanto, uma etapa de adaptação e aprendizagem dos principais comandos utilizados deste ambiente também foi necessária. Para a obtenção dos resultados gráficos, foi necessário a utilização da ferramenta *paraFoam*. Esta ferramenta permite visualizar tridimensionalmente a malha gerada e todos os parâmetros da simulação para os tempos calculados. Assim, foi possível exportar as figuras tridimensionais, com os gradientes das propriedades desejadas sendo mostrados através de uma escala de cores.

3.3 Geometria utilizada no estudo do refinamento da malha utilizada por GRANADA (2012)

A geometria utilizada foi a referente à um molde com três cavidades para produção de corpos de prova para ensaios mecânicos, o qual produz a peça apresentada na Figura 3.1.

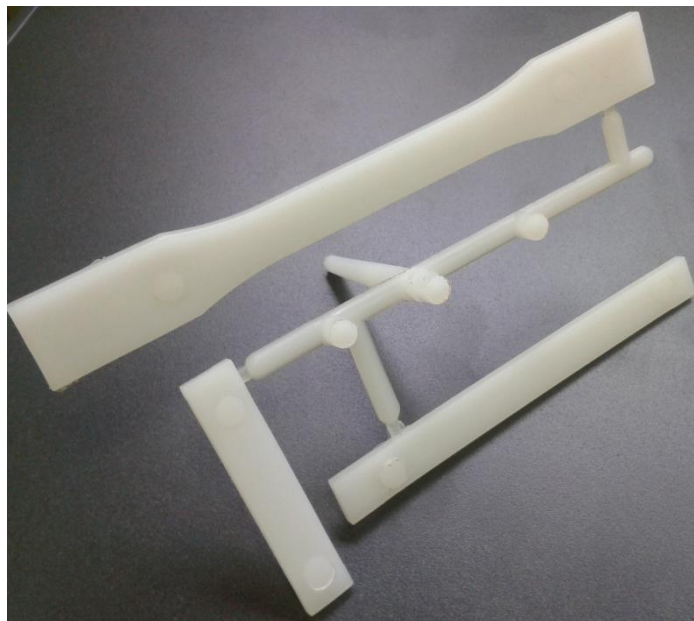


Figura 3.1: Geometria utilizada para caso de refinamento da malha proposta

Foi então criada a geometria tridimensional digital deste modelo. Os dutos de saída de ar na geometria proposta foram posicionados conforme heurísticas adotadas no projeto de construção do molde, buscando-se trabalhar com dutos de diâmetros menores

do que aqueles utilizados por GRANADA (2012). Com isto, o objetivo era avaliar se, um melhor refinamento da malha e uma redução nos dutos de saída de ar eliminariam os problemas com perda de material nos dutos.

Para criação das malhas a serem testadas foi utilizado o software ANSYS 13 ICEM CFD. A geometria criada pode ser vista na Figura 3.2, onde os canais em amarelo representam os dutos de saída de ar.

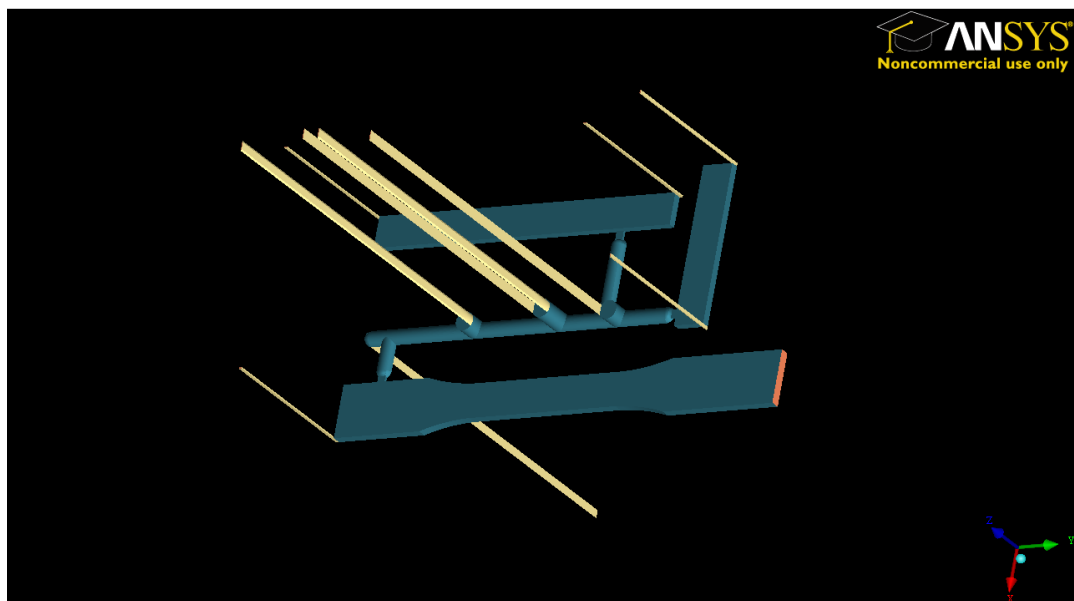


Figura 3.2: Geometria criada no software ANSYS 13 ICEM

3.4 Geometria utilizada na análise da Influência da temperatura de *No-flow*

A geometria estudada neste problema foi escolhida para simular o escoamento de um polímero por uma placa plana de espessura fina, com ponto de injeção central à uma paredes laterais e com três dutos de saída de ar para saída de ar opostos ao ponto de entrada. Esta geometria representa o escoamento de polímeros em peças com paredes bem finas (inferiores à 1 mm), onde altas taxas de cisalhamento são geradas.

A Figura 3.3. mostra a geometria e malha utilizada e a Figura 3.4. mostra o detalhe da malha onde a cavidade encontra os canais. Este geometria foi produzida utilizando o próprio software OpenFoam. Para a malha construída foi utilizado o modelo hexagonal, onde a região por onde o polímero escoar é dividida em diversos blocos hexagonais. Na simulação CFD, os balanços de massa, energia e quantidade de movimento devem ser satisfeitos em todos os volumes de controle existentes na malha sendo resolvidos pelo método VOF.

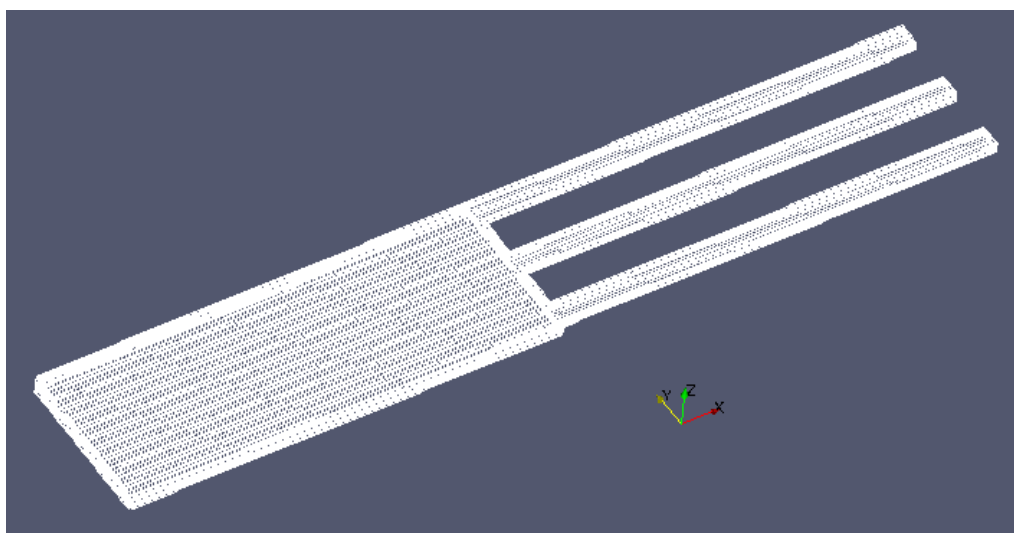


Figura 3.3: Geometria utilizada nas simulações

A fim de evitar o efeito de formação de bolhas enclausuradas nos cantos da cavidade, foram colocados os dutos de saída de ar em ponto estratégico, opostos a entrada de polímero. A espessura destes canais foi delimitada pelo refinamento da malha e, como pode ser visto no detalhe da Figura 3.4, representa metade da espessura da placa. O posicionamento do canal para a parte superior da cavidade da peça foi escolhido considerando práticas usuais de construção de moldes, onde geralmente uma das placas possui a cavidade em si e a outra placa fica praticamente lisa. Com esta escolha do posicionamento dos canais pode-se representar comportamentos mais próximos dos reais encontrados.

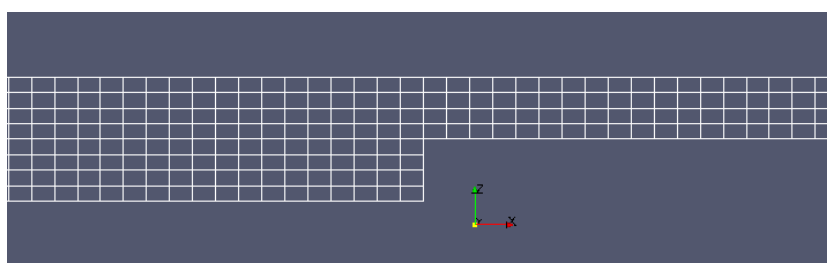


Figura 3.4: Detalhe do refinamento da malha na região de encontro entre cavidade e dutos de saída de ar

As malhas foram construídas utilizando o próprio OpenFoam, que dispõem de recursos para construção de malhas. Todos os casos foram testados com a mesma malha e as características da malha podem ser vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características da malha

| Característica | Valor |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Número de nós | 50004 |
| Nº de faces | 131080 |
| Nº de faces internas | 113720 |
| Número de elementos hexaédricos | 40800 |
| Volume total | $1,53 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ |

3.5 Casos testados na análise da Influência da temperatura de *No-flow*

Neste trabalho foram propostos inicialmente três casos diferentes para analisar a influência da temperatura de *no-flow*, T_{nf} , na viscosidade do polímero. Todos os casos utilizaram a mesma geometria descrita anteriormente na sessão 3.4.

Para cada um dos casos testados foi utilizado uma temperatura T_{nf} diferente, como pode ser visto na Tabela 3.2. Estas temperaturas foram escolhidas com base em dados usuais para processamento do PS (Poliestireno) que foi utilizado nesta como resina injetada simulação.

Tabela 3.2: Casos estudados

| Caso | Temperatura de <i>No-Flow</i> (°C) |
|---------|------------------------------------|
| Vent_08 | 87 |
| Vent_09 | 107 |
| Vent_10 | 127 |

Todos os casos rodaram a partir do tempo inicial $t = 0$ s e o passo de tempo utilizando na simulação variou em 0,01 s até completar toda a geometria estudada. Isso se deu em aproximadamente 0,05 s. Com isto, alguns parâmetros importantes, tais como preenchimento da cavidade e pressão da cavidade, foram extraídos. No ponto onde o polímero entrou em contato próximo aos dutos de saída de ar, aproximadamente 0,04 s, foram feitas novas simulações agora com um novo passo do tempo variando em 0,001 s.

Foi considerada uma velocidade de entrada (velocidade de injeção) de 0,3927 m/s. A temperatura da massa fundida na entrada da cavidade foi de 473 K e a temperatura das paredes do molde e dos dutos de saída de ar foi igual a 323 K.

3.6 Valores dos parâmetros das equações governantes empregados nas simulações referentes à análise da Influência da temperatura de *No-flow*

A resina utilizada para a simulação do processo de moldagem por injeção neste trabalho foi o PS STYRON 615 APR da Dow Chemical, que se trata de um Poliestireno do tipo cristal com Índice de Fluidez próximo aos 20 g / 10 min. Esta resina foi utilizada devido à disponibilidade dos dados para os parâmetros reológicos das equações constitutivas empregadas. As tabelas 3.3-3.5 mostram estes parâmetros utilizados na simulação do preenchimento do molde para esta resina (SHYU E ISAYEV, 2003; BRESS, 2009).

Tabela 3.3: Parâmetros térmicos para o PS (STYRON 615 APR)

| Parâmetro | Valor |
|---|-------------------|
| Condutividade Térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) | 0,122 |
| Calor Específico ($JKg^{-1} \cdot K^{-1}$) | 2050 |
| Difusividade Térmica (m^2s^{-1}) | $6 \cdot 10^{-8}$ |

Tabela 3.4: Parâmetros para a equação de Cross-WLF para o PS (STYRON 615 APR)

| Parâmetro | Valor |
|--|----------------------|
| n | 0,3775 |
| τ^* (Pa) | 12726 |
| D_1 ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) | $7,44 \cdot 10^{10}$ |
| D_2 (K) | 373,15 |
| D_3 | 0 |
| A_1 | 25,391 |
| \tilde{A}_2 (K) | 51,6 |

Tabela 3.5: Parâmetros viscoelásticos lineares para o modelo de Leonov para o PS (STYRON 615 APR)

| Modo | λ (s) | η_p (Pa.s) |
|------|---------------|-----------------|
| 1 | 0,1466 | 2228 |
| 2 | 0,00489 | 446,8 |

4 Resultados e Discussão

4.1 Refinamento da malha utilizada por Granada (2012)

Foram criadas malhas tridimensionais hexaédricas de 100 mil nós e de 1,2 milhões de pontos. Estas malhas foram então avaliadas através da sua razão de aspecto e então geradas de forma genérica em extensão '.msh'. Esta extensão possibilita com que esta malha possa ser utilizada não só pelo ICEM CFD, mas por qualquer outro CAD disponível, inclusive o OpenFOAM. As características das duas malhas geradas são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Características das malhas refinadas

| Característica | Geometria 1 | Geometria 2 |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Número de Nós | 100.000 | 1.200.000 |
| Máxima Razão de Aspecto | < 3,5 | < 3,5 |
| Volume Total | $2,53 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ | $2,63 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ |

Com as malhas criadas, avaliou-se a qualidade de ambas através da sua razão de aspecto (uma das medias utilizadas pelo ANSYS) e tentou-se aplica-las para simulação utilizando o OpenFoam. No caso da malha com 100 mil nós não foi possível completar a etapa de importação para o OpenFOAM, tendo ocorrido um erro cuja natureza não era especificada pelo pacote. Já a malha de 1,2 milhões a etapa de importação pode ser completada, porém surgiram erros, também não especificados pelo pacote, na etapa de blocagem para a paralelização.

Análises adicionais no ICEM, indicaram defeitos nas malhas que podem ter sido a origem dos problemas descritos acima. Detalhe de uma das malhas criadas pode ser visto na Figura 4.1. Nela observa-se um dos problemas encontrados com a criação das malhas em uma geometria complexa. Quanto maior o refinamento mais difícil de eliminar estas distorções. Estas distorções fazem com que o surjam problemas de não convergência, já que nem todos os blocos estão com a geometria hexaédrica perfeita. Ambas as malhas construídas apresentaram estas distorções. Não se conseguiu eliminá-las, mesmo testando diversos métodos (fazendo blocos menores, associando vértice por vértice, associando linha por linha, dentre outras soluções propostas).

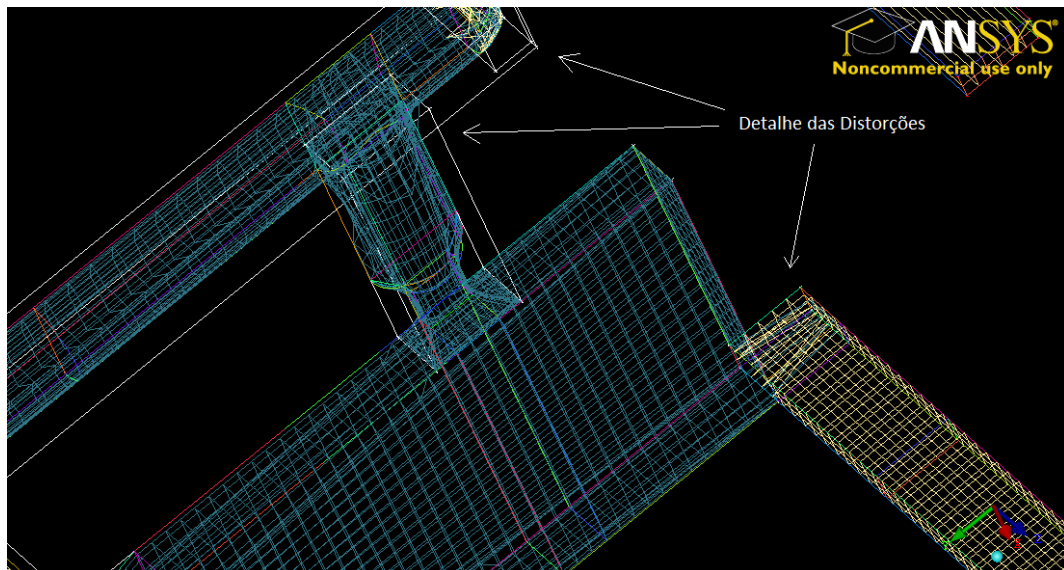


Figura 4.1: Detalhes de uma das geometrias criadas (100 mil pontos). Detalhe das distorções que surgiram na malha durante a criação da mesma.

Assim, em função destes problemas, e do tempo e estudo adicionais que seriam requeridos para a obtenção de malhas adequadas, esta etapa do trabalho foi interrompida, levando em consideração os prazos relativos ao cronograma do TCC.

4.2 Análise da Influência da temperatura de *No-flow*

As etapas de preenchimento da cavidade para as três temperaturas de *No-flow* testadas podem ser vistas nas Figuras 4.2-4.4. Comparando os resultados obtidos para as diferentes simulações, todas elas geraram diferentes comportamentos quanto ao preenchimento da cavidade. Nestes gráficos, a parte azul corresponde ao ar e a fase vermelha ao polímero.

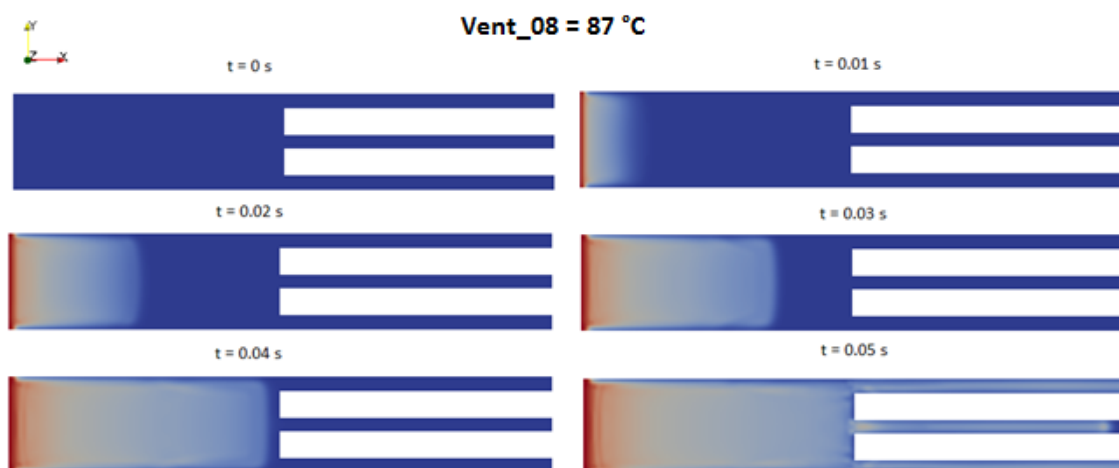


Figura 4.2: Etapas de preenchimento da cavidade para o caso Vent_08

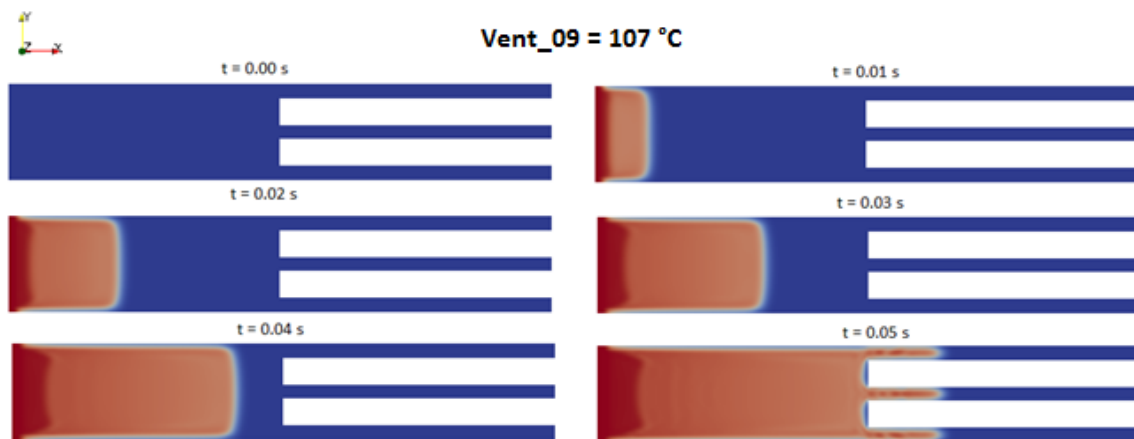


Figura 4.3: Etapas de preenchimento da cavidade para o caso Vent_09

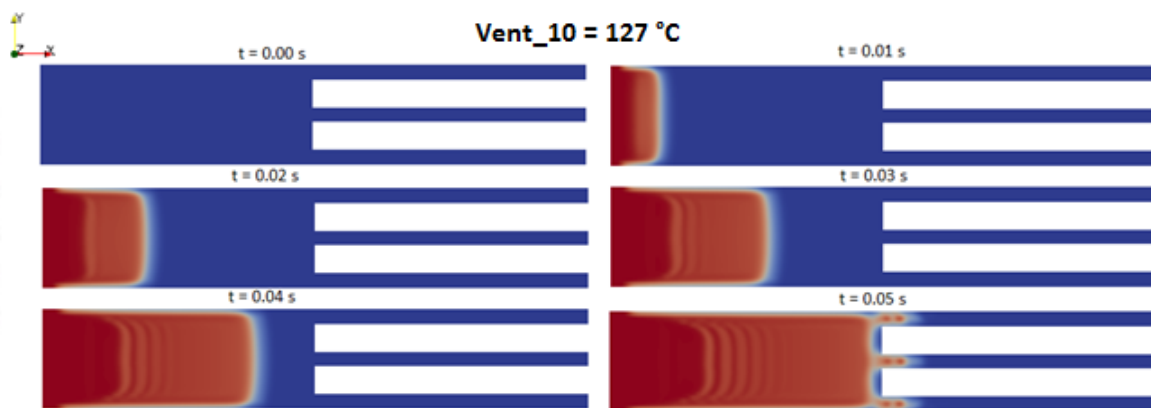


Figura 4.4: Etapas de preenchimento da cavidade para o caso Vent_10

Outra observação importante pode ser feita quanto ao preenchimento se levarmos em consideração o contato do polímero com as paredes. Na temperatura de T_{nf} 87 °C nota-se que a região preenchida está mais clara, diferente da T_{nf} 127 °C que possui uma região bem mais escura. Esta região mais clara deve-se ao fato da imagem ser da parede para o interior da cavidade, ou seja, regiões próximas à parede contém menos polímero que no interior.

Este comportamento pôde ser observado fazendo-se um corte ao longo da cavidade ($x = 0,00075$ m), como mostram as Figuras 4.5-4.7. Estas figuras mostram claramente que nas regiões próximas às paredes (principalmente nos cantos) não está ocorrendo o preenchimento da cavidade.

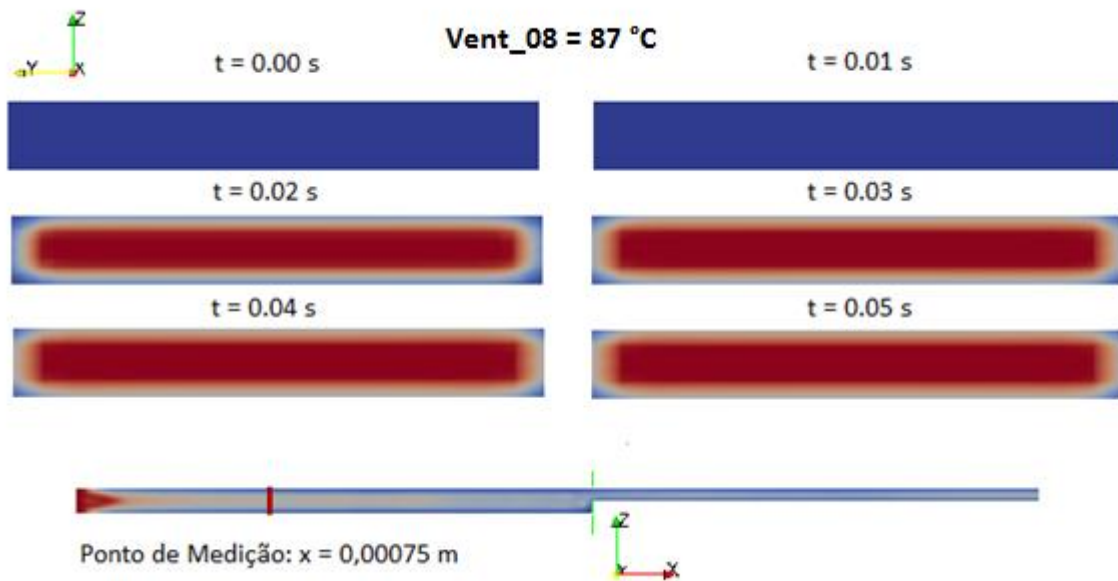


Figura 4.5: Corte transversal normal ao eixo x no ponto 0,00075 para o caso Vent_08

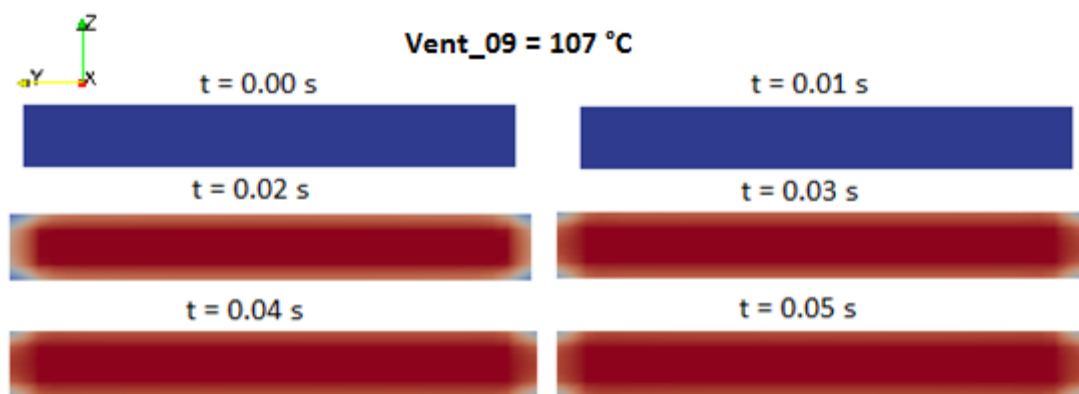


Figura 4.6: Corte transversal normal ao eixo x no ponto 0,00075 para o caso Vent_09

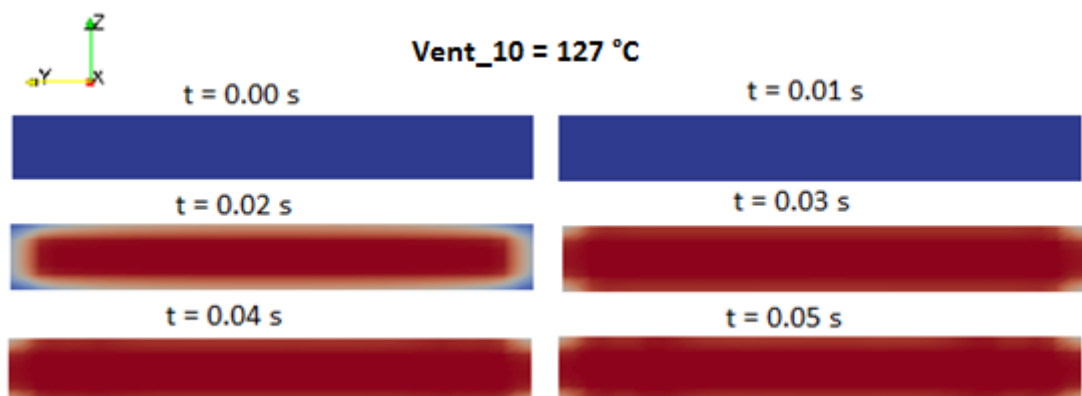


Figura 4.7: Corte transversal normal ao eixo x no ponto 0,00075 para o caso Vent_10

Convém também analisar a pressão na entrada da cavidade, já que esta é a pressão de injeção necessária para empurrar o polímero plastificado para dentro do molde. Em processos de injeção convencionais para PS não são necessárias altas pressões de injeção. Segundo dados encontrados na literatura (HARADA, 2012), as pressões usuais de injeção

para o PS são em torno de 100 à 150 bar (o que equivale à 1×10^7 à $1,5 \times 10^7$ Pa). Pressões acima desta ordem de grandeza, além de comprometer a estrutura física do material, também pode ocasionar danos ao molde, já que os *gates* de injeção (pontos de injeção na entrada da cavidade) são muito pequenos e podem se deformar sob altas pressões. Além disto, há uma barreira física quanto ao limite de pressão que pode ser atingido, devido a limitações de máquina (pressão hidráulica disponível para empurrar a rosca, força de fechamento do molde, etc...).

A pressão de injeção, bem como a pressão requerida para escoar o polímero ao longo da cavidade, pode ser vista nas Figuras 4.8-4.10. Uma informação importante que se pode notar ao visualizar os gráficos é que para T_{nf} menores, maiores são as pressões requeridas na simulação. No caso Vent_08, para o tempo $t = 0,02$ s já é necessária uma pressão de injeção na ordem de 3×10^8 Pa, ou seja, 10 vezes maior do que a pressão usual de processamento. Percebe-se também que para o tempo $t = 0,05$ s, quando o polímero encontra a entrada dos dutos de saída de ar, a pressão em toda cavidade sobe bruscamente, inclusive dentro dos canais. Portanto, nestas simulações, quanto menor a T_{nf} , como no caso Vent_08, maior a facilidade do polímero escoar até os dutos de saída de ar e percorrê-los antes do preenchimento total da cavidade.

Já para casos como o Vent_10, temos um preenchimento bem uniforme, com o polímero demorando mais para chegar na região de encontro com os canais. Isto leva uma facilidade maior de convergência das simulações, eliminando o risco da perda de material pelos dutos. Porém, utilizar temperaturas T_{nf} cerca de 20 % maiores que a temperatura de transição vítrea (T_g)¹ do polímero torna a simulação não muito condizente com o que acontece na realidade. Como as simulações computacionais tentam descrever o comportamento do polímero durante e pós-processamento, muitos dados, tais como tensões residuais, que dependem diretamente da taxa de cisalhamento do polímero e da viscosidade, podem ficar mascaradas.

¹Nota: A temperatura de transição vítrea (T_g) do PS, caracterizada pela quantidade de energia interna suficiente para que as cadeias do polímero adquiram mobilidade, é em torno de 100 °C (CANAVAROLO, 2002).

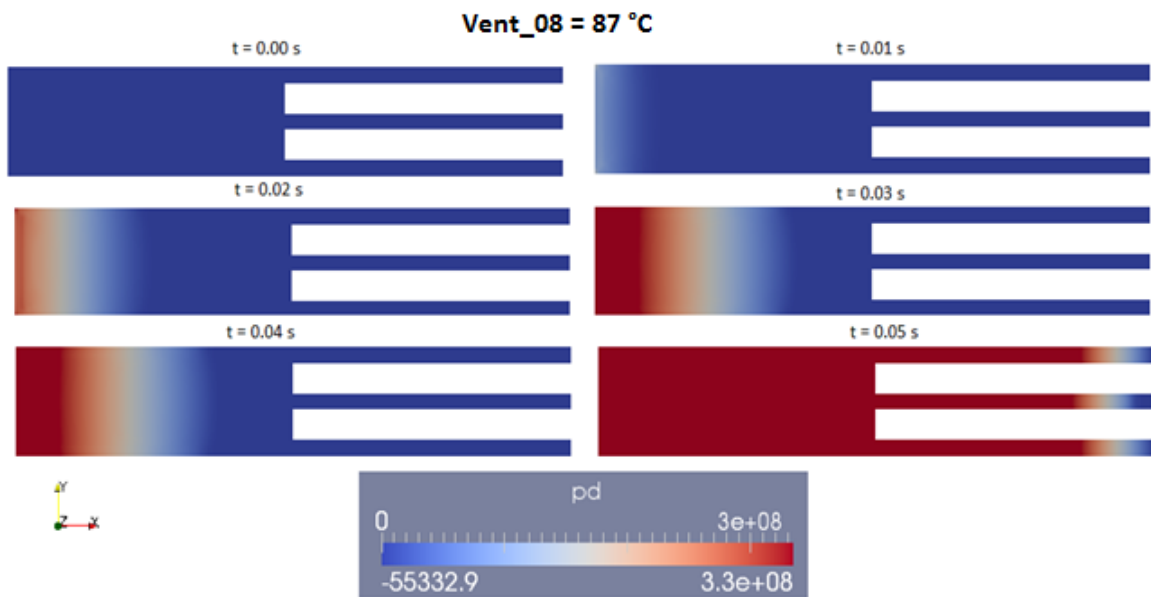


Figura 4.8: Gráfico da pressão no escoamento do polímero no caso Vent_08

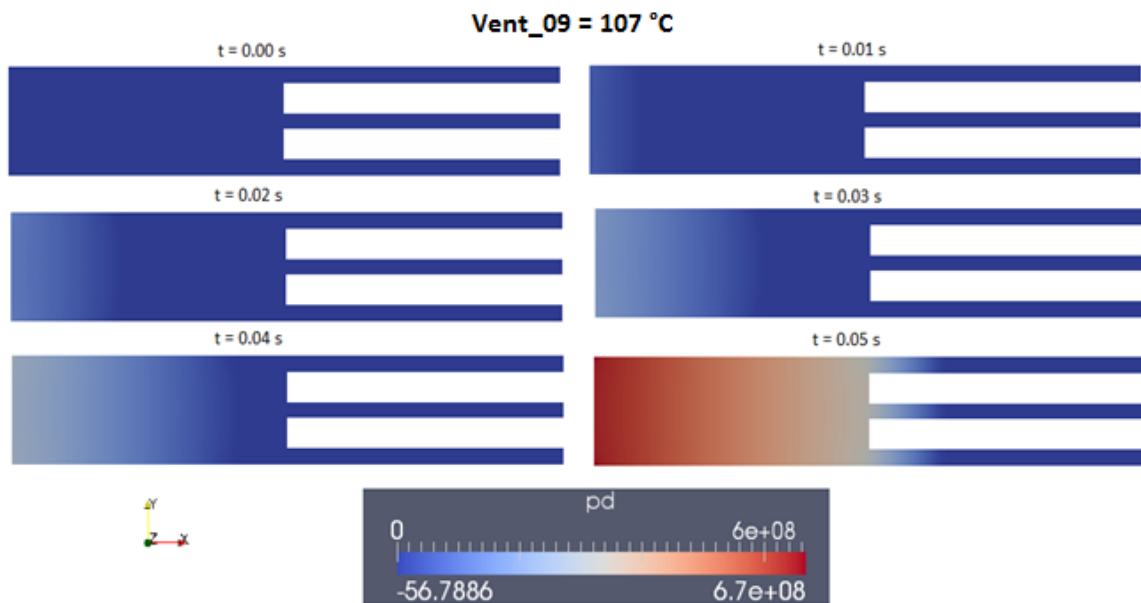


Figura 4.9: Gráfico da pressão no escoamento do polímero no caso Vent_09

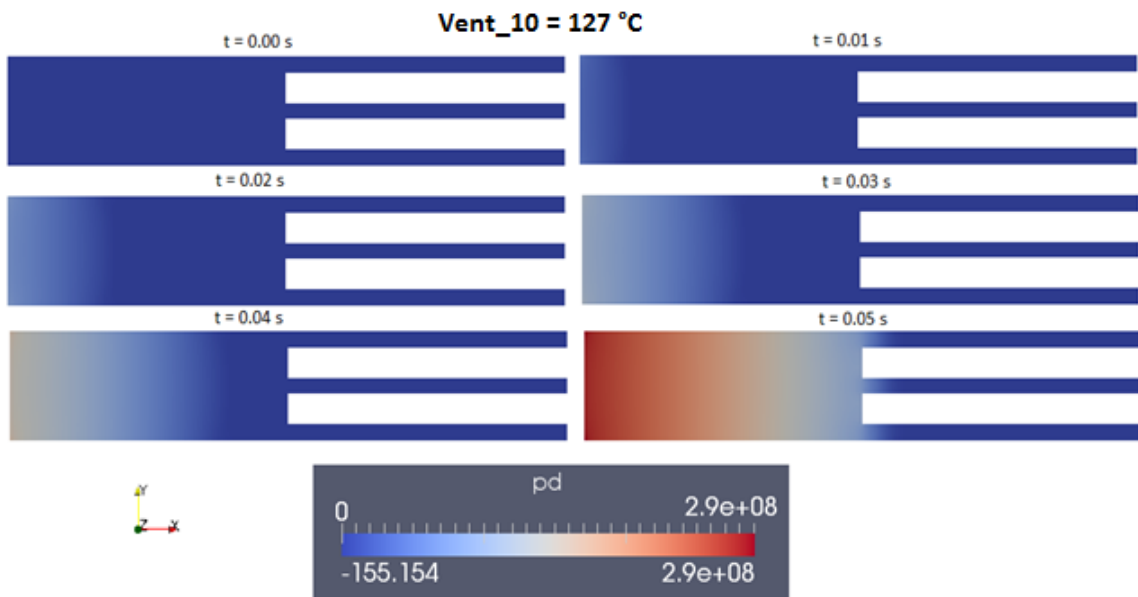


Figura 4.10: Gráfico da pressão no escoamento do polímero no caso Vent_10

Para o caso Vent_08, a T_{nf} está abaixo da temperatura de transição vítrea do polímero. Portanto, na prática, o polímero nestas condições já estaria em sua temperatura de não escoamento. O caso Vent_09 se aproxima bem da Tg, com o valor um pouco acima, sendo o caso simulado trabalhando bem próximo ao que acontece na realidade. Já o caso Vent_10 está consideravelmente acima desta temperatura.

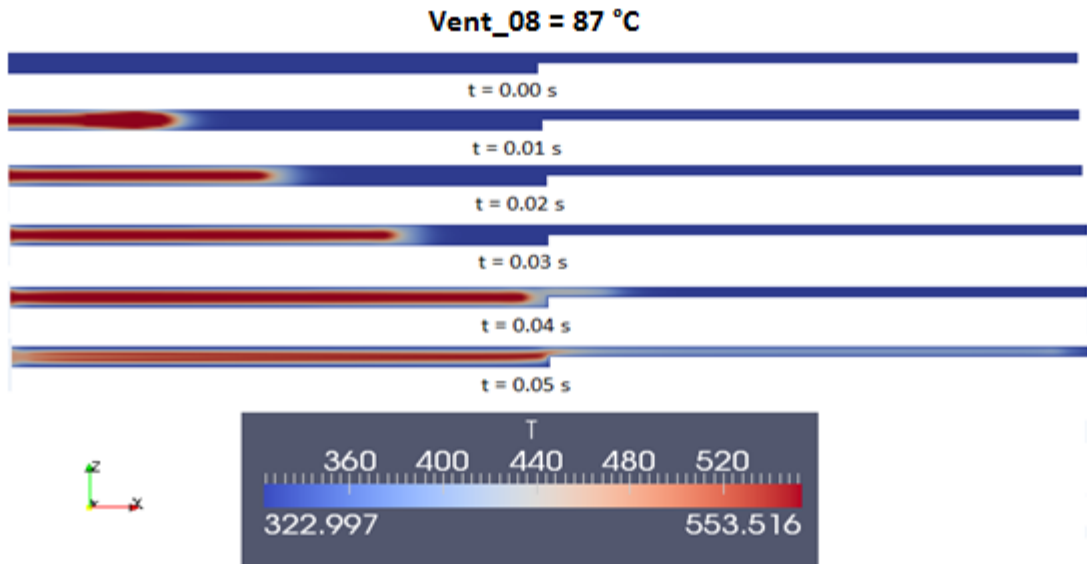


Figura 4.11: Temperatura durante o escoamento para o caso Vent_08 em K

Em relação à temperatura durante o escoamento, podemos analisar as Figuras 4.11-4.13. Nelas percebe-se que para o caso Vent_10 a massa dentro da cavidade encontra-se já em temperatura menor que a massa do caso Vent_08, por exemplo. Nestas figuras, foi feito um corte transversal na normal N_y , bem no centro da cavidade. Este maior

resfriamento no caso Vent_10 deve-se à maior área de troca térmica disponível em relação aos outros casos, já que o polímero encontra-se mais próximo à parede. Todos os casos as temperaturas da escala estão em K.

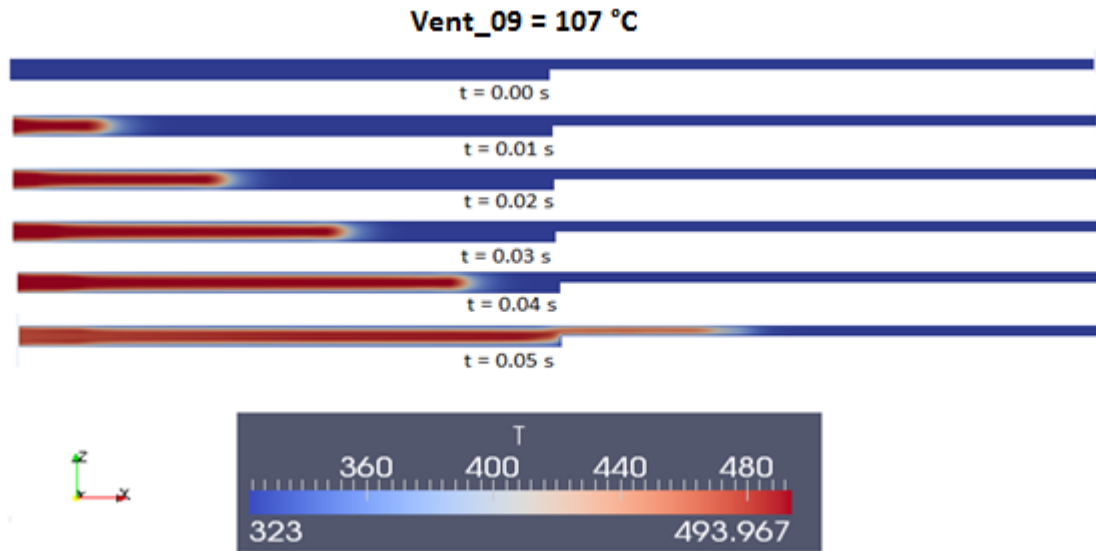


Figura 4.12: Temperatura durante o escoamento para o caso Vent_09 em K

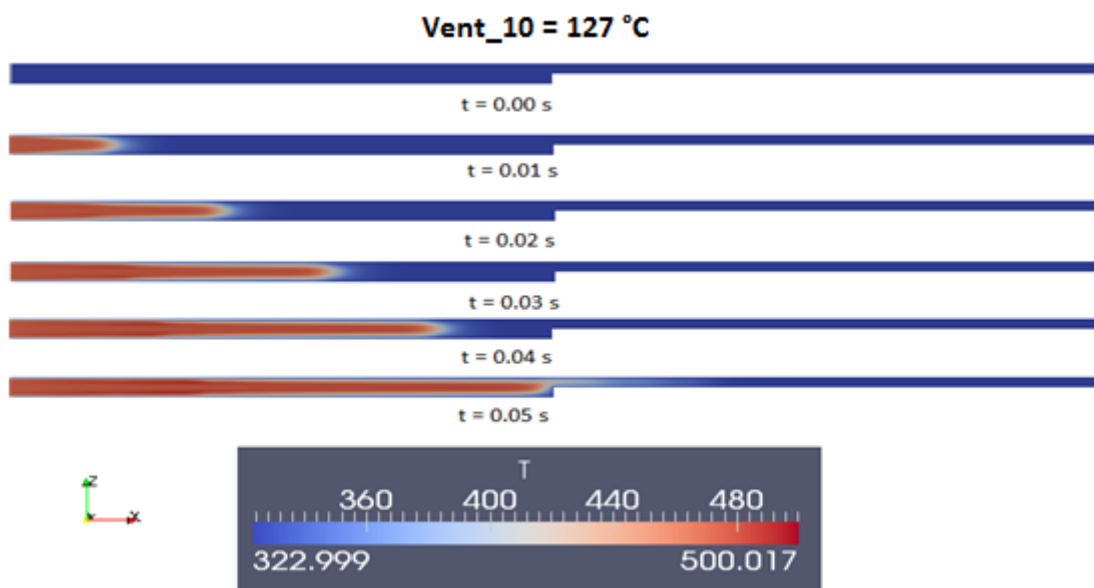


Figura 4.13: Temperatura durante o escoamento para o caso Vent_10 em K

Com base em uma temperatura próxima à T_g do PS, podemos analisar então o caso Vent_09 durante a fase de preenchimento próximo aos dutos de saída de ar, conforme a Figura 4.14. Junto a esta análise, pode-se também comparar o perfil de pressões durante esta etapa pela Figura 4.15. Visualizando o comportamento etapa por etapa pela Figura 4.15, quando se chega ao tempo de 0,044 segundos, a pressão no ponto de injeção já atinge valores próximos da ordem de 10^8 Pa, superior ao limite operacional usual de 10^7 Pa. Portanto, para esta simulação, a etapa de injeção se encerraria neste ponto, pois a rosca não conseguiria empurrar mais massa polimérica na cavidade, começando então o recalque e demais fases do ciclo. Visualizando a Figura 4.14, para o tempo de 0,044 s percebe-se que a cavidade ainda não está completa, porém o preenchimento da mesma

está bem uniforme e quase no estágio final. Também se percebe, pela tonalidade azul escura nos dutos de saída de ar, que nada do polímero entrou por nenhum dos canais. Este comportamento é diferente do observado no tempo 0,044 para o caso Vent_08 na Figura 4.16, onde metade dos canais já estão preenchidos de polímero.

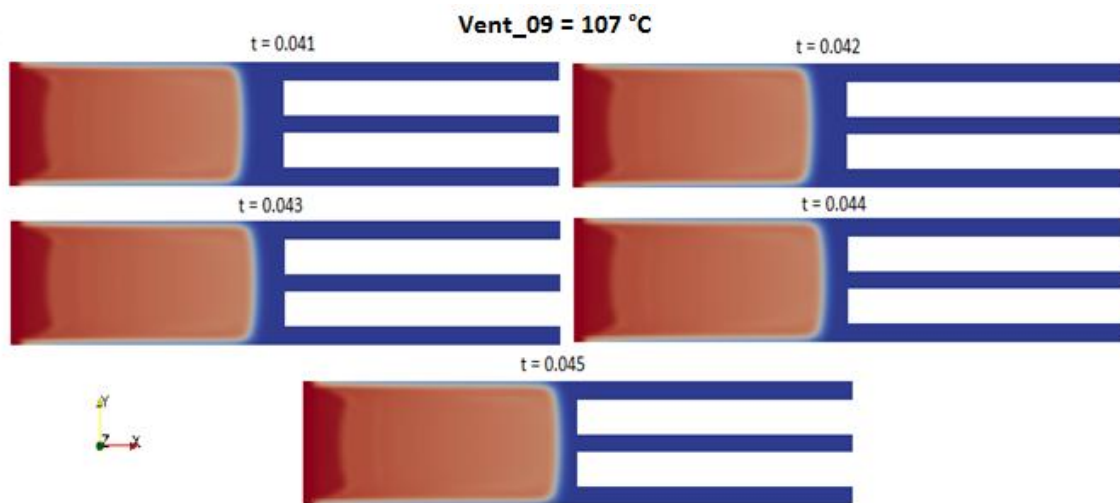


Figura 4.14: Preenchimento de polímero durante a fase de encontro com os dutos de saída de ar para o caso Vent_09

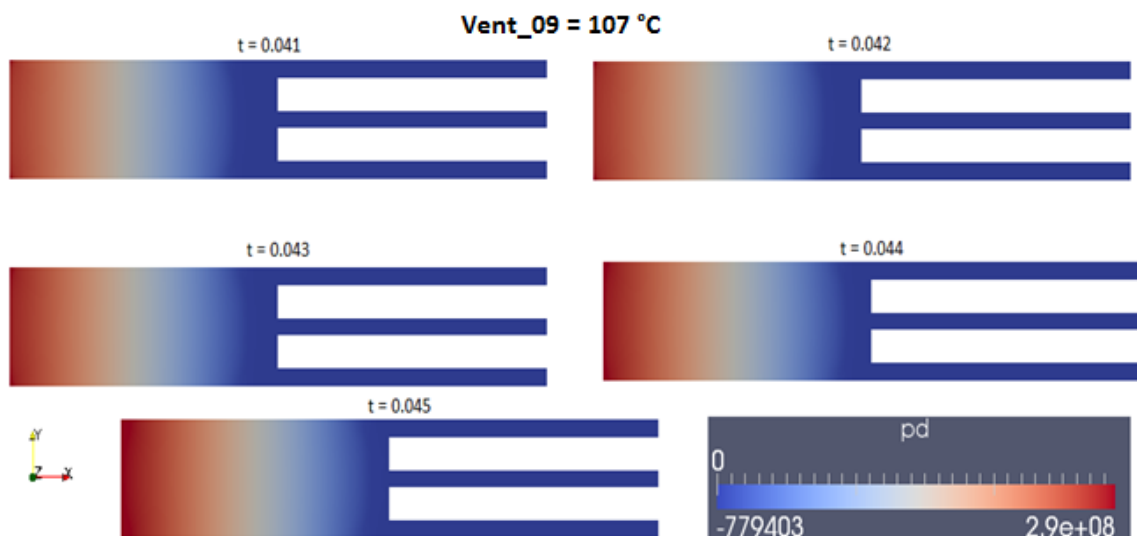


Figura 4.15: Perfil de pressão do escoamento durante a fase de encontro com os dutos de saída de ar para o caso Vent_09

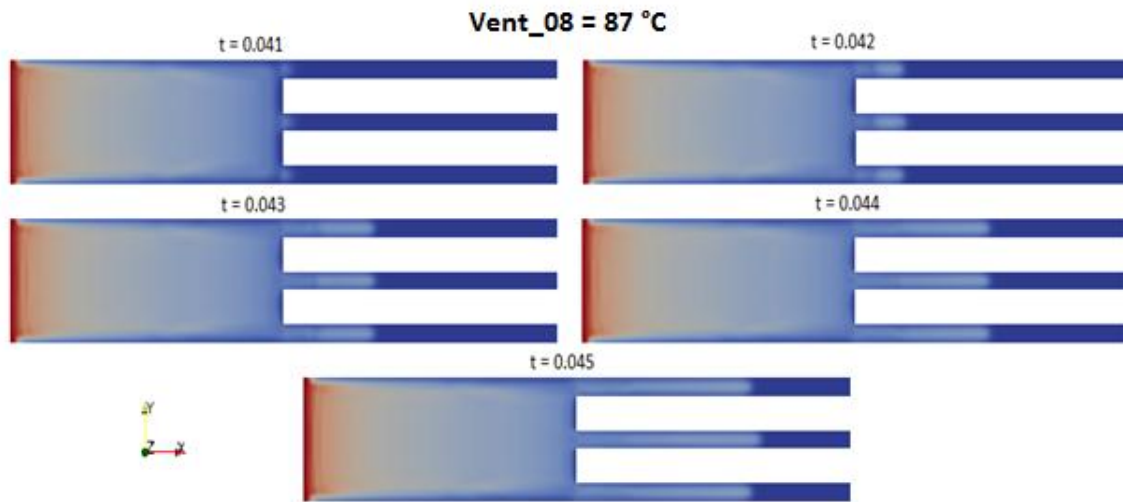


Figura 4.16: Preenchimento de polímero durante a fase de encontro com os dutos de saída de ar para o caso Vent_08

Com base nos resultados apresentados, observa-se que, quanto menor a T_{nf} considerada, menor é o preenchimento junto às paredes. Claramente, este comportamento, a falta de preenchimento, não corresponde ao observado na prática. Na simulação, as regiões em azul próximas à parede na verdade não estão 100 % ausentes de polímero. Nestas regiões há uma mistura de ar com polímero, criando uma região incompletamente preenchida com polímero solidificado ou de elevada viscosidade, que impede o avanço da massa polimérica a regiões próximas à parede. Nesta região, a qual somente para facilidade de referência será mencionada daqui em diante como região “porosa”, a temperatura já está suficientemente baixa a ponto do polímero não mais escoar, portanto forçando o polímero a escoar pelas regiões centrais.

Como a vazão de entrada na cavidade é sempre constante e a simulação não está conseguindo representar o preenchimento completo da cavidade, a área projetada para o escoamento é menor do que a real. Com isto maior é a velocidade ao longo da direção x (U_x) observada do polímero. Isso pode ser visto na Figura 4.17, onde há o perfil de velocidade U_x para cada um dos casos testados. Para o caso Vent_08, onde temos a menor área projetada vemos que o polímero alcança maiores velocidades. Os dados retirados destes gráficos foram no ponto $x = 0,017$ m (comprimento da cavidade), $y = 0,035$ m (largura da cavidade) e para z de 0 à 0,09 m (espessura da cavidade).

Esta redução artificial da área projetada disponível para escoamento também contribui para o aumento de pressão significativo observado para menores T_{nf} .

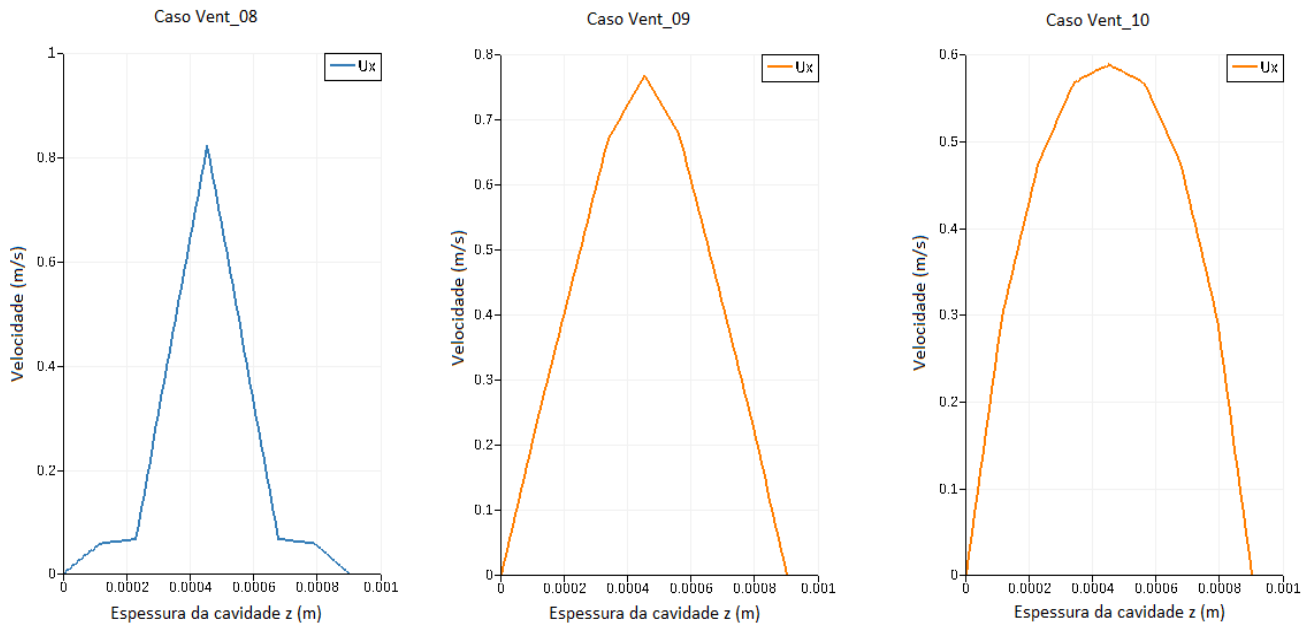


Figura 4.17: Perfis de Velocidade dos casos estudados

Uma possível explicação para o não preenchimento uniforme observado nas simulações é o fato de não se ter utilizado malhas suficientemente refinadas junto às paredes. Este maior refinamento não foi possível devido ao tempo disponível para realizar as simulações, visto que elas tornam-se muito lentas para malhas muito refinadas. O refinamento é crítico nesta situação próxima as paredes devido à necessidade de as razões de aspecto dos volumes de controle sejam próximas do valor unitário. Isto ocorre porque, ao aumentar o número de células ao longo da espessura é necessário aumentar na mesma proporção o número de células nas direções x e y .

Outra questão a ser resolvida é o estabelecimento de uma viscosidade limite relacionada com a T_{nf} . As opções que podem ser avaliadas seriam fixar uma viscosidade limite elevada ou utilizar um modelo de variação da viscosidade em função da temperatura estabelecida para as temperaturas próximas à T_g . A viscosidade limite fixada deve ser significativamente alta a ponto de não permitir escoamento perceptível do polímero que está a temperaturas iguais ou inferiores a T_{nf} . Tudo isto deve ser considerado aliado à questão do refinamento da malha para zonas próximas às paredes.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram propostos dois estudos relacionados à aplicação do *solver* viscoelasticThermalFoam: o refinamento de uma malha complexa para solução do problema de perda de material pelos dutos de saída de ar e a análise do limite de estabilidade do escoamento de polímeros no processo de injeção com relação à viscosidade do fluido. Devido a problemas encontrados nas malhas para o primeiro estudo, ficou estabelecida a necessidade de uma análise mais aprofundada para a construção das mesmas, ficando fora do tempo cabível para realização neste trabalho.

Para o segundo estudo proposto, foi feita a análise testando três valores para a temperatura de no-flow (T_{nf}) do polímero. Observou-se que este parâmetro exerce uma influência significativa sobre as predições do *solver*, provocando variações nas distribuições de pressão, velocidade e temperatura e no padrão de preenchimento do molde. O fato de algumas das diferenças encontradas podem ter sido intensificadas pelo baixo refinamento da malha utilizada, impede que se chegue a conclusões definitivas. Porém este estudo evidencia a necessidade de fazer um estudo mais completo da influência deste parâmetro, comparando, se possível, com dados experimentais.

Neste sentido, aspectos a serem considerados em trabalhos futuros seriam: realização de simulações com malhas muito mais refinadas e com maior grau de refinamento junto às paredes, definição de experimentos que possam gerar dados adequados para a análise dos resultados obtidos numericamente, testar o desempenho comparativo de diferentes estratégias para a definição da condição de não-escoamento e analisar o critério para fixação da temperatura de *no-flow*.

6 Referências

- ANSYS ICEM CFD 11.0: Tutorial Manual (Janeiro de 2007).
- BAAIJENS, F.P.T. Calculation of Residual Stresses in injection molded products. *Rheologica Acta*, Holanda, 1991.
- BALLMAN, R. L.; SCHUSMAN, T.; TOOR, H. L. Injection Molding: Flow of a Molten Polymer into a Cold Cavity. *Industry Engineering Chemistry*, Vol. 51, n.º 7, p. 847-850, 1959.
- BARROS, I.M.F.C.S. *Modelação do Comportamento Térmico de Moldes de Injeção*. Universidade do Minho, Portugal, 2004.
- CANEVAROLO, S. V., *Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*, São Paulo, 2002.
- CARDOZO, D. Three models of the 3D filling simulation for injection molding: a brief review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 27, p.1963 – 1974, 2008.
- CHANG, R. Y., & YANG, W. H. Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three-dimensional finite volume approach. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Taiwan, 2001.
- FAVERO, J.L., SECCHI, A.R., CARDOZO, N.S.M., JASAK, H. Viscoelastic flow analysis using the software OpenFOAM and differential constitutive equations, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Brasil, 2010.
- FERNANDES, A. C., FERREIRA, A. M., JUNKES, R., MOLINARI, E., LEITE, J. L., BECKERT, S. F., Influência da “velocidade de injeção” e “tempo de recalque” nas características de peças injetadas em polipropileno, 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2011.
- GRANADA, J. E., *Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por injeção de polímeros*, 2012.
- GUSTAFSSON, B; VASIL’EV, A; *Conformal and Potential Analises in Hele-Shaw Cell*, SPRINGER VERLAG NY, Noruega, 2006.
- HABLA, F., WOITALKA, A., NEUNER, S., HINRICHSEN, O. Development of a methodology for numerical simulation of non-isothermal viscoelastic fluid flows with application to axisymmetric 4:1 contraction flows, *Chemical Engineering Journal*, Volumes 207–208, Pages 772-784, 2012
- HAN, K. H., & IM, Y. T., Compressible flow analysis of filling and post-filling in injection molding with phase-change effect. *Composites Structures*, Coreia do Sul, 1997.
- HAN, R., SHI, L. & GUPTA, M, Three-dimensional simulation of microchip encapsulation process. *Polymer Engineering and Science*, Michigan, 2000.

HARADA, J., UEKI, M. M., Injeção de termoplásticos – produtividade com qualidade, São Paulo, 2012.

HARRY, D. H.; PARROT, R. G. Numerical Simulation of Injection Molding Filling. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 10, n.º 4, p. 209-214, 1970.

HASHEMABAD, S. H., MIRNAJAFIZADEH, S. M. Analysis of viscoelastic fluid flow with temperature dependent properties in plane Couette flow and thin annuli. *Applied Mathematical Modelling* 34, pages 919-930, 2010.

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*, Canada, 1998.

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.

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

LARSON, R. G., Constitutive Equations for Polymer Melts and Solutions, Butterworth Publishers, Boston, 1998.

MACOSKO, C. W., Rheology Principles, Measurements and Applications. Wiley-VCH, Inc., New York, 1994.

MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos : rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes, Artliber Editora, 2005.

OLIVEIRA, J. A. P., Análise numérica de tensões induzidas pelo escoamento no preenchimento não isotérmico de cavidades de paredes finas com polímero amorfo, 2011.

OpenFOAM Programmer's Guide, version 1.4.1. (01 de Agosto de 2007).

OpenFOAM User Guide, version 1.6 (24 de Julho de 2009).

PICHELIN, E. & COUPEZ, T., A Taylor discontinuous Galerkin method for the thermal solution in 3D filling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, França, 1999.

SHYU, G.D., ISAYEV, A.I., Numerical simulation of flow-induced bi-refringence in injection molded disk, Chungju – Korea, 2003.

SPENCER, R.S.; GILMORE, G.D. Some flow phenomena in the injection molding of polystyrene. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1950.

STAUB, R. B. Effect of Basic Polymer Properties on Injection Molding Behavior. *SPE Journal*, Vol. 17, p. 345-349, 1961.

THOMPSON, E., Use of pseudo-concentrations to follow creeping viscous flows during transient analysis *Int. J. Numer. Meth Fluids*, 1986.

WILLIAMS, G.; LORD. H. A. The Injection Molding of Thermoplastics Materials. Part I: Flow of Plastic Materials in Hot and Cold Walled Circular Channels. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 15, n.º 8, p. 553-558, 1975.