

# ESCOAMENTO PLANO DE UM FLUIDO VISCOPLÁSTICO ATRAVÉS DE UMA EXPANSÃO SEGUIDA DE CONTRAÇÃO

**Aluno: Rafael Silverio Barbosa**  
**Orientadora: Mônica Feijó Naccache**

## Introdução

O trabalho consistiu na simulação computacional do comportamento de um fluido viscoplástico escoando através de uma expansão, seguida de uma contração e na análise da influência dos parâmetros físicos no escoamento. A solução foi obtida através do método dos elementos finitos e a modelagem matemática é feita pelo modelo de fluido não-newtoniano generalizado, com a equação de viscosidade proposta por Souza Mendes e Dutra (2004).

## Objetivos

Analisar o escoamento de um fluido viscoplástico através de uma geometria planar e investigar o efeito da variação dos parâmetros físicos do fluido no padrão do escoamento e na perda de carga.

## Metodologia

Os fluidos viscoplásticos são importantes em diversos segmentos da indústria, em especial a petroquímica, e são caracterizados pela necessidade da aplicação de uma tensão para que o escoamento ocorra.

A solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, que governam o escoamento, foi obtida utilizando o programa comercial FLUENT, que usa o método de volumes finitos na discretização das equações. A construção da geometria e da malha computacional é realizada no pré-processador GAMBIT. Utilizando o programa comercial GAMBIT, construiu-se uma geometria (figura 1) que levou em conta a simetria da geometria. Foram então geradas uma série de malhas, desde uma com poucos volumes de controle até uma bastante refinada, para que se pudesse atingir uma malha que resolvesse satisfatoriamente o escoamento porém ser demandar um grande esforço computacional. Além do aspecto de duração de processamento, a malha também deveria levar em consideração as regiões em que o escoamento seria mais complexo, como na entrada e nos cantos da expansão, assim, nessas áreas foi utilizado um número maior de elementos. Foram obtidos resultados com as diferentes malhas para um fluido Newtoniano, e a partir da comparação do perfil de velocidades no centro do duto maior, foi escolhida uma malha não uniforme, com 119500 volumes de controle.

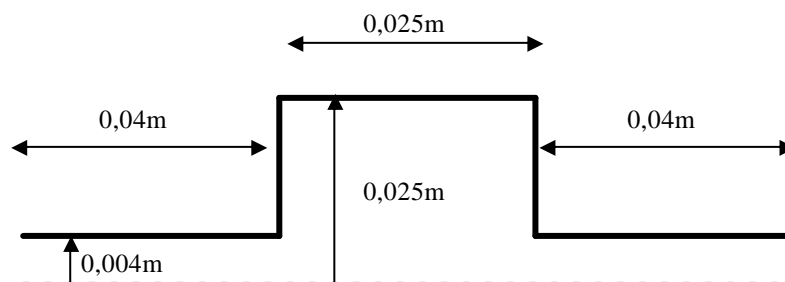


Figura 1: Dimensões do duto.

A modelagem matemática do comportamento da viscosidade  $\eta$  dos fluidos não newtonianos ainda é bastante controversa pelo fato dos diversos modelos existentes não se realizarem uma previsão de viscosidade ao longo de toda a faixa de aplicação de tensões ou de taxa de deformação. Pela definição clássica desse tipo de fluido, somente ocorre escoamento após se atingir uma tensão limite e, antes disso, a viscosidade é infinita. Na pesquisa foi utilizado o modelo de Souza Mendes e Dutra [1] que considera a possibilidade de escoamento com tensões menores do que a limite de escoamento, com viscosidades muito elevadas. Para que houvesse menor dependência dos parâmetros do fluido utilizou-se a forma adimensional da equação de viscosidade, dada por:

$$\eta^* = \frac{\tau^*}{\dot{\gamma}^*} = \left(1 - \exp[-(J+1)\dot{\gamma}^*]\right) \left(\frac{1}{\dot{\gamma}^*} + \dot{\gamma}^{*n-1}\right)$$

Esta equação depende apenas de dois parâmetros, J e n. A influência destes parâmetros no escoamento foi investigada.

Foi utilizado o modelo constitutivo de Fluido Newtoniano Generalizado ( $\underline{\tau} = \eta(\dot{\underline{\gamma}})\dot{\underline{\gamma}}$ ), onde  $\dot{\underline{\gamma}} \equiv \sqrt{\frac{1}{2} \text{tr}(\dot{\underline{\gamma}}^2)}$  é o módulo do tensor taxa de deformação  $\dot{\underline{\gamma}}$  e  $\underline{\tau}$  é o tensor extra-tensão.

A equação de conservação de massa na forma adimensional é dada por

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0,$$

onde  $u^* = u/(\dot{g}h)$ ,  $v^* = v/(\dot{g}h)$  são as velocidades adimensionais nos eixos x e y, respectivamente e  $x^* = x/h$  e  $y^* = y/h$ . Foram adotadas como condições de contorno a simetria do canal e o não escorregamento entre o fluido e a parede.

As equações adimensionais de conservação de quantidade de movimento linear são dadas por:

$$\begin{aligned} u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} &= - \frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \\ &+ \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \right] \\ u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} &= - \frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \\ &+ \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \right] \end{aligned}$$

Nas equações acima,  $h^* = h/h(\dot{g})$  é a viscosidade adimensional,  $P^* = (p - rgy)/r(\dot{g}h)^2$  é a pressão modificada adimensional, g é o componente vertical da aceleração da gravidade, e r é a densidade. O numero de Reynolds é dado por:  $r\dot{g}h^2/h(\dot{g})$ .

Para a simulação, foram adotados parâmetros de uma solução do polímero carbopol em água e com os resultados obtidos foi possível fazer a comparação entre diversas grandezas envolvidas no escoamento, como velocidade, tensão de cisalhamento, viscosidade e queda de pressão, pelas quais se caracterizou o comportamento do fluido naquela situação. Os

resultados foram obtidos para baixos valores de número de Reynolds. A seguir são mostrados diversos resultados obtidos nas simulações.

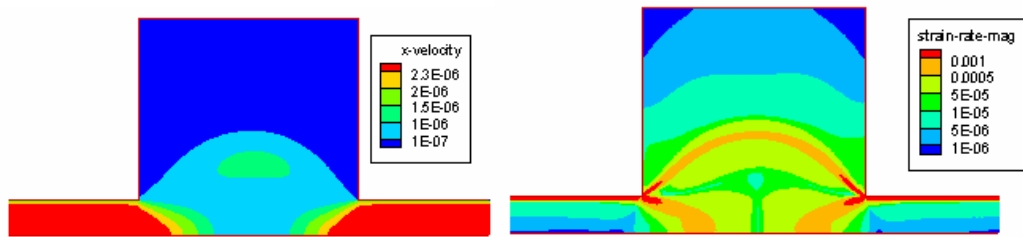


Figura 2: Campo de velocidades e de taxa de deformação para  $J=1,5 \times 10^6$  e  $n=0,41$  respectivamente.

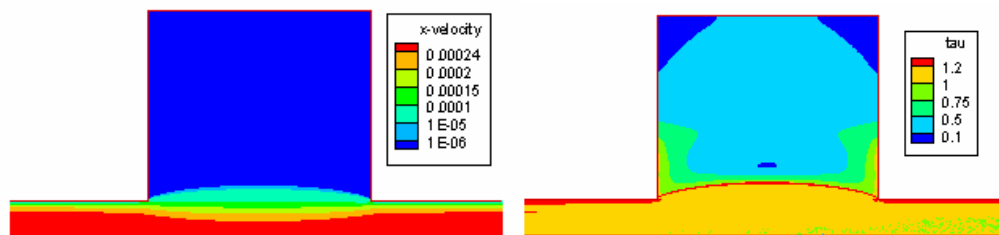


Figura 3: Campo de velocidades e de tensão para  $J=1,5 \times 10^6$  e  $n=1$  respectivamente.



Figura 4: Linhas de corrente e viscosidade para  $J=1,5 \times 10^6$  e  $n=0,41$  respectivamente.

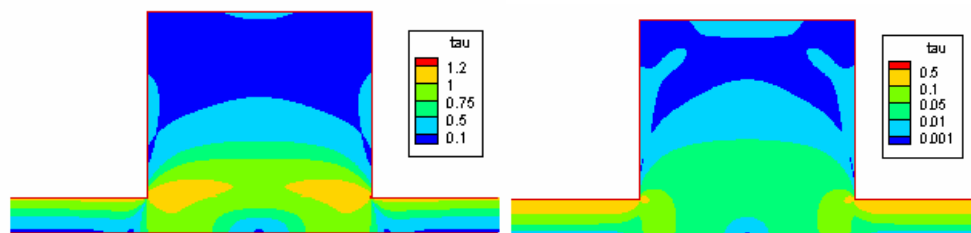


Figura 5: Campos de tensão para  $J=1,5 \times 10^4$  -  $n=0,41$  e  $J=150$  -  $n=0,41$  respectivamente.

Observa-se uma região onde o fluido fica praticamente estagnado (tensão adimensional menor do que 1, i.e., tensão menor do que a limite de escoamento), e que varia com os parâmetros analisados. Este comportamento leva também a uma variação na perda de carga através da cavidade.

Entre a entrada da expansão e a saída foi calculada a diferença de pressão adimensional que foi representada em função de  $J$  e de  $n$  nos gráficos abaixo.

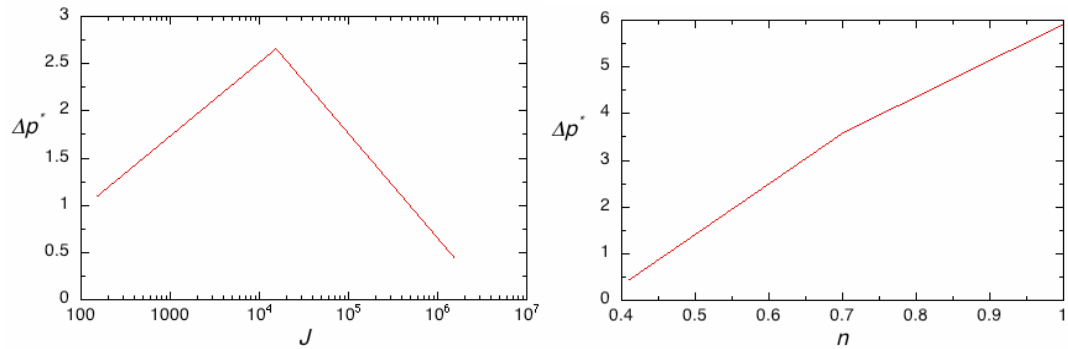


Figura 6 : Diferença de pressão adimensional em função de J e de n.

Na continuidade do projeto, os casos já estudados serão submetidos a condição de transferência de calor no escoamento variando a temperatura da parede e do fluido utilizando a equação de energia.

### Conclusões

A variação dos parâmetros decorreu em resultados absolutamente diferentes entre si, o que mostrou a sutileza que deve ser observada quando da modelagem desse tipo de fluido, ainda assim a modelagem matemática e computacional se mostrou plenamente capaz de interpretar os fenômenos, apresentando resultados coerentes.

Vale ressaltar que o programa FLUENT demonstrou ser uma poderosa ferramenta no estudo dos fluidos newtonianos ou não.

### Referências

- 1 - Souza Mendes, P. R. e Dutra, E. S. S., Viscosity function for yield-stress liquids, Applied Rheology, v. 14, p. 296-302, 2004.
- 2 - Bird, R. B., Armstrong, R. C., Hassanger O., 1987, "Dynamics of Polymeric Liquids", vol. 1, Wiley, 1987.