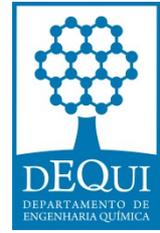




UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por injeção de polímeros.

Autor: Jonas Eichelberger Granada

Orientador: Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Coorientador: João Antônio Pinto de Oliveira

Porto Alegre, 21 de Junho

Sumário

Sumário.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Símbolos.....	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	ix
1 Introdução.....	1
2 Conceitos fundamentais e revisão bibliográfica.....	3
2.1 Processo de moldagem por injeção de polímeros.....	3
2.2 Simulação do processo de moldagem por injeção.....	4
3 Materiais e Métodos.....	8
3.1 Aprendizagem das ferramentas computacionais a serem utilizadas.....	8
3.2 Equações governantes para a simulação do processo de preenchimento de cavidades no processo de moldagem por injeção ..	9
3.3 Metodologia numérica.....	13
3.4 Geometria estudada.....	13
3.5 Metodologia experimental.....	16
3.6 Valores dos parâmetros das equações governantes empregados nas simulações.....	16
4 Resultados.....	18
5 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	24
6 Referências.....	26
APÊNDICE 1.....	29

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo, pela orientação neste e em muitos outros trabalhos nos quais seu apoio foi indispensável, pelo aprendizado tanto na área de engenharia quanto em ética e profissionalismo e pela amizade ao longo destes últimos anos. Agradeço também ao Prof. M. João Antônio Pinto de Oliveira pelo apoio, compreensão e orientação durante este trabalho.

Agradeço muito aos meus pais, Luiz Carlos e Rita, pelo apoio, educação e afeto que sempre me proporcionaram e, agradeço também, à minha querida irmã Camille. O apoio incondicional de minha família, foi sem dúvida, indispensável ao longo de minha formação em Engenharia Química.

Gostaria de agradecer também ao grupo *Paintball*, pela grande amizade e entretenimento que me proporcionaram durante a graduação. Agradeço também às pessoas com quem convivi ao longo do curso de Engenharia Química, em especial minha prima Franciele Eichelberger Granada.

Por último, gostaria de agradecer à Paola Gonçalves pelo companheirismo, carinho e pelas aventuras que virão daqui para frente.

Resumo

Moldagem por injeção é um processo muito importante na indústria de artigos plásticos. Este processo requer projeto e fabricação de moldes que são muito caros, de modo que a simulação do processo de injeção é uma ferramenta importante no sentido de diminuir o custo de fabricação de moldes bem como melhorar a sua qualidade. Existem *softwares* comerciais para esta tarefa, mas estes apresentam custo elevado e possuem código fechado não permitindo, por exemplo, introdução de modelos viscoelásticos visando a predição de algumas das propriedades finais dos artigos moldados e sua avaliação para predição de propriedades dos materiais utilizados na fabricação dos artigos. Neste trabalho o objetivo é uma avaliação preliminar do desempenho do *solver viscoelasticThermalFoamDouvernD*, desenvolvido no pacote OpenFOAM, na simulação do preenchimento de cavidades no processo de injeção. O OpenFOAM é um pacote com código aberto e disponível para *download*. A avaliação do *solver* estudado é feita qualitativamente, comparando-se visualmente resultados obtidos com experimentos desenvolvidos no presente trabalho com as predições da frente de fluxo fornecidas pelo *solver*. Os resultados obtidos indicam que o *solver viscoelasticThermalFoamDouvernD* tem potencial para ser utilizado na análise da distribuição das frentes de fluxo no escoamento dentro de moldes multicavidade e no estudo de posicionamento de canais de ventagem.

Lista de Figuras

2.1	Máquina injetora e componentes das unidades de fechamento e de injeção.	3
3.1	a. Peça moldada por injeção. b. Geometria digitalizada.	14
3.2	Dutos de ventagem posicionados em a. geometria02 b. geometria01.	15
4.1	Comparação entre: a. Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 5 cm ³ . b. Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,04 s	18
4.2	Comparação entre: a. Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 7 cm ³ . b. Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,1 s	19
4.3	Comparação entre: a. Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 10 cm ³ . b. Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,16 s	19
4.4	Comparação entre: a. Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 13 cm ³ . b. Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,35 s	20
4.5	Comparação entre: a. Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 16 cm ³ . b. Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,48 s	21
4.6	Comparação entre: a. geometria01 no instante de 0,48 segundos de processo simulado. b. geometria02 no instante de 0,40 segundos de processo simulado .	22

Lista de Tabelas

3.1	Características das malhas utilizadas na simulação CFD.	15
3.2	Parâmetros térmicos para o PS (STYRON 615 APR).	17
3.3	Parâmetros para a equação de Cross-WLF para o PS (STYRON 615 APR).	17
3.4	Parâmetros viscoelásticos lineares para o modelo Leonov para o PS (STYRON 615 APR).	17

Lista de Símbolos

β	coeficiente de compressibilidade
δ	tensor unitário
$\dot{\gamma}$	taxa de cisalhamento
η_0	viscosidade extrapolada a taxa de cisalhamento nula
κ	condutividade térmica
λ	tempo de relaxação
$\underline{\underline{\pi}}$	tensor das tensões totais
ρ	massa específica
$\underline{\underline{\nabla \sigma}}$	é a derivada convectiva superior do tensor σ
$\underline{\underline{\sigma}}$	tensor tensão definido por $\tau \equiv \sigma - G \delta$
$\underline{\underline{\tau}}$	tensor das tensões viscosas
τ^*	tensão de cisalhamento na transição entre o comportamento Newtoniano e o comportamento representado pela lei das potências.
$\underline{\underline{\nabla \tau}}$	é a derivada convectiva superior do tensor τ
$\text{tr}(\tau)$	traço do tensor das tensões viscosas τ .
A_1 e \tilde{A}_2 WLF	parâmetros que dependem do material para o modelo WLF
c_p	calor específico a pressão constante
$\underline{\underline{D}}$	tensor taxa de deformação
D_1, D_2, D_3 WLF	parâmetros que dependem do material para o modelo WLF
g	vetor aceleração da gravidade
G	constante definida como $G = \eta_0 \lambda$

*Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por
injeção de polímeros*

p	pressão
\underline{q}	vetor fluxo de calor
t	tempo
T	temperatura
T_0	temperatura de referência
D/Dt	derivada material (ou substantiva) do tempo
\underline{u}	vetor velocidade

Lista de Abreviaturas e Siglas

OpenFOAM	<i>Open Field Operation and Manipulation</i>
GLP	<i>Gnu Public License</i>
SIMPLE	<i>Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
PCG	<i>Preconditioned Conjugate Gradient</i>
DIC	<i>Diagonal-based Incomplete Cholesky</i>
PBiCG	<i>Preconditioned Bi-conjugate Gradient</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FDM	<i>Finite Difference Method</i>
VOF	<i>Volume Of Fluid</i>

1 Introdução

O processo de injeção de plásticos em moldes é um dos processos mais importantes na indústria de terceira geração de polímeros. Isso se deve à grande versatilidade do processo, capaz de produzir desde peças pequenas e detalhadas como componentes eletrônicos até peças grandes e robustas como pára-choques para indústria automotiva.

A injeção de polímeros é um processo cíclico e descontínuo que pode ser separado em três etapas: preenchimento, recalque e solidificação. No preenchimento, o polímero previamente fundido é injetado sob pressão para preencher as cavidades do molde. Logo em seguida no recalque o molde é mantido sobre pressão para que a contração do material seja compensada. E para terminar, a peça é solidificada através de resfriamento (Termoplásticos) ou reação química (Termofixos). A peça é então extraída do molde, normalmente sem necessidade de mais operações de acabamento.

Neste processo a confecção do molde possui uma grande importância, afetando diretamente a produção e qualidade final do produto. O projetista deve ter bons conhecimentos na parte mecânica dos procedimentos de abertura e fechamento do molde. Deve conhecer o tipo de material que será injetado e como este irá se comportar dentro do molde. E, ainda, deve prever como será o fluxo de calor dentro do molde e como irá funcionar o sistema de resfriamento. A complexidade das relações entre as diversas áreas de conhecimento que são necessárias para o projeto de um molde faz com que este seja extremamente complicado.

A partir dos anos 70, a necessidade de otimizar a produção e obter peças com maior qualidade despertou um grande interesse na modelagem matemática do processo de injeção. Daí em diante foi desenvolvida uma grande variedade de ferramentas computacionais capazes de simular boa parte do processo.

O principal objetivo da simulação do processo de injeção de polímeros no projeto de moldes é a previsão de possíveis problemas em relação ao escoamento do polímero dentro das cavidades. Deste modo o projeto do molde pode ser corrigido antes da fabricação do mesmo. A simulação também permite que a prática da "tentativa e erro" seja substituída pela aplicação dos fundamentos, teorias e modelos que representam o problema. Ou seja, a simulação possibilita a utilização do que se aprende nas Ciências e Engenharia para o desenvolvimento de produtos, otimização da produção, redução de custos e melhoria da qualidade.

Existem *softwares* comerciais desenvolvidos para simulação do processo de injeção que possuem vastos bancos de dados contendo as propriedades de milhares de polímeros. Porém, a falta de um modelo reológico constitutivo seguro, capaz de prever o comportamento de uma variedade grande de resinas, torna-se um problema. Além disto, estes *softwares* apresentam custo elevado e, devido a competição

comercial entre empresas que desenvolvem estes programas, sob a prerrogativa de resguardar informações que poderiam facilitar a imitação dos seus códigos, estes possuem código fechado não permitindo, por exemplo, introdução de modelos viscoelásticos visando sua avaliação para predição de propriedades dos materiais utilizados na fabricação dos artigos.

OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) teve, em 2004, seu código liberado e se tornou domínio público através da licença GPL (*Gnu Public License*). A partir deste momento, houve um enorme crescimento de usuários que, além de poder usar os muitos *solvers* padrões que o pacote já possuía para o caso dos problemas mais gerais envolvendo fluidos newtonianos (escoamento compressível e incompressível, escoamento laminar e turbulento, escoamentos multifásicos, etc.), começaram também a construir *solvers* específicos para os seus problemas de interesse (FÁVERO, 2010). O *solver viscoelasticThermalFoamDouverD* está sendo desenvolvido para simular a etapa de preenchimento do processo de injeção, analisando escoamentos não isotérmicos através do uso de um modelo para cálculo da viscosidade em função da taxa de cisalhamento e da temperatura e cálculo das tensões viscoelásticas, com o modelo de Leonov .

Neste trabalho o objetivo é o estudo qualitativo da aplicabilidade do *solver viscoelasticThermalFoamDouverD*, desenvolvido para o pacote OpenFOAM, visando simulação do preenchimento de cavidades.

2 Conceitos fundamentais e revisão bibliográfica

2.1 Processo de moldagem por injeção de polímeros

Desde 1940, a utilização do processo de moldagem por injeção vem sendo utilizado para a produção de produtos plásticos. No início, a injeção era usada exclusivamente para fabricação de produtos pequenos e sem muita complexidade (HARADA, 2004). Mas o crescimento do mercado de produtos plásticos, e por esses produtos possuírem alta aplicabilidade, os transformadores se concentraram em peças mais complexas. Isso trouxe uma enorme evolução no setor de transformação, principalmente no processo de moldagem por injeção.

A moldagem por injeção convencional é um dos processos mais utilizados na transformação do plástico e, em geral, é totalmente automático. Para a produção de artefatos plásticos, o tempo de ciclo normalmente está em torno de 10 a 20 segundos para peças pequenas e até 2 minutos para peças grandes.

Na moldagem por injeção, a resina assume sua forma como produto final através do aquecimento até um estado de fluidez onde possa preencher o molde cuja cavidade determina o formato final da peça. A Figura 2.1 mostra um desenho esquemático de uma máquina injetora e destaca alguns componentes das unidades de fechamento e de injeção.

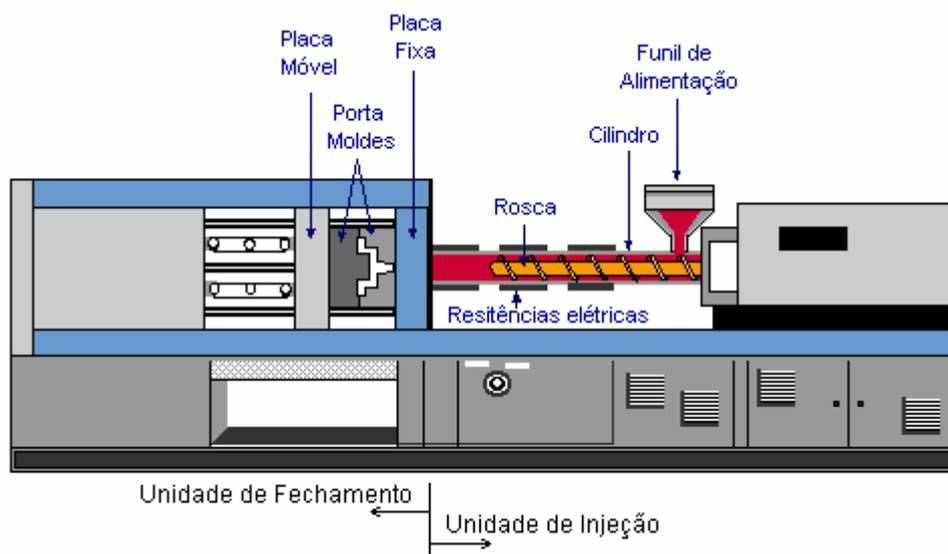


Figura 2.1 – Máquina injetora e componentes das unidades de fechamento e de injeção. (C- MOLD DESIGN GUIDE, 1991)

Resumidamente, o processo de injeção pode ser descrito com base nos passos descritos nos parágrafos a seguir (PROVENZA, 1991)

Primeiramente, o material é dosado, normalmente na forma granular no funil de alimentação. Ao entrar no cilindro o material é arrastado pela rosca e fundido por efeito do atrito com as paredes e pela condução de calor das unidades de aquecimento ao longo do cilindro. O material fundido é empurrado para frente pela rotação da rosca enquanto esta é transladada para trás, formando um reservatório de material próximo ao bico de injeção do molde. Quando o material vai ser injetado, a rosca para seu movimento de rotação e atua como pistão, empurrando a resina para dentro do molde. Nesta fase geralmente a velocidade do material é constante e a pressão aumenta conforme o material vai preenchendo o molde.

Após a cavidade estar completamente preenchida, inicia-se a fase de recalque. Nesta fase o material já preencheu o molde e parou de se deformar fazendo com que a taxa de cisalhamento desta fase seja muito baixa. Isso faz com que a solidificação do material aconteça com maior intensidade. Ao solidificar, o material se contrai, e, para que não haja defeitos com empenamento e bolhas, mantém-se uma pressão de recalque para compensar esta contração do material. Nesta fase a pressão é geralmente mantida constante, fazendo com que mais material seja injetado no molde com vazão variável.

Assim que a zona de entrada do material no molde solidifica o material é mantido no molde sob pressão nula até que a camada de material solidificado seja suficiente para suportar a força dos extratores mecânicos que retiram a peça do molde. Por último, o molde é aberto, a peça é extraída e o ciclo recomeça.

Diversos pacotes computacionais foram desenvolvidos para simular as etapas de preenchimento, recalque e solidificação da peça. Neste trabalho, a simulação é restrita à parte de preenchimento do molde.

2.2 Simulação do processo de moldagem por injeção

Conforme Brito (1995), o primeiro trabalho experimental importante na área de injeção de polímeros foi desenvolvido nos anos 50 por Spencer e Gilmore. Eles estudaram o enchimento de um molde e deduziram uma equação empírica para a determinação do tempo de enchimento. Nas décadas de 60 e 70, centenas de trabalhos empíricos foram publicados (KENNEDY, 1995), aumentando o conhecimento geral sobre o assunto.

Depois de 1970, o uso de plásticos como material viável de engenharia aumentou, devido a necessidade de peças mais leves e de menor custo. Neste contexto a injeção em moldes era o processo mais

eficiente para a fabricação de peças plásticas de geometria complexa com alta precisão e baixo custo. Entretanto, o projeto de moldes dependia demasiadamente da experiência anterior dos projetistas e os testes do molde passavam por muitas etapas de “tentativa e erro” até atingir peças com resultados satisfatórios. A modelagem matemática da moldagem por injeção foi, então, estimulada.

Hieber e Shen (1978) apresentaram uma abordagem sistemática para a simulação do preenchimento no processo de moldagem por injeção, baseado na aproximação de Hele-Shaw, na qual o esquema híbrido do método de elementos finitos e diferenças finitas (FEM-FDM) foi aplicado para resolver os campos de pressão e temperatura com frente de fluxo (GUSTAFSSON & VASIL'EV, 2006). Este modelo é chamado de abordagem 2,5D, pois, o campo de pressão é resolvido em duas dimensões por meio do método de elementos finitos, e os campos de temperatura e velocidade em três dimensões, pelo método de diferenças finitas. Ainda em 1978, o primeiro código comercial, o MOLDFLOW, desenvolvido em Melbourne na Austrália, estava disponível no mercado. Este software permitia aos usuários determinar as condições de processo (temperatura de injeção, temperatura do molde e tempo de injeção) e balancear o fluxo nas cavidades e canais de alimentação. Apesar de aceitável para a época, o programa era muito difícil de ser usado, pois havia a necessidade da construção de um meio-plano para a simulação (KENNEDY, 1995). Atualmente, o modelo 2,5D é aplicado em quase todos os *softwares* disponíveis para simulação do processo de injeção.

Na maioria dos casos, os modelos 2,5D funcionam bem quando a peça tem geometria simples. Entretanto, com o desenvolvimento do processo de moldagem por injeção, as peças apresentam formas cada vez mais complexas. Uma vez que os campos de fluxo em geometrias complexas são tridimensionais por natureza, o modelo 2,5D não pode prever com precisão alguns fenômenos que ocorrem durante o preenchimento de moldes complexos. Exemplos importantes são: o comportamento do fluido na superfície livre, os fenômenos que ocorrem nas regiões de encontro entre duas ou mais frentes de fluxo, e a cinemática do escoamento em áreas onde tanto cisalhamento como deformações extensionais contribuem significativamente para o campo de tensões (pontos de injeção, variações bruscas de espessura, etc.) (CHANG & YANG, 2001). 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.

Ao longo da última década, muitos modelos 3D foram desenvolvidos para representar o preenchimento do molde no processo de injeção de polímeros. Hetu et. al.(1998) desenvolveu um método de elementos 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* (HAN et. al., 2000). Chang e Yang (2001) desenvolveram um método de volumes finitos 3D implícito com um algoritmo SIMPLE (*Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations*), usado para acoplamento pressão-velocidade na simulação do processo de moldagem por injeção. No entanto, a eficiência computacional é ainda um desafio para a simulação do preenchimento de moldes tridimensionais.

Novos polímeros e a demanda por peças de melhor qualidade têm forçado técnicos a melhorar a eficiência do processo de injeção. A simulação do preenchimento do molde em *softwares* comerciais é muito utilizado para estimar tempo de injeção, pressão de injeção, balancear o escoamento e assim reduzir os gastos com a construção de protótipos para melhorar o projeto de peças. Atualmente existem diversas ferramentas comerciais para simulação do processo de injeção, como o Moldflow, o CadMould, o Moldex3D, o MAPS-3D, entre outros. Estas ferramentas são também conhecidas genericamente como sistemas CAE (Computer Aided Engineering).

Apesar de já existirem *softwares* para simulação 3D do preenchimento da cavidade no processo de moldagem por injeção, a maioria destes ainda utiliza a abordagem 2,5D. Outra desvantagem dos *softwares* comerciais é que em sua maioria apresentam modelos para o escoamento de polímeros puramente viscosos sendo representados pelas equações de Fluido Newtoniano e Fluido Newtoniano Generalizado. Estes modelos desconsideram o comportamento viscoelástico dos polímeros fazendo com que características como tensões residuais, diferenças de tensões normais, contração da peça, entre outras, não possam ser previstos com exatidão.

Fávero (2010) desenvolveu uma nova ferramenta de CFD para o escoamento de fluidos viscoelásticos em regime isotérmico, o *solver viscoelasticFluidFoam*. Neste trabalho, a implementação das equações reológicas foi feita no pacote CFD OpenFoam, um software gratuito e de código aberto. A resolução numérica foi comparada com resultados experimentais obtidos na literatura para algumas geometrias utilizadas classicamente na avaliação do desempenho de *softwares* para simulação de escoamentos de fluidos viscoelásticos, obtendo-se resultados 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 com fluidos viscoelásticos. Neste trabalho, além da introdução do código para o cálculo da equação do balanço de energia, duas modificações principais foram realizadas: a introdução de um modelo para cálculo da viscosidade em função da taxa de cisalhamento e da temperatura e cálculo das tensões viscoelásticas, com o modelo de Leonov .

Os resultados apresentados por Oliveira (2011) indicam que o *solver viscoelasticThermalFoamDouvernD* tem potencial para representar

adequadamente a etapa de preenchimento do molde no processo de injeção. No entanto, a confirmação deste potencial requer ainda estudos adicionais para a validação das previsões do *solver*. O presente trabalho se insere neste contexto, sendo que nele se analisa o *solver viscoelasticThermalFoamDouverD* de forma qualitativa, comparando os resultados numéricos da simulação com resultados obtidos experimentalmente para o avanço da frente de fluxo.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada no trabalho. Serão apresentadas as equações governantes do problema em estudo, a metodologia numérica para a solução deste sistema de equações, a geometria utilizada no trabalho, os valores dos parâmetros dos modelos reológicos e das demais propriedades dos materiais utilizados na simulação e experimentos.

3.1 Aprendizagem das ferramentas computacionais a serem utilizadas

A primeira parte deste trabalho consistiu na aprendizagem do funcionamento do *software* OpenFOAM e do ambiente Linux. Por ser um *software* de código aberto o OpenFOAM exige um certo conhecimento do funcionamento deste a nível de usuário para que se possa instalar o *software*, compilar *solvers* que não existem na biblioteca padrão do *pacote* OpenFOAM e, principalmente, para montar o caso a ser estudado. É preciso também o estudo do funcionamento do *solver* para que o caso seja montado de maneira correta.

A etapa de aprendizagem em relação ao *solver viscoelasticThermalFoamDouvenD* envolveu a compilação do referido *solver* no computador que seria utilizado para realização do trabalho (Intel® Core™2 Quad CPU Q6600 @ 2,40 GHz com 8GB de RAM e sistema operacional Linux, Kernel Linux 2.6.24, Ubuntu 11.10, LASIM), e a simulação de casos previamente testados em trabalho do grupo (Oliveira, 2011).

Outra ferramenta requerida para o desenvolvimento do trabalho foi o *software* ANSYS 13 ICEM CFD, utilizado para a representação computacional da geometria da cavidade do molde usada para a confecção da malha, o qual também exigiu uma etapa de aprendizagem. A construção da malha foi feita pela aproximação das diversas partes da geometria à blocos hexaédricos. Cada vértice e aresta dos blocos hexaédricos foram vinculadas a um ponto e linha da geometria respectivamente, e as arestas foram divididas de acordo com o número de elementos que era desejado para determinado bloco em certa dimensão. A partir deste passo a malha é gerada automaticamente pelo software.

3.2 Equações governantes para a simulação do processo de preenchimento de cavidades no processo de moldagem por injeção

No *solver viscoelasticThermalFoamDovenD*, para a obtenção dos campos de pressão, velocidade, temperatura e tensão, relacionados com o escoamento do polímero no preenchimento de cavidades, são utilizadas as equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. Também são necessárias as equações constitutivas para o tensor das tensões e para o fluxo de calor. O escoamento do polímero, durante o preenchimento da cavidade, é considerado incompressível.

A equação de conservação da massa global para fluidos incompressíveis pode ser escrita como:

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

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, e $\underline{\pi}$ é o tensor das tensões totais. Este é dado por:

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

onde $\underline{\tau}$ 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 da equação da conservação da quantidade de movimento:

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

Devido à elevada contribuição das forças viscosas no escoamento por cisalhamento do polímero, no preenchimento da cavidade de um molde de injeção, é desconsiderada a contribuição da força da gravidade (KENNEDY, 1995).

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

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

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 ($\nabla \cdot \underline{u} = 0$), então a equação se resume a:

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

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

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

e a equação da conservação da energia fica:

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

Na modelagem do processo 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 (KENNEDY, 1995). Então a equação da conservação da energia se reduz a:

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

Considerando-se a predominância da parcela difusiva no fluxo de calor, o vetor fluxo de calor pode ser descrito pela lei de Fourier:

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

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

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

Para completar a descrição matemática deste problema de escoamento são requeridas equações constitutivas mecânicas, as quais descrevem o tensor das tensões viscosas. Neste trabalho foi adotado o

modelo viscoelástico de Leonov, pois ele reproduz muito bem os dados de cisalhamento estacionários e transientes para polímeros comerciais fundidos, podendo descrever razoavelmente bem o processo de moldagem por injeção (BAAIJENS, 1991). Uma significativa característica do modelo de Leonov é a capacidade de descrever características não lineares básicas do comportamento viscoelástico, isto é, pseudoplasticidade e primeira e segunda diferença de tensões normais, apenas com os parâmetros lineares do espectro de relaxação. Além disso, o modelo apresenta flexibilidade e facilidade na manipulação das funções utilizadas em sua formulação, o que resulta em fácil adaptação do modelo para predição em modelagens de uma ampla variedade de comportamentos viscoelásticos de polímeros fundidos.

A equação de Leonov em função do tensor das tensões é apresentada a seguir (Larson, 1988):

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} + \frac{1}{2G\lambda} \{ \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\sigma}} - G^2 \} \underline{\underline{\delta}} - \frac{1}{3} [\text{tr} \underline{\underline{\sigma}} - G^2 \text{tr} (\underline{\underline{\sigma}}^{-1}) \underline{\underline{\sigma}}] = 0 \quad (3.13)$$

onde $\underline{\underline{\dot{\sigma}}}$ é a derivada convectiva superior do tensor tensão σ que difere de τ por uma constante isotrópica: $\tau \equiv \sigma - G\delta$. A constante G é definida como $G = \eta_0 \cdot \lambda$, onde η_0 é a viscosidade à taxa de cisalhamento zero e λ representa o tempo de relaxação. As constantes η_0 e λ são parâmetros viscoelásticos lineares obtidos no limite de deformações infinitesimais.

Em deformações incompressíveis $\text{tr} \underline{\underline{\sigma}} = G^2 \text{tr} \underline{\underline{\sigma}}^{-1}$ (LARSON, 1988). Neste caso, a equação de Leonov assume uma forma mais simples:

$$\lambda \underline{\underline{\dot{\tau}}} + \underline{\underline{\tau}} + \frac{1}{2G} \underline{\underline{\tau}} \cdot \underline{\underline{\tau}} = 2G\lambda \underline{\underline{D}} \quad (3.14)$$

onde $\underline{\underline{\dot{\tau}}}$ é a derivada convectiva superior do tensor $\underline{\underline{\tau}}$ dada por:

$$\underline{\underline{\dot{\tau}}} \equiv \frac{D\underline{\underline{\tau}}}{Dt} - \underline{\underline{\tau}} \cdot \underline{\underline{\nabla u}} - (\underline{\underline{\nabla u}})^T \cdot \underline{\underline{\tau}} \quad (3.15)$$

onde $\frac{D}{Dt}$ representa a derivada material, dada por:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{\nabla}} \quad (3.16)$$

O modelo de Leonov foi estendido da maneira usual para incluir um espectro de tempos de relaxação, sendo então expresso como:

$$\lambda_k \underline{\underline{\dot{\tau}}}_k + \underline{\underline{\tau}}_k + \frac{1}{2G} \underline{\underline{\tau}}_k \cdot \underline{\underline{\tau}}_k = 2G_k \lambda_k \underline{\underline{D}} \quad (3.17)$$

onde o subscrito k representa cada modo contribuinte.

E, por fim, para o cálculo dos campos de velocidade, temperatura e pressão, em estudos não isotérmicos, foi utilizado o modelo Cross-WLF,

para representar o comportamento reológico do polímero, com o qual a viscosidade é calculada em função de taxa de cisalhamento e da temperatura. Neste modelo a viscosidade é expressa como (MACOSKO, 1994):

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

sendo τ^* a tensão de cisalhamento na transição entre o comportamento Newtoniano e o comportamento representado pela lei das potências. Neste caso, a viscosidade extrapolada à 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 viscoelasticThermalFoamDovenD* utiliza o método VOF (*Volume Of Fluid*) para construir a interface. Neste método o avanço da frente de fluxo é identificado pela Equação (3.20) em cada célula da malha.

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

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

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

$$\underline{u} = \underline{0}, \quad p = 0, \quad f = 0, \quad \underline{\tau} = \underline{0}$$

Para a temperatura, a condição inicial escolhida foi igual à temperatura fixada para as paredes do molde.

Durante o preenchimento da cavidade foi assumida uma velocidade constante na entrada, velocidade nula nas paredes da cavidade e gradiente zero na saída. Na entrada, e nas paredes da cavidade, foi considerado gradiente de pressão nulo. Na saída foi assumida pressão nula. Para a fração volumétrica foi fixado valor 1 na entrada e gradiente nulo nas paredes e na saída. Para o tensor das tensões de cisalhamento considerou-se valor nulo na entrada e gradiente de tensão nulo nas paredes da cavidade e na saída. Para a temperatura foi utilizado um

valor fixo na entrada e nas paredes da cavidade. Na saída foi considerado gradiente nulo de temperatura.

3.3 Metodologia numérica

A análise foi feita utilizando o *solver viscoelasticThermalFoamDouverD* (OLIVEIRA, 2011). Foi usada a versão 1.5 dev. do software OpenFOAM à qual foi agregado o *solver viscoelasticThermalFoamDouverD*, no qual a discretização das equações governantes do escoamento é baseada no método de volumes finitos (FVM), formulado com arranjo co-localizado de variáveis. Para os gradientes foi utilizada a integração Gaussiana com interpolação linear (diferenças centrais). Para o termo Laplaciano foi utilizada a integração Gaussiana com o esquema de interpolação linear *corrected*. Para os gradientes normais às superfícies foi usado o esquema de correção não ortogonal explícito. Para discretização temporal foi utilizado o esquema implícito de Euler. Os esquemas de interpolação utilizados para os divergentes foram a integração de Gauss. Para a velocidade foi utilizada a diferença linear limitada, o esquema Van Leer limitado ou *upwind* foi utilizado para a fração de fase enquanto que, para o divergente da tensão de cisalhamento, foram usados os esquemas linear e *upwind*. Para o termo divergente da temperatura também foi utilizado o esquema *upwind*. Para a resolução do sistema de equações algébricas lineares resultante da discretização das equações diferenciais, os seguintes métodos iterativos foram utilizados: gradiente conjugado (PCG) com pré-condicionador Choleski – incompleto diagonal (DIC) para a pressão e gradiente bi-conjugado (PBiCG) com pré-condicionador incompleto LU para a tensão, para a velocidade e para a temperatura.

Foi utilizado processamento em paralelo, usando o método *metis decomposition* de decomposição da malha e dos campos de dados iniciais. O processamento é realizado com a implementação openMPI da MPI padrão (standard message-passing interface MPI) (OpenFOAM User Guide, 2008).

3.4 Geometria estudada

A geometria selecionada para análise foi retirada de um molde com três cavidades para produção simultânea de corpos de prova para ensaios de tração, torção e impacto. Neste caso, as cavidades possuem volumes desiguais e os caminhos de injeção entre as cavidades e o ponto de injeção são diferentes. Isso faz com que haja a divisão e distribuição do material dentro do molde gerando diferentes frentes de fluxo.

A Figura 3.1 mostra a peça produzida pelo molde estudado e a geometria digitalizada no software ANSYS 13 ICEM CFD, usada para construção da malha utilizada na simulação.

A partir desta geometria foi construída a malha hexagonal. Na simulação CFD desta malha, o balanço de massa deve ser satisfeito em todos os volumes de controle existentes na malha. Isso faz com que ocorra a possibilidade de formação de bolhas de ar nas quinas da geometria por enclausuramento. A fim de evitar este efeito foram criados canais de ventagem em locais estratégicos da geometria e três orifícios, um em cada cavidade do molde. Devido à impossibilidade de trabalhar com uma malha suficientemente refinada nesta etapa do trabalho, estes canais foram construídos na forma de dutos compridos com a menor espessura possível (pois esta espessura depende do tamanho dos elementos da malha) e temperatura na parede de 50 K. Deste modo, ao entrar neste duto de ventagem o polímero perde rapidamente calor fazendo com que sua temperatura diminua e sua viscosidade aumente, diminuindo então a vazão deste pelo duto. Esta geometria será chamada de geometria01.

Após análises preliminares, se optou pela modificação nos dutos da geometria01 para comparação dos resultados. Nesta modificação os dutos foram reconstruídos de maneira que estes fazem o fluido passar por uma leve restrição, que faz a área da secção transversal do duto passar de $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ para $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Além disso, o comprimento dos dutos passou de 6 cm para 14 cm. A partir destas modificações, foi criada a geometria02. A Figura 3.2 mostra a geometria01 e geometria02 com os dutos de ventagem em destaque na cor azul.

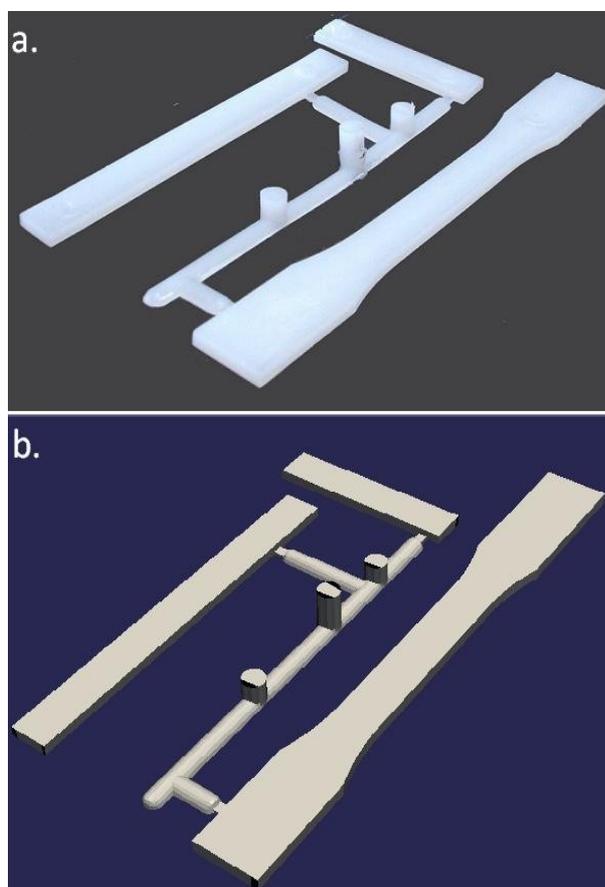


Figura 3.1 – a. Peça moldada por injeção. b. Geometria digitalizada.

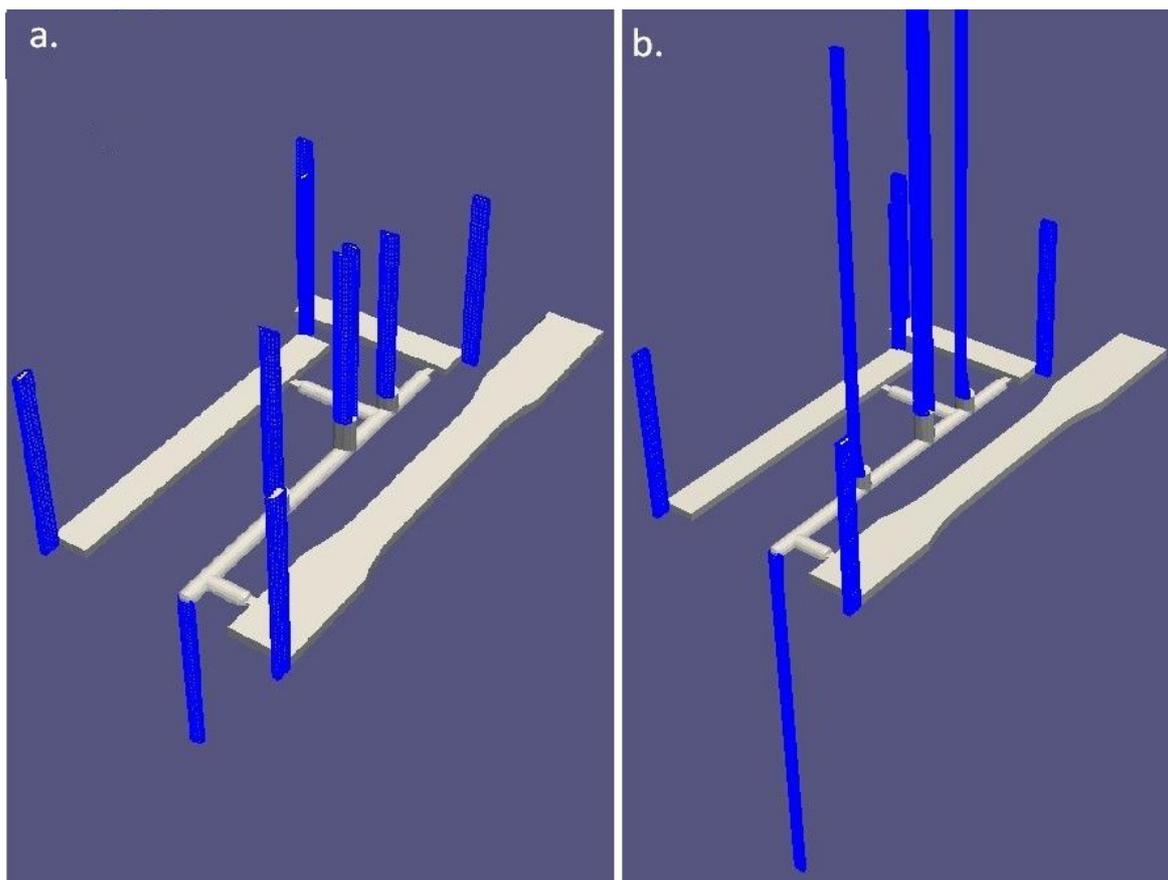


Figura 3.2 – Dutos de ventagem posicionados em **a.** geometria01
b. geometria02.

As malhas construídas para a simulação do caso de preenchimento no processo de moldagem por injeção foram confeccionadas também no *software* ANSYS 13 ICEM CFD. As características da malha são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características das malhas utilizadas na simulação CFD.

	geometria01	geometria02
Número de nós	38829	42039
Número de faces	91017	96474
Número de elementos hexagonais	26615	27899
Máxima razão de aspecto	3,3837	3,3837
Volume total	$2,43 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$	$2,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

Foi considerada vazão de entrada constante igual a $40 \text{ cm}^3/\text{s}$, temperatura da massa de polímero na entrada igual a 503 K , temperatura na parede do molde igual a 313 K e temperatura na parede do duto igual a 50 K . Estes dados foram obtidos a partir da parte experimental deste trabalho.

3.5 Metodologia experimental

Os experimentos de moldagem por injeção foram realizados em uma injetora Arburg Allrounder 420C 1000 – 350, utilizando Poliestireno N1921 produzido pela Innova. Detalhes sobre a resina podem ser visto no Apêndice 1.

Nos experimentos de injeção foi mantida constante a vazão volumétrica de entrada, temperatura da massa de polímero na entrada e temperatura do molde. A partir do molde completo foram realizadas injeções diminuindo-se o volume de material dosado. O volume de material dosado difere do volume de material injetado pelo fato de que o pistão da injetora não injeta todo o material dosado. Uma parte do material permanece no cilindro da injetora e é chamado de colchão. O colchão de material tem como finalidade servir de reserva de material para que quando a resina esfriar e contrair dentro do molde, na etapa de recalque, haja material no cilindro sob pressão que possa escoar e compensar a contração da resina. Como o objetivo da parte experimental neste trabalho é gerar peças onde o preenchimento não foi completamente efetuado, para que se possa observar a posição da frente de fluxo durante o preenchimento do molde, a pressão de recalque foi mantida nula durante o experimento. Assim garante-se que não haja mais material entrando no molde após a etapa de preenchimento.

As peças foram geradas diminuindo-se o volume de material dosado a partir do volume utilizado para obter a peça completa. Os volumes de dosagem utilizados foram 28, 25, 22, 19, 16, 13, 10, 7, 5 cm³, a vazão utilizada foi de 40 cm³/s, a temperatura do molde era de 40 °C e a temperatura da massa polimérica era de 230 °C.

3.6 Valores dos parâmetros das equações governantes empregados nas simulações.

Ainda hoje, existe uma grande dificuldade em se obter parâmetros reológicos para equações constitutivas que representam o escoamento de resinas pseudoplásticas. A resina, usada para a simulação do processo de modelagem por injeção, selecionada pela disponibilidade de dados, é o PS STYRON 615 APR da Dow Chemical. As Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 mostram os parâmetros utilizados na simulação do preenchimento do molde para esta resina (Shyu e Isayev, 2003),(Bress, 2009).

Tabela 3.2 – Parâmetros térmicos para o PS (STYRON 615 APR).

Parâmetro	Unidades	Valor
Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,122
Calor específico	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2050
Difusividade térmica	$m^2 \cdot s^{-1}$	$6 \cdot 10^{-8}$

Tabela 3.3 – Parâmetros para a equação de Cross-WLF para o PS (STYRON 615 APR).

Parâmetro	Unidades	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 3.4 – Parâmetros viscoelásticos lineares para o modelo Leonov para o PS (STYRON 615 APR).

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

Já na parte experimental, a resina usada foi o Poliestireno N1921 visto que esse era o polímero disponível com maior semelhança em comparação ao Poliestireno STYRON 615 APR. Maiores detalhes sobre o Poliestireno N1921 podem ser vistos no APÊNDICE 1.

4 Resultados

Na comparação entre dados experimentais e resultados numéricos, o estágio (tempo de injeção) a ser utilizado em cada caso foi selecionado de forma que a frente de fluxo mais se assemelhasse ao resultado experimental para certo volume de material injetado. Os resultados foram colocados lado a lado para que se possa observar melhor as diferenças e similaridades da distribuição do material. A análise comparativa visual dos resultados da simulação da geometria01 pode ser feita observando-se as Figuras 4.1-5.

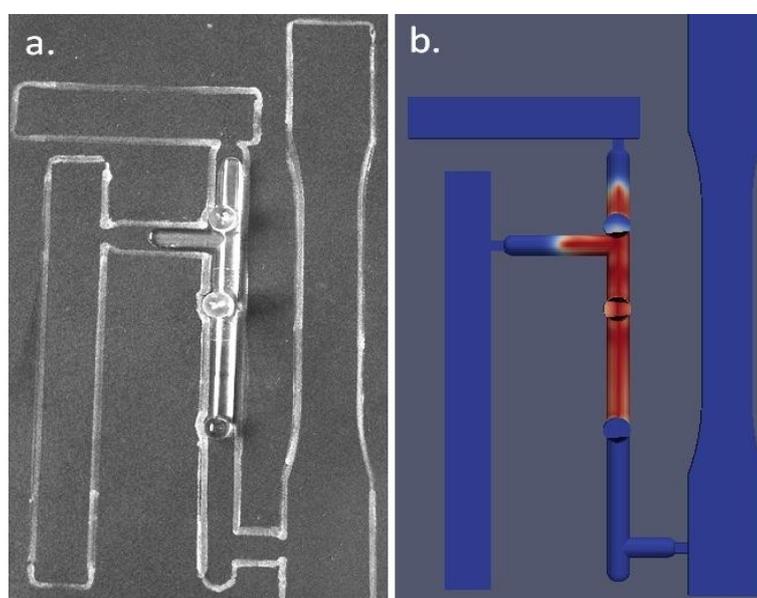


Figura 4.1 – Comparação entre: **a.** Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 5 cm³. **b.** Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,04 s.

Apesar da comparação entre a distribuição do material no molde simulada e a obtida experimentalmente ser facilmente realizada observando-se os resultados, não se pode estimar o tempo de preenchimento da injeção real, pois na simulação existe a perda de material nos dutos de ventagem. É importante lembrar que esta perda não acontece no processo real, sendo somente devido ao fato de os limites inferiores de espessura que puderam ser utilizados para os dutos de ventagem terem sido restringidos pelo nível de refinamento da malha, como foi observado em testes preliminares. Nos referidos testes observava-se que, para um dado tamanho de malha, a tentativa de gerar dutos de ventagem muito estreitos levava à formação de volumes com razão de aspecto muito grande, levando a dificuldades numéricas e aumento do tempo de convergência ou a falta de convergência. No início da simulação esta perda se restringe ao material que já saiu do domínio real de injeção (cavidade mais canais de alimentação) mas que

ainda permanece nos dutos de ventagem e não é significativa até o tempo de simulação de 0,16 s mostrado na Figura 4.3.

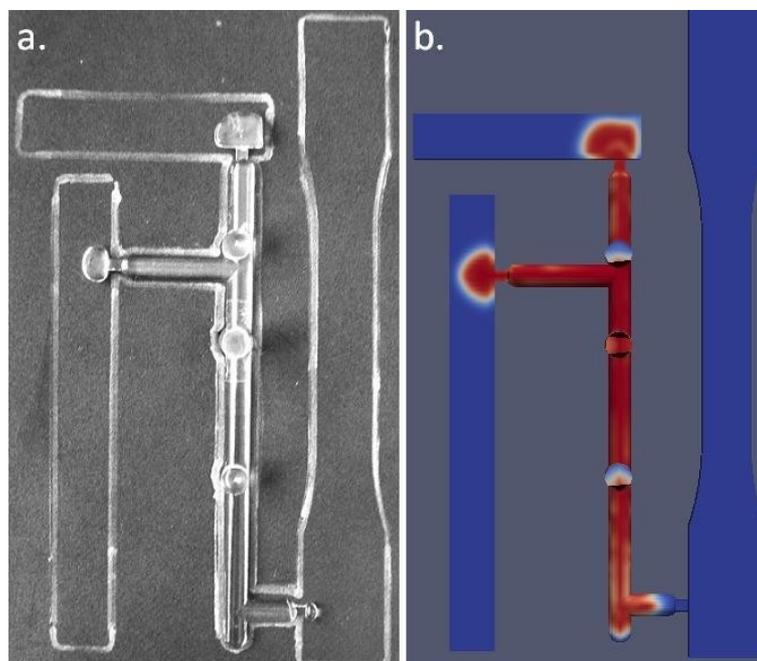


Figura 4.2 - Comparação entre: **a.** Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 7 cm³. **b.** Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,1 s.

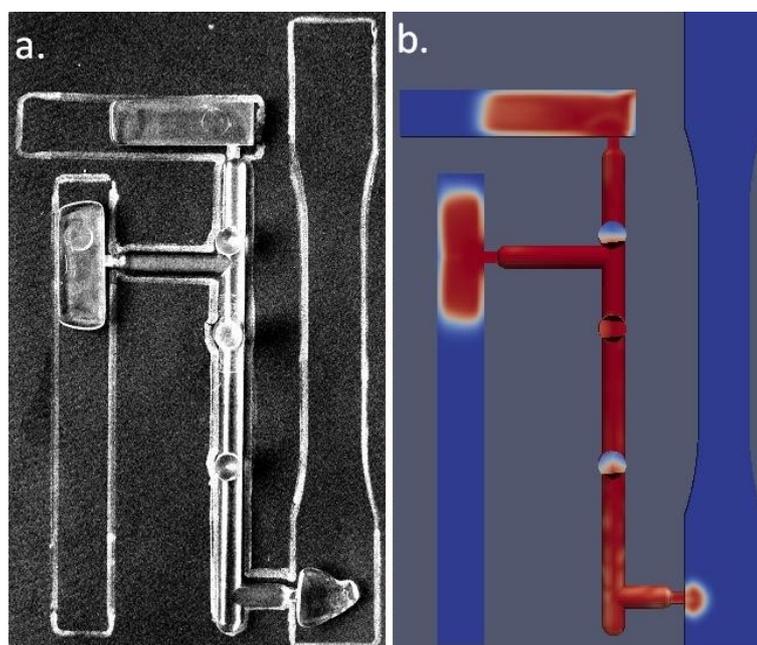


Figura 4.3 - Comparação entre: **a.** Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 10 cm³. **b.** Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,16 s.

A partir do momento em que os dutos de distribuição do material entre o ponto de injeção e a cavidade da peça propriamente dita são completamente preenchidos (Figuras 4.4 e 4.5) há um aumento na pressão de injeção. Isso acontece pois a partir do momento em que os dutos de distribuição são preenchidos, o escoamento passa por uma restrição na entrada da cavidade onde é moldado o corpo de prova propriamente dito. Essa restrição causa uma perda de carga significativa no escoamento e, para manter a vazão de entrada constante, a pressão de entrada aumenta gradativamente. O aumento da pressão na entrada faz com que haja maior fluxo de material dentro dos dutos de ventagem. Esse efeito faz com que a perda de material se torne significativa após o momento em que os dutos de distribuição do material são preenchidos completamente.

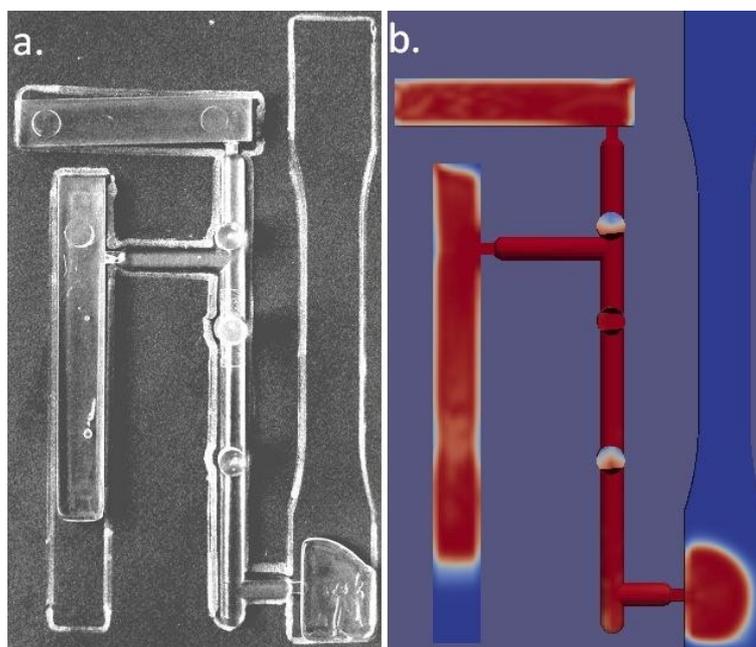


Figura 4.4 - Comparação entre: **a.** Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 13 cm³. **b.** Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,35 s.

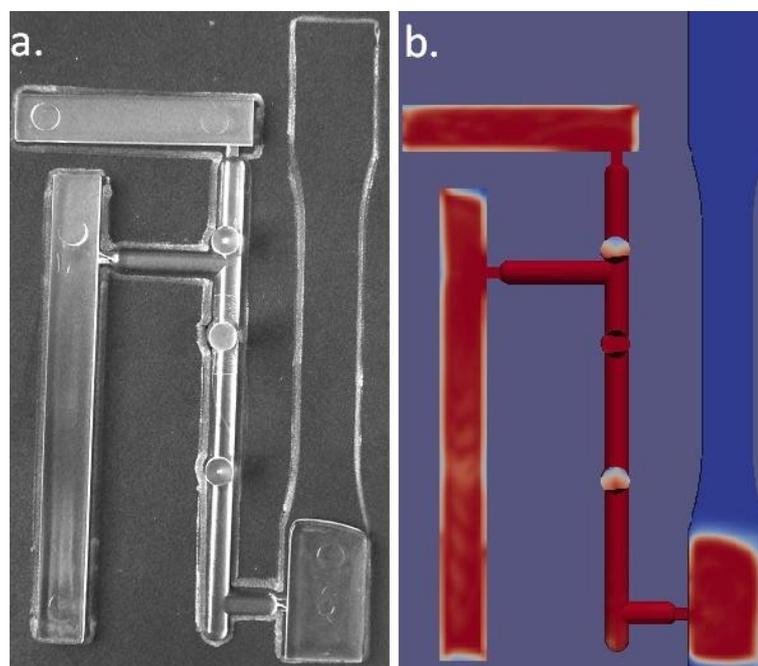


Figura 4.5 - Comparação entre: **a.** Peça Injetada usando-se um volume de material dosado de 16 cm³. **b.** Resultado da simulação no tempo de injeção de 0,48 s.

Passando-se 0,35 segundos (resultado mostrado na Figura 4.4) do processo simulado já temos uma perda de 18,8% de material fundido para fora do sistema. Aos 0,48 segundos (resultado mostrado na Figura 4.5) a perda de material chega a 30,15%. Após este instante a simulação foi interrompida pois devido à excessiva perda de massa a evolução da frente de fluxo não era mais representativa.

Conforme o que foi discutido anteriormente, os problemas de perda artificial descritos podem, a princípio, ser resolvidos pelo refinamento da malha a um nível que permita trabalhar com dutos de ventagem suficientemente pequenos para que não haja escoamento de polímeros nesta região. Devido a impossibilidade de utilizar no presente trabalho malhas com este nível de refinamento, utilizou-se a geometria02 para realizar testes a fim de analisar a adequação desta hipótese. O teste numérico foi repetido com a geometria02 para as mesmas condições. A frente de fluxo evoluiu durante a injeção da mesma forma com que na geometria01, o que era esperado, pois as modificações ocorreram apenas nos dutos de ventagem. Porém houve uma perda de massa inferior, fazendo com que a propagação do material acontecesse mais rapidamente. Nas simulação da geometria02, o instante da simulação semelhante ao mostrado na Figura 4.4 ocorreu com 0,32 segundos de processo simulado e com 13,2% de material perdido, enquanto o instante mostrado na Figura 4.5 ocorreu com 0,4 segundos de processo simulado e 20,3% de material perdido. Esta melhoria nos resultados

acontece pois nesta, ao contrario da geometria01, houve tempo do material esfriar e congelar nos dutos fazendo com que só houvesse perda de massa para fora do sistema pelos orifícios existentes nas cavidades.

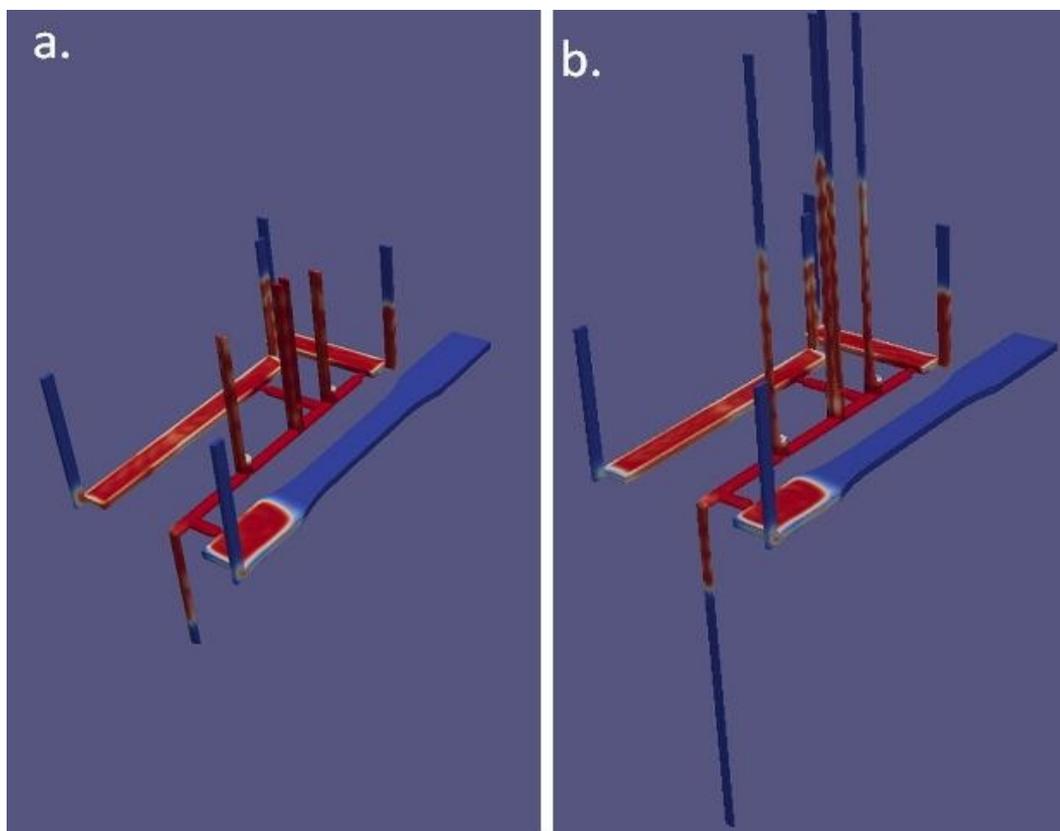


Figura 4.6 - Comparação entre: **a.** geometria01 no instante de 0,48 segundos de processo simulado. **b.** geometria02 no instante de 0,40 segundos de processo simulado .

Pode-se ver na Figura 4.6 que para geometria01 os 3 dutos de ventagem centrais estão completamente preenchidos fazendo com que parte da massa injetada saia para fora do sistema. Isto acontece pois a velocidade nestes dutos é muito rápida e não há tempo suficiente para o material perder calor e congelar dentro dos dutos. Também pode se ver na Figura 4.6 que na geometria02 o duto é mais estreito e comprido possibilitando que o material perca calor e solidifique dentro do duto impossibilitando assim a propagação do fluxo dentro deste.

Portanto, a comparação dos testes com as duas geometrias utilizadas permite pensar que com o refinamento adequado da malha e, conseqüentemente, a possibilidade de usar canais de ventagem mais estreitos, possa-se chegar a uma representação adequada do padrão de avanço da frente de fluxo utilizando o solver *viscoelasticThermalFoamDouvernD*. Levando em consideração que o conhecimento da forma de propagação do material dentro das cavidades é importante no projeto dos caminhos de distribuição do material dentro do molde (buscando-se que o material se distribua

uniformemente e de maneira que as cavidades sejam preenchidas o mais simultaneamente possível), os resultados reportados neste trabalho justificam a continuação dos testes aqui realizados com a utilização de malhas mais refinadas.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Foi proposto neste trabalho a análise preliminar de um *solver* para simulação não isotérmica do escoamento de fluidos viscoelásticos no pacote de CFD OpenFOAM. Foram apresentadas as principais vantagens deste pacote no qual foi feita a implementação do *solver* chamado *viscoelasticThermalFoamDouvernD*. Apresentou-se também a metodologia usada para se resolver problemas de simulação do preenchimento do molde no processo de injeção de polímeros.

No capítulo 4 foram apresentadas comparações de resultados obtidos na simulação e na injeção experimental. Nestes resultados podemos observar que a representabilidade do caso simulado em comparação com o caso experimental para o avanço da frente de fluxo durante o preenchimento do molde é satisfatória. Podemos ver que a distribuição do material em direção às cavidades onde os corpos de prova propriamente ditos são moldados no caso experimental é bem representado pela simulação. Na prática, a propagação das frentes de fluxo é uma característica muito importante no projeto de moldes multicavidade. A forma de propagação do material dentro das cavidades é analisada para o projeto dos caminhos de distribuição do material dentro do molde. A intenção é que o material se distribua uniformemente e de maneira que as cavidades das peças que serão o produto final sejam preenchidas simultaneamente.

Mesmo com a construção de dutos de ventagem, ainda pode ser visto nos resultados da simulação a formação de pequenas bolhas em algumas quinas da cavidade. Estas bolhas são formadas por enclausuramento do ar existente dentro do molde antes do começo do preenchimento. A localização de pontos onde há a probabilidade de enclausuramento de ar também é um fator importante no projeto de moldes e é vital na estratégia de posicionamento dos canais de ventagem.

Embora possa representar satisfatoriamente bem a propagação das frentes de fluxo no preenchimento da cavidade, neste experimento não é possível realizar estimativas de tempo de preenchimento para o molde real. Isso se deve à grande perda de material no dutos de ventagem após 0,16 segundos de processo simulado. Como vimos, a forma de propagação não foi alterada pela perda de material neste caso, mas com a perda de material, a velocidade dentro da cavidade é inferior à real. A baixa velocidade do material dentro da cavidade faz com que qualquer propriedade que dependa da velocidade seja alterada. Altera-se a taxa de cisalhamento e, em consequência, valores de tensão e viscosidade. Sendo a velocidade do fluido menor que a real, na simulação, a perda de calor será maior pois passará mais tempo em contato com a superfície fria do molde e isso fará com que a viscosidade aumente e dificulte o preenchimento da cavidade.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria o refino da malha usada na simulação. Com o refino da malha, passa a ser possível a construção de dutos de ventagem mais pequenos e com isso o problema com a

perda de material é solucionado. Com o refino da malha, a variação das propriedades dentro da cavidade começa a ser representativa e a partir daí é possível a realização de análises quantitativas para validação deste método. Tendo uma representabilidade aceitável na medida das propriedades do material dentro do molde, começa a ser possível a previsão de certos defeitos na peça produzida e pode-se também, estimar parâmetros ótimos para a injeção no projeto do molde.

Como conclusão geral se pode afirmar que a metodologia usada representa bem a distribuição de material dentro do molde. Além disso com os resultados obtidos neste trabalho também podemos indicar esta metodologia no auxílio do posicionamento de canais de ventagem no projeto de moldes. Com a evolução desta metodologia em trabalhos futuros este pode se tornar uma grande ferramenta, gratuita e disponível a qualquer atualização, para o auxílio no projeto de moldes para o processo de moldagem por injeção de polímeros.

6 Referências

BAAIJENS, F.P.T. Calculation of Residual Stresses in injection molded products. Rheologica Acta, Holanda, 1991.

BRESS, T. J.; The Influence of Processing and Fluid Parameters on Injection Molding Flow , University of Michigan , 2009.

BRITO, A. M., Simulação do Escoamento de Termoplásticos em Placas Moldadas por Injecção, Portugal, 1995.

C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994. A Resource for Plastics Engineers, AC Technology, Ithaca, New York.

CHANG, R. Y., & YANG, W. H., Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three-dimensional finite volume approach. International Journal for 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. J. Non- Newtonian Fluid Mech, Brasil, 2010.

GUSTAFSSON, B; VASIL'EV, A; Conformal and Potential Analises in Hele-Shaw Cell, SPRINGER VERLAG NY, Noruega, 2006.

HAN, R., SHI, L., & GUPTA, M., Three-dimensional simulation of microchip encapsulation process. Polymer Engineering and Science, Michigan, 2000.

HARADA, J. Moldes para Injeção de Termoplásticos: projetos e princípios básicos, São Paulo, 2004.

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. E SHEN, S.F.. Flow Analysis of the Non-Isothermal Two-Dimensional Filling Process in Injection Molding, Israel Journal of Technology, 1978.

KENNEDY, P., Flow Analysis of Injection Molds, Hanser/Gardner Publications, Cincinnati, EUA, 1995.

LARSON, R.G., Constitutive Equations for Polymer Melts and Solutions. Butterworth Publishers, Boston, 1988.

MACOSKO ,Christopher W.. RHEOLOGY Principles, Measurements and Applications. Wiley-VCH, Inc., New York, 1994.

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 User Guide, (9 de julho de 2008)
<http://sourceforge.net/projects/foam/files/> .

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

PROVENZA, F., Moldes para Plásticos, São Paulo, 1991.

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

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

APÊNDICE 1



N1921 - Injeção Poliestireno Cristal

Características
Alta fluidez
Excelente processabilidade

Processos
Injeção ciclo rápido
Co-extrusão (capa de brilho)

Aplicações
Descartáveis
Embalagens
Utilidades domésticas
Artigos escolares

Propriedades	ISO			ASTM		
	Norma	Unidades	Valores	Norma	Unidades	Valores
Reológica						
Índice de fluidez (200°C, 5kg)	1133	g/10 min	20	D-1238	g/10 min	20
Mecânicas						
Resistência à tração na ruptura	527	MPa	40	D-638	MPa	44
Elongação na ruptura	527	%	1,7	D-638	%	1,7
Módulo elástico por tração	527	MPa	3300	D-638	MPa	3200
Dureza Rockwell (escala L/M)	2039/2	-	M80	D-785	-	M80
Resistência à flexão	178	MPa	75	D-790	MPa	75
Resistência ao impacto IZOD - espessura 4 mm	180/1A	kJ/m ²	1,8	-	-	-
Resistência ao impacto IZOD - espessura 3,2 mm	-	-	-	D-256	J/m	23
Térmicas						
Temperatura de deflexão sob carga (1,8 MPa, 120°C/h)	75	°C	81	D-648	°C	81
Ponto Vicat (1Kg, 50°C/h)	306	°C	92	D-1525	°C	92
Ponto Vicat (5Kg, 50°C/h)	306	°C	88	D-1525	°C	88
Físicas						
Densidade	1183	g/cm ³	1,05	D-792	g/cm ³	1,05
Absorção de umidade	62	%	<0,1	D-570	%	<0,1
Contração no molde	interno	%	0,3-0,6	-	-	-
Resistência à chama - espessura 1,6 mm	UL-94	classe	HB	-	-	-

Todos os ensaios mecânicos foram realizados a 23°C.
Os valores típicos oferecem uma orientação ao usuário e não devem ser considerados como limites de especificação de material.

Poliestireno Cristal - N1921

Processamento	Extrusão: temperatura de massa 210-240°C Injeção: temperatura de massa 210-260°C temperatura de molde 50-75°C
Legislação	Se utilizado sob a forma natural e nas condições de processamento recomendadas, o produto cumpre com as exigências da portaria 105/99 da ANVISA e com as resoluções do GMC-Mercosul para uso em embalagens para contato com alimentos. O produto N1921 atende os requisitos da norma UL 94, sob o File Number E220962.
Segurança	Durante o processamento do N1921, nas condições recomendadas, quantidades de vapor de estireno muito reduzidas podem ser liberadas. Em local com adequada ventilação e renovação de ar, a concentração de estireno permanecerá em um nível muito inferior ao limite de exposição apontado pela ACGIH, não representando riscos conhecidos à saúde. Recomenda-se ler a ficha de segurança do produto (FISPQ) antes de seu uso.
Nota	As informações aqui contidas estão de acordo com nosso melhor conhecimento, indicando valores típicos obtidos para as resinas da INNOVA S.A. Estes dados visam permitir a seleção e a utilização adequadas dos produtos. No entanto, estes valores não devem ser considerados como garantia de desempenho.

PARA INFORMAÇÕES ADICIONAIS,
CONTATAR NOSSA ÁREA DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.



Industrial plant:
Rod. Tabai Canoas BR 386/Km 419
Polo Petroquímico
95853-000 | Triunfo (RS)
Phone: (55 51) 3457-5800
Fax: (55 51) 3457-5829

Escritório Porto Alegre:
Av. Nilo Peçanha, 2825 - 17º and
Chácara das Pedras
91330-001 | Porto Alegre (RS)
Fone: (51) 3378-2300
Fax: (51) 3378-2323

São Paulo Office:
Av. Paulista, 901 - 1º and
Room 4 - Cerqueira César
01311-100 | São Paulo (SP)
Phone: (55 11) 3523-4466
Fax: (55 11) 3523-4467



RoHS
Component

www.innova.ind.br

Rev.05 - Julho/2011