

## **RELATÓRIO FINAL**

# **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSOS DE EXTRUSÃO**

**Alunos: Alexandre Sampaio da Cruz e Leonardo Eckhardt Machado**

**Orientadora: Mônica Feijó Naccache**

### **Introdução**

Inicialmente, o projeto foi desenvolvido pelo aluno Leonardo E. Machado, com o tema “Simulação numérica de processos de extrusão”. Porém, o mesmo foi substituído em abril pelo aluno Alexandre Cruz, que inicialmente daria continuidade ao mesmo projeto. Porém, embora o projeto seja na mesma linha de simulação numérica com fluidos não Newtonianos, o tema analisado por Alexandre, “Análise do escoamento de fluidos viscoplásticos em reômetros rotacionais” trata do problema de deslizamento nas paredes, muito importante em processos de extrusão, pois podem causar falhas graves no produto final. Porém, o estudo se baseia na geometria utilizada na caracterização dos fluidos, que difere da geometria tratada inicialmente. Dessa forma, o presente Relatório é apresentado em duas etapas: a primeira referente ao aluno Leonardo E. Machado (bolsista de agosto de 2006 a março de 2007), e a segunda referente ao aluno Alexandre Sampaio da Cruz, bolsista desde abril de 2007.

## **1. Simulação numérica de processos de extrusão**

### **1.1. Motivação**

Nesta etapa é analisado o escoamento de um fluido viscoelástico numa contração abrupta axissimétrica. Essa geometria é muito utilizada em processos de extrusão. Aqui, o estudo é feito em uma geometria de razão de diâmetros 4:1 que é muito analisada no meio científico. Existem diversos trabalhos publicados de diferentes fluidos escoando nessa geometria. Os fluidos viscoelásticos são matérias complexos. Eles possuem características elásticas e viscosas, o que torna as equações que descrevem seu comportamento muito complicadas.

### **1.2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho foi analisar numericamente o escoamento de um fluido viscoelástico numa contração abrupta axissimétrica com razão de diâmetros 4:1, observando a influencia dos parametros da viscosidade. Para isso, serão resolvidas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear.

### **1.3. Literatura**

Diversos trabalhos na literatura analisaram o problema do escoamento de materiais viscoelásticos em contrações abruptas planares e axi-simétricas. Esta geometria é bastante interessante pois, embora seja uma geometria simples, a cinemática do escoamento é bastante

complexa, com regiões de escoamento puramente de cisalhamento, regiões de escoamento extensional e regiões com cisalhamento e extensão. Muitos trabalhos observaram experimentalmente a mudança no tamanho dos vórtices que surgem no canto da contração (Boger et al., 1986; Evans e Walters, 1986; Nigen e Walters, 2002). Outros trabalhos resolveram o problema numericamente, utilizando diferentes equações constitutivas para modelar o comportamento viscoelástico do material (Crochet e Pilate, 1976; Debbaut e Crochet, 1986, Yeh et al., 1984; Oliveira e Pinho, 1999; Alves et al., 2003 ).

#### 1.4. Modelagem Matemática

A geometria analisada nesta etapa está mostrada na Figura 1. O fluido entra na esquerda por um tubo de diâmetro  $D$  e comprimento  $L$ , e passa por uma contração abrupta, e sai por um outro tubo de diâmetro  $d$  e comprimento  $l$ . A geometria e a geração da malha computacional foram desenvolvidas no software comercial “GAMBIT”. O escoamento é bi-dimensional, laminar e em regime permanente. A superfície inferior é o eixo axial de simetria.

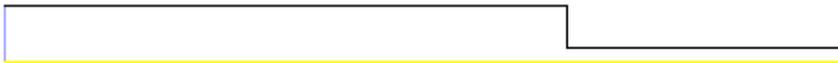


Figura 1: Geometria analisada

Para calcular os campos de velocidade e pressão, foram resolvidas as equações de conservação de massa e de momento para fluido incompressível e regime permanente. A equação de conservação de massa é dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0$$

onde  $x$  é a coordenada axial,  $r$  a coordenada radial,  $u$  e  $v$  são os componentes da velocidade na direção axial e radial respectivamente. A equação de conservação de momento é dada por:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \rho g$$

onde  $\rho$  é a densidade,  $p$  é a pressão e  $g$  é a gravidade.

O comportamento mecânico do fluido não newtoniano será modelado pela equação constitutiva de um fluido newtoniano generalizado  $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$ . Nesta equação a função  $\eta(\dot{\gamma})$  é obtida a partir de uma média entre as viscosidades cisalhante e extensional. Cabe ressaltar que para os materiais viscoelásticos a viscosidade extensional é bastante elevada e pode ter influências significativas em escoamentos com características extensionais, como o da contração.

A função viscosidade é dada por:

$$\eta(\dot{\gamma}, R) = \eta_s(\dot{\gamma})^R \times \eta_u(\dot{\gamma})^{(1-R)}$$

onde,

$$\eta_s = K_s \times \dot{\gamma}^{N_s}$$

$$\eta_u = K_u \times (g \dot{\gamma})^{N_u}$$

E R é um parâmetro cinemático denominado classificador do tipo de escoamento. R=0 para escoamento extensional e R=1 para escoamento cisalhante.

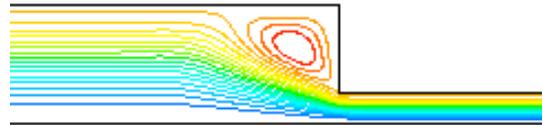
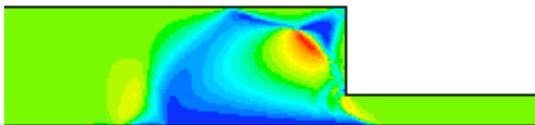
### 1.5. Solução Numérica

As equações apresentadas até agora não possuem solução analítica. Para resolvê-las, elas foram discretizadas utilizando o método dos volumes finitos e assim foi calculado os campos de velocidade e pressão. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa comercial “FLUENT”. Em seguida, foi iniciado um estudo do programa comercial POLYFLOW, que resolve escoamentos de fluidos viscoelásticos, tendo diferentes equações constitutivas já implementadas. Porém, como o programa ainda não tinha sido utilizado pela equipe, um grande tempo foi gasto na sua instalação e posteriormente aprendizagem de utilização. Assim, nenhum resultado ainda havia sido obtido até o fim da Iniciação Científica.

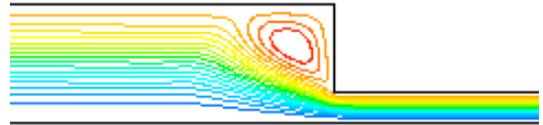
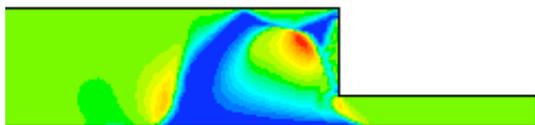
### 1.6. Resultados

A influencia dos parâmetros reológicos ( $N_s$  e  $N_u$ ) no padrão de escoamento foi analisada. Para um valor de  $N_s = 1,00$ , foi variado o valor de  $N_u$  de 1,75 até 2,00. Depois fixando o valor de  $N_u = 2,00$ , foi variado o valor de  $N_s$  de 1,00 para 0,9.

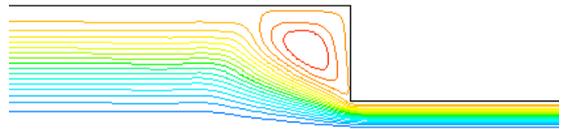
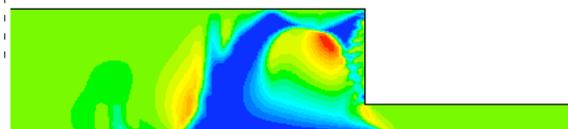
$N_s = 1,00 / N_u = 1,75$ :



$N_s = 1,00 / N_u = 2,00$ :

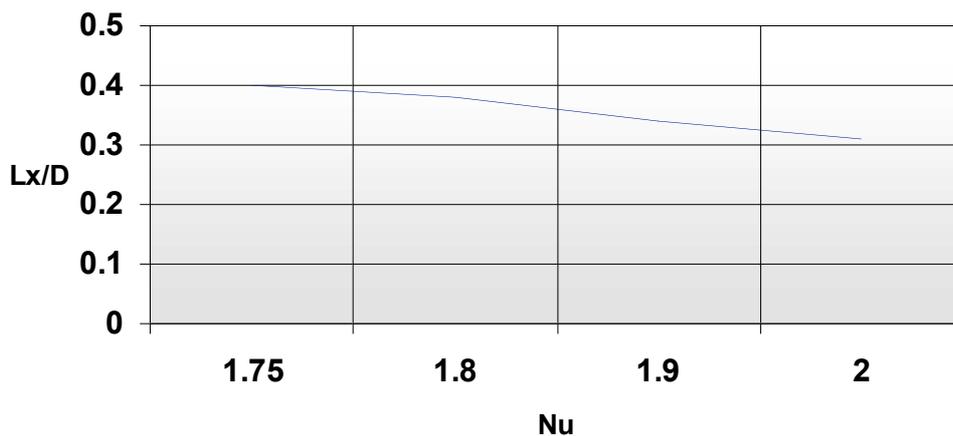


$N_s = 0,90 / N_u = 2,00$ :

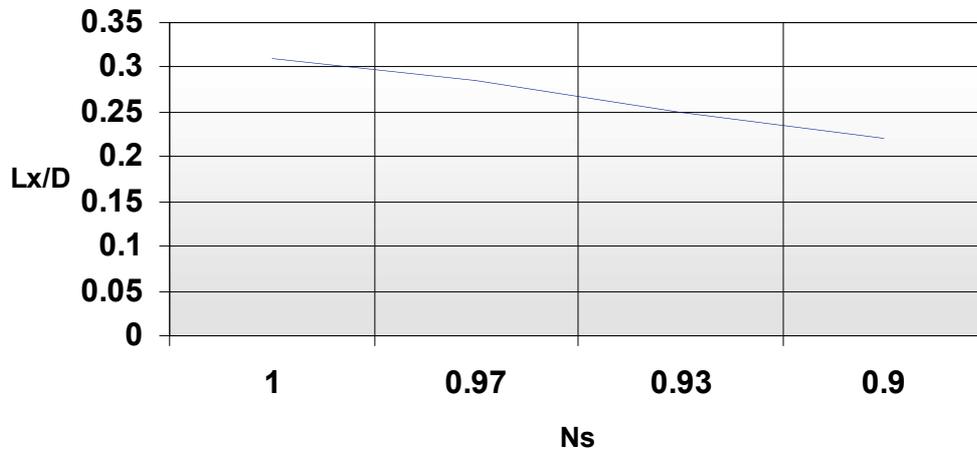


O campo do parâmetro  $R$  permite avaliar o tipo de escoamento em cada região. Nota-se que nas regiões longe da contração,  $R=1$  (cor verde). Um pouco antes da contração pode-se observar regiões puramente extensionais, onde  $R=0$  (cor azul), e regiões onde  $0 < R < 1$  (tonalidades azuis e verdes mais claros). Na região de recirculação, onde ocorre uma rotação de corpo rígido,  $R > 1$ . Observa-se que fixando o valor de  $N_s = 1,00$ , ao aumentar o valor de  $N_u$ , o tamanho da recirculação (medido longitudinalmente) diminuiu, o que indica que o aumento da viscosidade extensional tende a reduzir a recirculação. Fixando o valor de  $N_u = 2,00$ , e diminuindo o valor de  $N_s$ , o tamanho da recirculação também diminuiu. Foi feita uma adimensionalização dividindo a medida da recirculação ( $L_x$ ) pelo diâmetro ( $D$ ) do tubo onde ela esta situada. Para uma melhor análise segue dois gráficos dessas medidas um em função do parâmetro " $N_u$ " e outro em função do parâmetro " $N_s$ ".

### Lx/D X Nu



## Lx/D X Ns



### 1.7. Conclusões

Neste trabalho foi feita uma simulação numérica do escoamento de um fluido viscoelástico numa contração abrupta 4:1, utilizando o programa comercial Fluent, de volumes finitos. A simulação do escoamento desse modelo de fluido no “FLUENT” é de difícil convergência. Nesse trabalho foi obtida a influencia dos parâmetros reológicos ( $N_s$  e  $N_u$ ) no padrão do escoamento e no tamanho da recirculação, e observou-se que a recirculação diminui com o aumento de ambos os parâmetros.

## **2. Análise do escoamento de fluidos viscoplásticos em reômetros rotacionais**

**Aluno:** Alexandre Sampaio da Cruz

### **2.1. Introdução**

Atualmente, as indústrias utilizam cada vez mais em seus processos fluidos com comportamento complexo, que diferem dos fluidos Newtonianos, como a água e o ar. Estes fluidos complexos são chamados de Não Newtonianos. Uma característica destes fluidos é a variação de viscosidade com a taxa de deformação do escoamento. Assim, para a caracterização destes fluidos (ou obtenção desta viscosidade), é necessária a utilização de instrumentos mais sofisticados, conhecidos como reômetros.

Reômetros são máquinas que determinam as características materiais dos fluidos a partir da medição da tensão e da deformação deles. Existem diversos tipos de reômetros existentes e a sua escolha depende do tipo de experimento e análise que se quer obter.

Neste trabalho é feita uma análise computacional do escoamento no interior dos reômetros para diferentes geometrias, a fim de avaliar a adequação destas para a obtenção de dados de viscosidade.

### **2.2. Metodologia**

Serão feitas simulações numéricas com a utilização do software Fluent em diferentes geometrias nos reômetros. Estas geometrias foram desenvolvidas na tentativa de evitar o problema do deslizamento, que ocorre no escoamento dos fluidos viscoplásticos em geometrias usuais do reômetro, prejudicando a obtenção de dados experimentais corretos. Fluidos viscoplásticos são fluidos que necessitam de uma tensão limite para iniciar o escoamento. Abaixo desta tensão, estes fluidos comportam-se como sólidos ou como fluidos de altíssima viscosidade; e, acima desta tensão, atuam como líquidos.

Um dos problemas da reometria é que o fluido próximo à parede do reômetro pode ter características diferentes do fluido mais afastado dela. Com isso, é gerada uma camada lubrificante perto da parede, cujo fenômeno é chamado de Deslizamento. Nos fluidos viscoplásticos, este efeito ocorre apenas para baixas taxas de deformação. Para reduzir os efeitos do deslizamento, uma das alternativas é inserir uma rugosidade na superfície, reduzindo a formação de camada lubrificante próxima à parede. Algumas geometrias vêm sendo utilizadas, como o Vane e o Bob Rugoso [1]. Neste trabalho, será feita uma investigação de novas geometrias, chamadas Grooved Couette. Nestas geometrias inserem-se ranhuras de diferentes formatos na superfície do Bob.

Nestas simulações, ocorrerá a resolução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, juntamente com a equação de Fluido Newtoniano Generalizado e a função de viscosidade SMD, que modelam o comportamento destes fluidos.

### **2.3. Comentários Finais**

Inicialmente foi implementada a geometria Smooth Couette para o reômetro (Fig. 1a), e foi resolvido um caso para fluido Newtoniano (Fig. 1b) e um não Newtoniano (Fig. 1c). Observa-se que o fluido mais próximo à parede externa tem maiores velocidades, como o esperado, já que a parede externa gira com velocidade constante e a interna fica em repouso. Em seguida, serão feitas simulações com as outras geometrias.

Finalmente, serão feitas comparações com os dados obtidos experimentalmente com o reômetro, a fim de verificar a validade dos resultados obtidos com as novas geometrias.

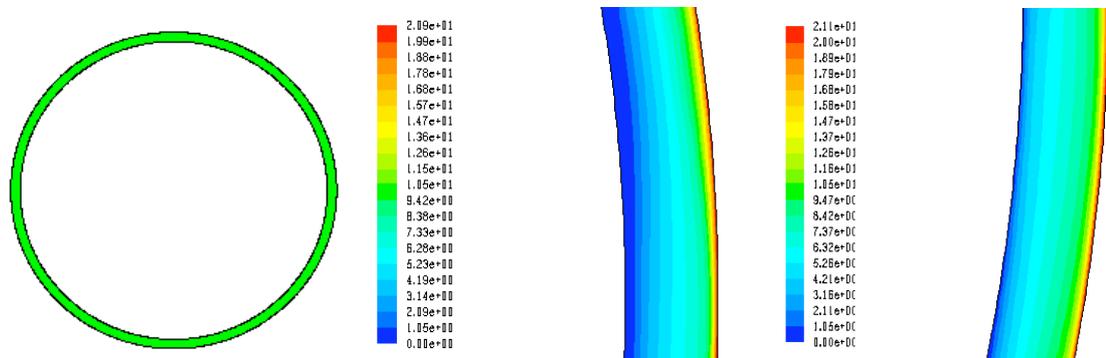


Figura: (a) Geometria; (b) Campo de velocidade (Newtoniano); (c) Campo de velocidade (não Newtoniano)

## 2.4. Referência Bibliográfica

- [1] Alves, M. A., Oliveira, P. J. e Pinho, F. T. Benchmark solutions for the flow of Oldroyd-B and PTT fluids in planar contractions, *J. Non-Newt. F. Mech.*, v. 110, p. 45-75, 2003.
- [2] BARNES, Howard A. **A Handbook of Elementary Rheology**. 2000
- [3] Bird, R.; Armstrong, R.; Hassager, O.; John Willy & Sons. **Dynamics of Polymeric Liquids**, v.1, 1987.
- [4] Boger, D.V., Hur, D.U.; Binnington, R.J., Further observations of elastic effects in tubular entry flows, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 20, pp. 31-49, 1986.
- [5] Crochet, M. J.; Pilate, G., Plane flow of a fluid of second grade through a contraction, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 1, pp. 247-258, 1976.
- [6] Debbaut, B.; Crochet, M. J., Further results on the flow of a viscoelastic fluid through an abrupt contraction, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 20, pp. 173-185, 1986.
- [7] Evans, R.E.; Walters, K., Flow characteristics associated with abrupt changes in geometry in the case of highly elastic liquids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 20, pp 11-29, 1986.
- [8] **Fluent user's Guide**, 2006.

- [9] Nigen, S.; Walters, K., Viscoelastic contraction flows: comparison of axisymmetric and planar configurations, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 102, pp. 343-359, 2002.
- [10] Oliveira, P. J. e Pinho, F. T.. Plane contraction flows of upper convected Maxwell and Phan-Thien-Tanner fluids as predicted by a finite-volume method, *J. Non-Newt. F. Mech.*, v. 88, p. 63-88, 1999.
- [11] Sousa Mendes, P. R.; Padmanabhau, M.; Macosko, C.W. Inelastic Constitutive Equations for Complex Flows, v.34, p 209 – 214, 1995.
- [12] Yeh, P. W.; Kim-E, M. E.; Armstrong, R .C.; Brown, R. A., Multiple solutions in the calculation of axisymmetric contraction flow of an upper convected maxwell fluid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 16, pp. 173-194, 1984.