



# CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



## ESTUDO NUMÉRICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

**Larissa Lopes Nunes**

Acadêmica do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Auto Uruguai e das Missões

larissalnunes@aluno.santoangelo.uri.br

**Cleiton Elsner da Fonseca**

Professor do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Auto Uruguai e das Missões

cfonseca@san.uri.br

**Resumo.** Este estudo trata-se de uma pesquisa numérica através do método de volumes finitos de escoamentos de fluidos não-Newtonianos viscoplásticos com dependência da temperatura. Na modelagem utilizada nesta pesquisa, o modelo de Herschel-Bulkley clássico que apresenta uma equação constitutiva que descreve um comportamento viscoplástico dos materiais, é modificado para que a viscosidade sinta os efeitos de temperatura. A modelagem mecânica que descreve o escoamento estudado foi implementada na ferramenta ANSYS FLUENT, onde simulações de escoamentos de fluidos de Herschel-Bulkley modificado em torno de um cilindro confinado entre duas placas planas são definidos como o problema para testar a modelagem mecânica. Efeitos de convecção de calor e inércia são estudados para diferentes fluidos de Herschel-Bulkley dependentes da temperatura, onde serão apresentados os campos de temperaturas, viscosidade aparente, taxa de deformação e yielded/unyielded zones (zonas que escoam e zonas que não escoam) variando parâmetros de interesse do modelo.

**Palavras-chave:** Fluido não-Newtoniano, modelo de Herschel-Bulkley, material viscoplástico.

### 1. INTRODUÇÃO

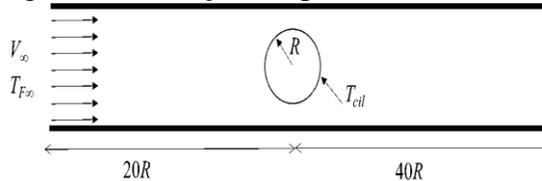
Muitos dos materiais de interesse industrial se comportam como fluidos não-Newtonianos. Dentre estes materiais podemos citar: petróleo, lamas de perfuração, condimentos alimentícios, tintas, etc. Estes fluidos têm como principal característica, uma viscosidade não-constante e variando com a taxa de deformação. Grande parte destes materiais podem ter suas viscosidades alteradas devido a uma transferência de calor. Na literatura existem alguns trabalhos que utilizam modelos que descrevem o comportamento reológico dos fluidos não-Newtonianos viscoplásticos dependentes da temperatura, tais como Nouar et al. (1998), que contestou as conclusões anteriores de Naimi et al. (1990), que subestimaram a importância das propriedades reológicas dependentes da temperatura no escoamento. Nesta atual pesquisa, a modelagem mecânica é formada pelas equações de balanço de massa e quantidade de movimento linear mais uma equação constitutiva de Herschel-Bulkley modificada para descrever, além dos efeitos de viscoplasticidade, influência do campo de temperaturas sobre a viscosidade do material. O conjunto de equações diferenciais complexas que formam a modelagem mecânica é resolvido pelo método de volumes finitos. O método de volumes finitos tem como objetivo

transformar as equações de balanço diferenciais que descrevem o contínuo em equações algébricas discretizadas aplicadas a pequenas partições chamadas de volumes finitos. Esta metodologia está bem estabelecida em softwares comerciais como o ANSYS FLUENT, levando a escolha deste como ferramenta de solução para o problema pesquisado. O problema proposto para estudo é o escoamento de fluidos viscoplásticos de Herschel-Bulkley modificado em torno de um cilindro confinado entre duas placas planas.

## 2. METODOLOGIA

A Figura 1 ilustra o domínio computacional do problema estudado, tem uma razão de aspecto,  $\beta=h/R=4$ , onde  $h=4R$ . O canal de entrada é igual a  $20R$ , distância suficiente para que o escoamento se desenvolva, e um canal de saída de  $40R$  sendo o comprimento suficiente para poder observar a transferência de calor por convecção.

Figura 1. Descrição do problema



Como condições de contorno fluidodinâmicas considera-se velocidade prescrita na entrada do canal, condições de não deslizamento nas paredes do canal e em torno do cilindro e condições de fluxo livre na saída do canal. Para condições de contorno de energia foram aplicadas temperatura prescrita no fluido de entrada e em torno do cilindro, e paredes isoladas.

As variáveis adimensionais presentes no problema estudado são:

$$R_e = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu}; P_r = \frac{\rho C_p}{k}; x^* = \frac{x}{R}; y^* = \frac{y}{R}; T^* = \frac{T - T_{F\infty}}{T_{cil} - T_{F\infty}} \quad (1)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica,  $C_p$  é o calor específico a pressão constante, o  $R$  é o raio,

$R_e$  é o número adimensional de Reynolds e o  $P_r$  é o número adimensional de Prandtl,  $T$  é a temperatura,  $T_{F\infty}$  é a temperatura do fluido não perturbado pelo cilindro e  $T_{cil}$  é a temperatura na superfície do cilindro.

### 2.1 Equações governantes

Para escoamentos de fluidos viscoplásticos dependente da temperatura, a modelagem matemática empregada neste estudo constitui-se da equação de balanço de massa, a equação da conservação da quantidade de movimento linear para um fluido Newtoniano generalizado, e a equação de energia em termos da temperatura dadas respectivamente por:

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

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \mathbf{f} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) + S \quad (4)$$

onde  $\mathbf{u}$  é o campo de velocidades,  $\rho$  é a massa específica,  $p$  é a pressão,  $\boldsymbol{\tau}$  é o tensor de forças viscosas,  $\mathbf{f}$  é o tensor de forças de corpo,  $T$  é o campo de temperaturas,  $\alpha$  é a difusividade térmica e  $S$  é a fonte de energia térmica.

A fim de prever o comportamento viscoplástico, foi empregado um modelo de Herschel-Bulkley modificado dependente da temperatura. O modelo original foi regularizado pelo método de Papanatasiou (1987).

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = k(T) \dot{\gamma}^{n-1} + \frac{\tau_0(T)}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m\dot{\gamma})] \quad (5)$$

onde  $n$  é o índice de power-law,  $k$  é a consistência do material dependente da temperatura definida abaixo:

$$k(T) = k_0 e^{-b(T - T_{ref})} \quad (6)$$

### 2.2 Modelagem numérica

O método de volumes finitos tem como objetivo transformar as equações de balanço diferenciais da modelagem mecânica descrita pelas eq. (2)-(6) em

equações algébricas discretizadas aplicadas a pequenas partições chamadas de volumes finitos. O domínio discretizado (malha), apresenta 11468 volumes quadriláteros não estruturados Fig. 2.

Figura 2. Domínio discretizado



Para a aproximação das velocidades nos termos advectivos utilizou-se o método upwind de segunda ordem.

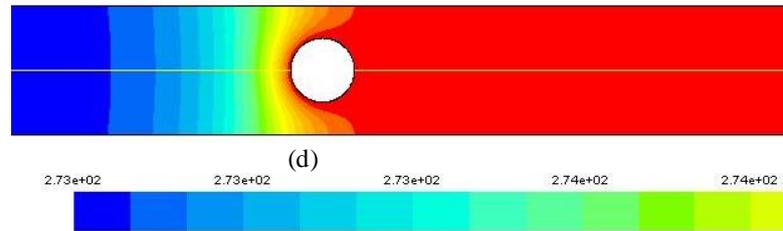
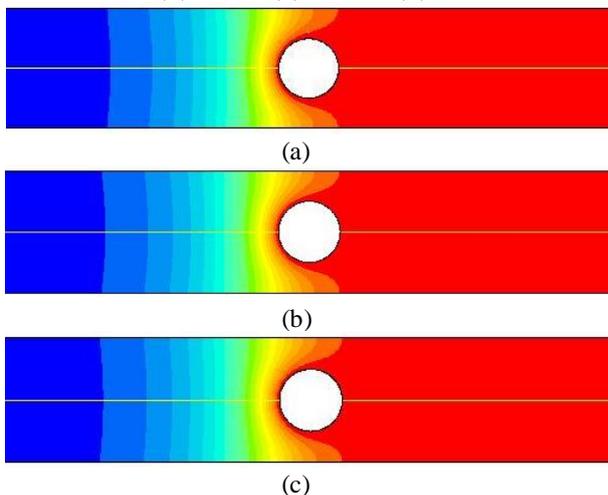
O procedimento utilizado para o cálculo do campo de escoamento foi o SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as simulações foram feitas para um escoamento de um fluido não-Newtoniano de viscosidade adimensional,  $\mu^* = 1$ , com  $Re = 1$ ,  $Hb = 10$  e  $Pr = 1$  em torno de um cilindro com temperatura adimensional  $T_{cil}^* = 1$  e com temperatura do fluido não perturbada pelo cilindro  $T_{F\infty}^* = 0$ .

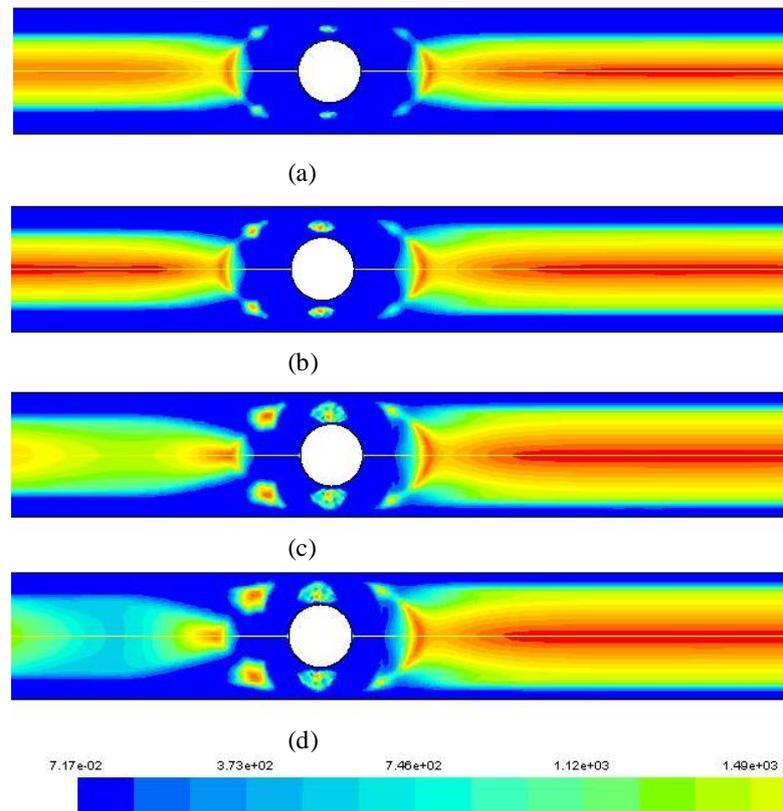
Abaixo é apresentado o campo de temperaturas para  $b=0$ ,  $b=1$ ,  $b=5$  e  $b=10$ . Pode-se observar que há uma mudança pequena no campo de temperaturas com a variação da constante  $b$  Fig. (3 (a)-(d)), esse resultado é esperado devido ao número de Reynolds baixo, o que representa uma transferência de calor predominantemente por difusão.

Figura 3. Campo de temperaturas para: (a)  $b=0$ ; (b)  $b=1$ ; (c)  $b=5$  e (d)  $b=10$



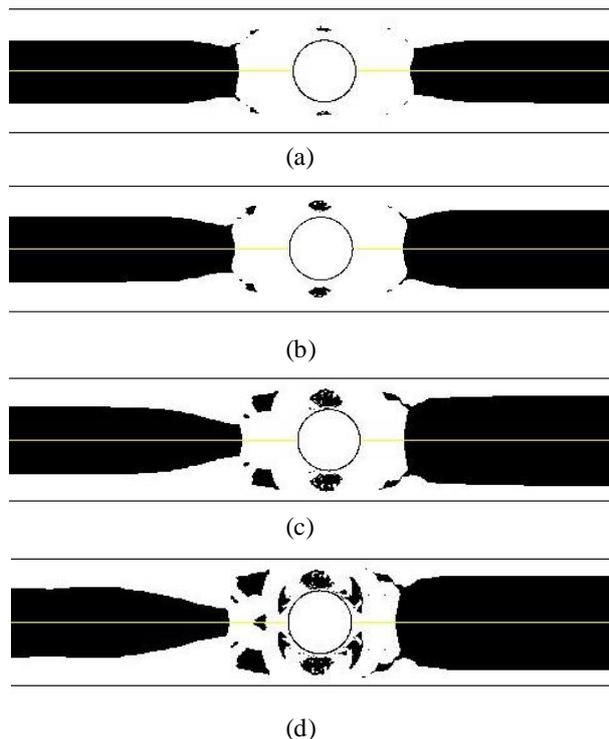
Na Figura 4 podemos observar, o campo de viscosidade para  $b=0$ ,  $b=1$ ,  $b=5$  e  $b=10$ . Com o aumento do coeficiente  $b$ , pode-se observar uma grande variação no campo de viscosidades a montante do cilindro e uma variação suave a jusante do cilindro. Esse comportamento acontece devido a viscosidade ser afetada diretamente pelo campo de temperaturas, onde se observa um maior gradiente de temperaturas, uma maior variação da viscosidade é apresentada.

Figura 4. Campo de viscosidade para: (a)  $b=0$ ; (b)  $b=1$ ; (c)  $b=5$  e (d)  $b=10$



A seguir são apresentados os resultados preliminares para as regiões *yielded/unyielded* (zonas que escoam/não escoam).

Figura 5. *yielded/unyielded zones* para: (a)  $b=0$ ; (b)  $b=1$ ; (c)  $b=5$  e (d)  $b=10$



Aonde ocorre maiores gradientes de temperaturas é onde existe maior mudanças nas zonas plastificadas (*unyielded zones*). Pode ser observado a montante do cilindro para todas as variações do coeficiente  $b$ . Percebe-se também que para materiais com maiores influencias da temperatura fig. (5 (c)-(d)) existem maiores mudanças em relação as zonas plastificadas.

#### 4. CONCLUSÃO

O modelo mecânico empregado para descrever o comportamento de fluidos viscoplásticos de Herschel-Bulkley modificado pode prever a influência do campo de temperaturas e campo de taxas de deformação sobre a viscosidade aparente, assim como os efeitos de inércia sobre a transferência de calor. Podemos analisar que onde existem maiores variações no campo de temperaturas, existe uma maior alteração no campo de viscosidades, podemos verificar também que há influência sobre as *yielded/unyielded zones*.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] R.P. Chaabra and J.F. Richardson, “Non-Newtonian Flow and Applied Rheology” Elsevier.
- [2] M. Naimi, R. Devenne and Lebochem, “Estude Dynamique et Thermique de l’écoulement de Couett” Deat Mass Transfer.
- [3] T.C. Papanastasiou, “Flows of Materials With Yield” Journal of Rheology.
- [4] S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Deat Mass Transfer, NJ: 1980.
- [5] R.W. Fox, A.T. McDonald and P.J. Pritchard, Inetrodução à Mecânica dos Fluidos, LTC, NJ: 2006.
- [6] Ansys inc. Fluent 17.1 User guide.