

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DE FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS DEPENDENTES DA TEMPERATURA

Larissa Lopes Nunes, larissalnunes@aluno.santoangelo.uri.br¹

Cleiton Elsner da Fonseca, cfonseca@san.uri.br²

¹Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Avenida Universidade das Missões, 464 – Universitário, Santo Ângelo – RS, 98802-470,

² Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Avenida Universidade das Missões, 464 – Universitário, Santo Ângelo – RS, 98802-470,

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 Fig. 1 ilustra o domínio computacional do problema estudado. O domínio computacional tem uma razão de aspecto, $\beta=h/R=4$, e uma distância entre as placas de $h=4R$. 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.

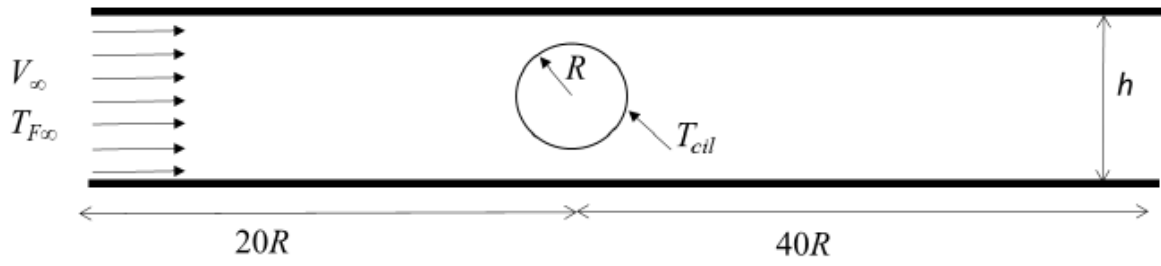


Figura 1. Descrição do problema.

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:

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

onde Re é o número adimensional de Reynolds, ρ é a densidade, V_{∞} é a velocidade do fluido não perturbado, μ é a viscosidade, x^* é a posição em x adimensional, y^* é a posição em y adimensional, k é a condutividade térmica, C_p é o calor específico a pressão constante, R é o raio, Re é o número adimensional de Reynolds e o Pr 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, ρ 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, α 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.

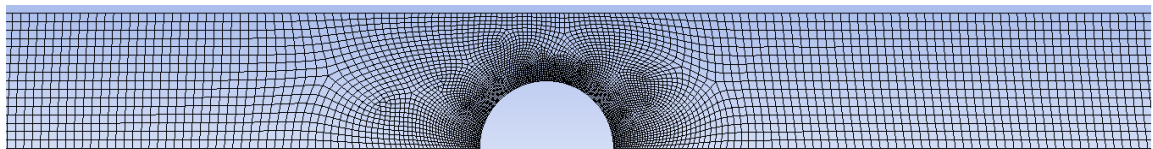


Figura 2. Domínio discretizado.

A malha foi definida a partir de um teste de independência de malha, realizado da seguinte forma, foram testados três diferentes tamanhos de volumes, a fim de obter uma menor variação nos resultados, podendo assim ser considerado uma malha independente, a Fig.3 apresenta as velocidades para três diferentes malhas, que foram determinadas diminuindo 30% de M1 e assim até chegar a M3, onde podemos considerar que foi obtida a independência, então utilizou-se a malha M2. O erro entre M1 e M2 é igual a 0,095%, e entre M2 e M3 é igual a 0,001%.

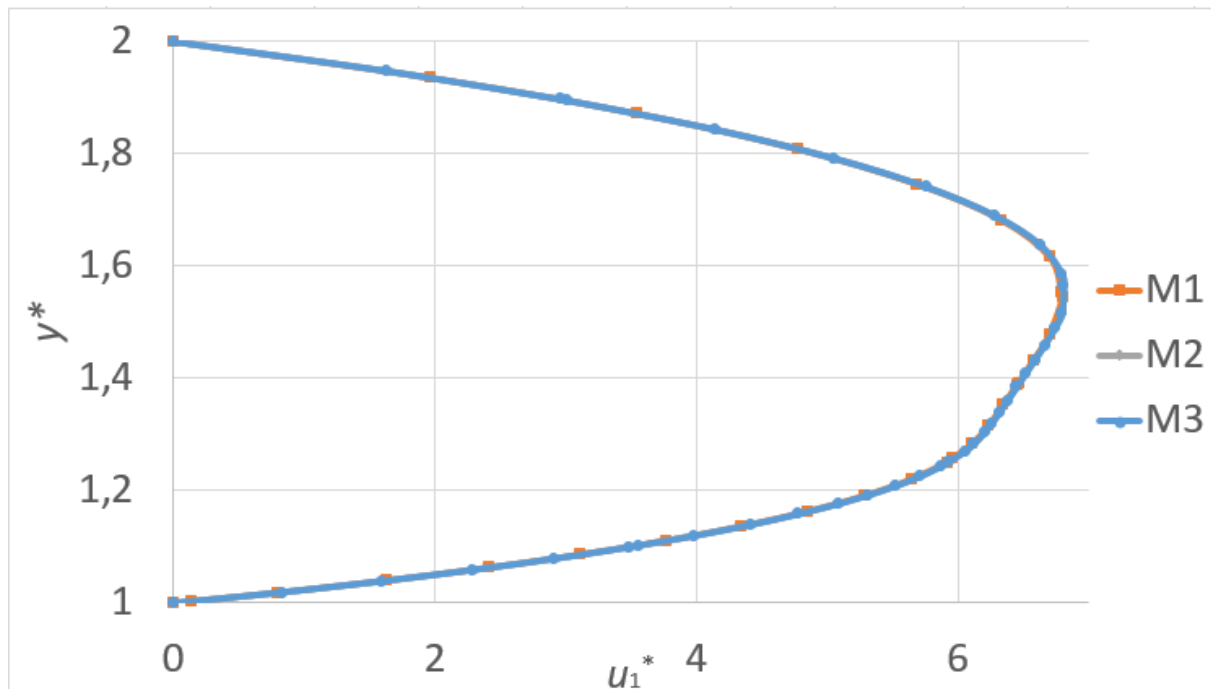


Figura 3. Teste de independência de malha.

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

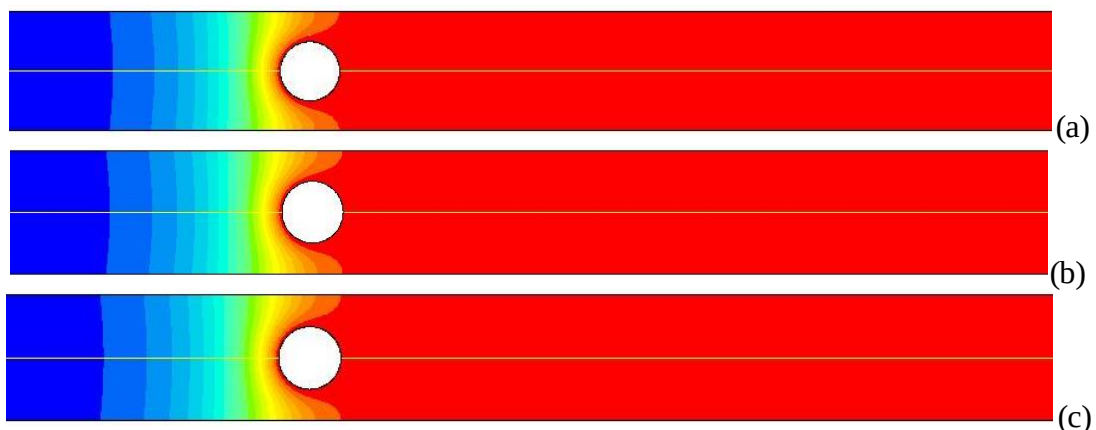
O procedimento utilizado para o cálculo do campo de escoamento foi o SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*) de Patankar (1980).

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 $P_r=1$ em torno de um cilindro com temperatura adimensional $T_{cil}^*=1$ e com temperatura do fluido não perturbada pelo cilindro $T_{F\infty}^*=0$.

A influência da temperatura sobre a consistência do material é controlada pelo parâmetro b , neste estudo realizou-se variação deste parâmetro a fim de obter resultados para diferentes b , em fluidos reais este parâmetro geralmente varia entre 0 e 3, este estudo tem fim apenas de validação, então esta variação maior possibilita a utilização do problema para um número maior possível de fluidos reais.

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. 4 (a)-(d), esse resultado é esperado devido ao número de Reynolds baixo, o que representa uma transferência de calor predominantemente por difusão.



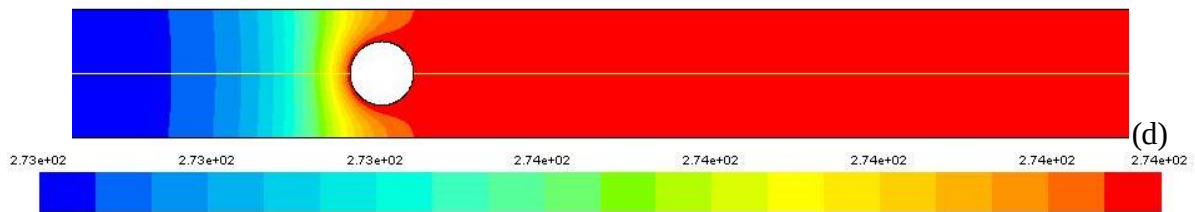


Figura 4. Campo de temperaturas para: (a) $b=0$; (b) $b=1$; (c) $b=5$ e (d) $b=10$.

Na Fig. 5 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.

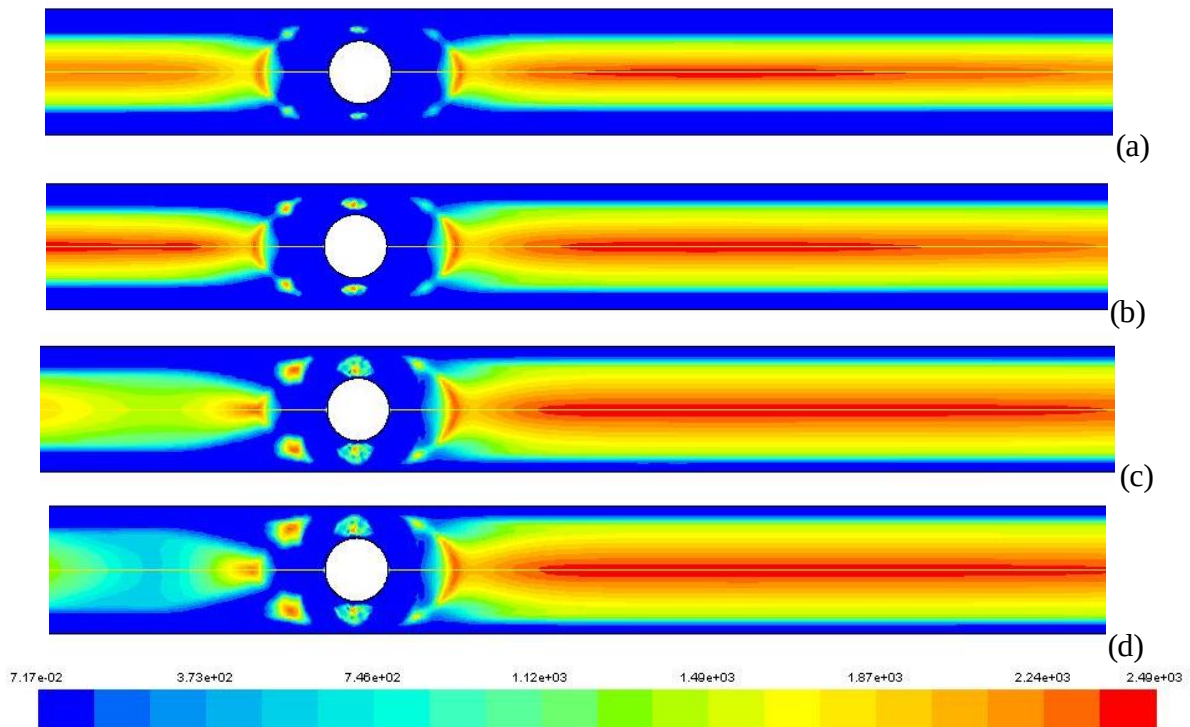
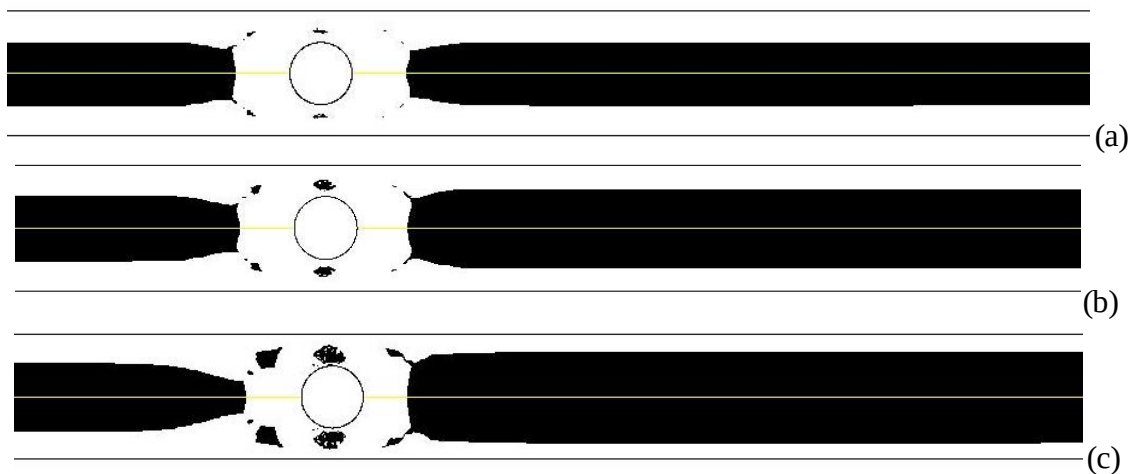


Figura 5. Campo de viscosidade para: (a) $b=0$; (b) $b=1$; (c) $b=5$ e (d) $b=10$.

A seguir são apresentados os resultados preliminares para as regiões *yielded/unyielded* (zonas que escoam/não escoam). Estas zonas são definidas a partir da tensão mínima de escoamento τ_0 , quando τ_0 é atingido o fluido passa a escoar.



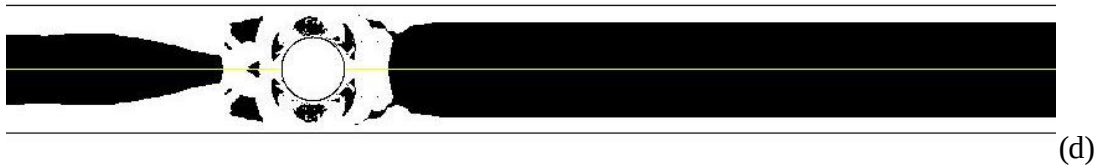


Figura 6. Yielded/unyielded zones para: (a) $b=0$; (b) $b=1$; (c) $b=5$ e (d) $b=10$.

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. 6 (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

- Chaabra R. P., and Richardson J. F., 2008. "Non-Newtonian Flow and Applied Rheology", Elsevier.
- Naimi M., Devenne R., Lebochem, 1990. "Étude Dynamique et Thermique de l'écoulement de Couett". Deat Mass Transfer.
- Papanastasiou T. C., 1987. "Flows of Materials With Yield", Journal of Rheology.
- Patankar S. V., 1980. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". Deat Mass Transfer.
- Ansyes inc. "Fluent 17.1 User guide".
- Fox R. W., McDonald A. T., Pritchard P. J., 2006. "Introdução à Mecânica dos Fluidos". LTC.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

NUMERICAL INVESTIGATION OF TEMPERATURE-DEPENDENT VISCOPLASTIC FLUIDS

Larissa Lopes Nunes, larissalnunes@aluno.santoangelo.uri.br¹
Cleiton Elsner da Fonseca, cfonseca@san.uri.br²

¹Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Avenida Universidade das Missões, 464 – Universitário, Santo Ângelo – RS, 98802-470,

²Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Avenida Universidade das Missões, 464 – Universitário, Santo Ângelo – RS, 98802-470,

Abstract. This study is about a numerical research using the finite volume method of viscoplastic non-Newtonian fluid flows with temperature dependence. In the modeling used in this research, the classic Herschel-Bulkley model that presents a constitutive equation that describes a viscoplastic behavior of the materials, is modified so that the viscosity feels the effects of temperature. Effects of convection of heat and inertia on the field of temperatures and apparent viscosity are studied through the variation of dimensionless numbers and parameters of interest of the model. The modified Herschel-Bulkley fluid flow simulations around a heated cylinder confined between two flat plates were made through the ANSYS FLUENT software and are defined as the problem for testing the mechanical modeling.

Keywords: Non-Newtonian fluids, Herschel-Bulkley model, Viscoplastic materials.